

Maiju Kehusmaa

PIENTEN MODULAARISTEN REAKTO- REIDEN TURVALLISUUS JA TALOU- DELLISUUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Maiju Kehusmaa: Pienten modulaaristen reaktoreiden turvallisuus ja taloudellisuus
(Safety and economy of small modular reactors)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Pienet modulaariset reaktorit (small modular reactor, SMR) ovat sähköteholtaan alle 300 MW:n modulaarisia ydinvoimaloita. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kirjallisuuslähteiden avulla, miten SMR:ien turvallinen toiminta voidaan taata ja millaiset kilpailumahdollisuudet SMR:illä on energiamarkkinoilla. SMR:ien turvallisuutta tarkastellaan selvittämällä, millaisia turvajärjestelmiä SMR:issä voidaan käyttää sekä mitä asioita on huomioitava SMR:ien turvallisessa sijoittamisessa ja ydinjätehuollossa. Taloudellisuuden kannalta tutkitaan SMR:ien kustannusrakennetta ja arvioita niiden kustannuksista. Lisäksi verrataan SMR:ien arvioituja kustannuksia muiden energiantuotantomuotojen kustannuksiin. Työssä keskitytään vesijäähdytteisiin kevytvesireaktoreihin.

Työssä selvisi, että SMR:ien keskeisimmät turvalaitteistot ovat säätösauvat, jälkilämmönpoistojärjestelmä, ruiskutusjärjestelmät sekä reaktorin suojakuori. Eri turvalaitteistoille on useita eri ratkaisuja ja usein laitteistot ovat passiivisia, eli niiden toiminta perustuu esimerkiksi veden luonnolliseen kiertoon tai paine-eroihin. Eräänä tavoitteena on, että SMR:t voitaisiin sijoittaa hajautetusti niin, että sähkö ja kaukolämpö voitaisiin tuottaa lähellä asutusta. Passiivisten turvajärjestelmien ja pienen ydinpolttoaineen määrän ansiosta SMR:ien sijoittaminen lähelle asutusta voisi olla mahdollista, mutta vaatii vielä lisätarkastelua. Ydinjätehuollon osalta SMR:t eivät eroa juurikaan perinteisistä ydinvoimaloista, kun käytössä on sama polttoaine. SMR:illä kyseeseen voi kuitenkin tulla keskitetty jätehuoltomalli, mikä vaatisi muutoksia lainsäädäntöön ainakin Suomessa.

Työssä ei saatu selville millaisiksi SMR:ien kustannukset muodostuvat, sillä SMR:iä ei ole vielä juurikaan rakennettu. Kävi kuitenkin ilmi, että Venäjällä toimivan KLT-40S-tyyppin kelluvan kevytvesireaktorin kustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin venäläisellä VVER-1200-painevesireaktorilla. SMR:ien etuna pidetään mahdollisuutta sarjatuoantoon, sillä se jakaa suunnittelukustannuksia useammalle reaktorille sekä lyhentää voimalan rakennusaikaa. SMR:t voisivat siis olla tulevaisuudessa kilpailukykyisiä, mutta vielä siitä ei ole näyttöä.

Avainsanat: SMR, ydinvoima, turvallisuus, taloudellisuus, kevytvesireaktori, PWR

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PIENET MODULAARISET REAKTORIT	2
3. TURVALLISUUS.....	4
3.1 Reaktorin turvajärjestelmät.....	4
3.1.1 Jälkilämmönpoisto	5
3.1.2 Korkeapaineiset ruiskutusmenetelmät.....	6
3.1.3 Matalapaineiset ruiskutusmenetelmät	7
3.1.4 Suojarakenteet.....	9
3.1.5 Onnettomuustilanteiden hallintajärjetelmät.....	11
3.2 Voimalan turvallinen sijoittaminen	12
3.3 Ydinjätteen turvallisuus	13
4. TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS.....	15
4.1 Kustannusrakenne	15
4.2 Kustannukset sähköntuotannossa.....	16
4.3 Kustannukset kaukolämmöntuotannossa ja CHP-tuotannossa	18
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BWR	kiehutusvesireaktori
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LWR	kevytvesireaktori
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PWR	painevesireaktori
SMR	pieni modulaarinen reaktori
STUK	Säteilyturvakeskus

1. JOHDANTO

Vuonna 2018 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) julkaisi raportin ilmaston lämpenemisen rajoittamisesta. Samana vuonna maailman energiasta 80 % tuotettiin fossiililla polttoaineilla (IEA 2019). Fossiilisten polttoaineiden eli hiilen, öljyn ja maakaasun aiheuttamat hiilidioksidipäästöt kiihdyttävät ilmaston lämpenemistä, minkä vuoksi niiden käyttöä olisi vähennettävä. Yksi merkittävimmistä keinoista on ydinvoiman käytön lisääminen sähkön- ja kaukolämmöntuotannossa. Valtavien ydinvoimaloiden sijaan voitaisiin rakentaa pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR, small modular reactor). SMR-tekniologialla voitaisiin rakentaa voimalaitoksia matalammilla kustannuksilla käyttäen suppeampia turvatoimia (Mäkelä 2019).

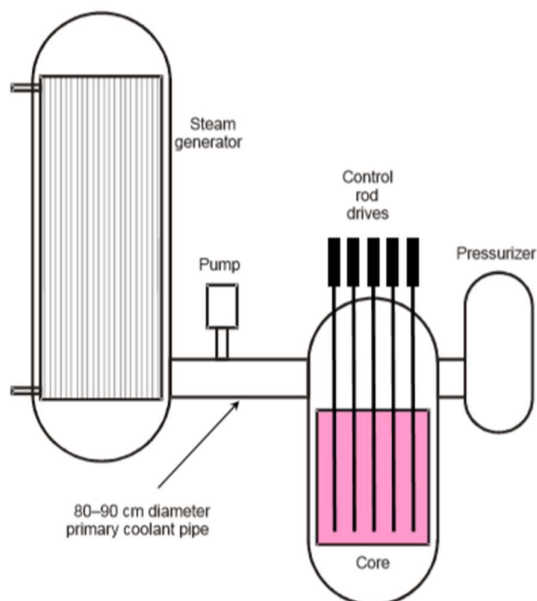
Tässä työssä käsitellään SMR-tekniologian turvallisuutta ja taloudellisuutta keskittyen vesijäähdytteisiin kevytvesireaktoreihin (LWR), joista yleisimpiä ovat painevesireaktorit (PWR). Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa tutkitaan, millaisia turvatoimia reaktoreissa voidaan käyttää, miten reaktorit tulisi sijoittaa ja mitä syntyvälle ydinjätteelle voidaan tehdä turvallisuuden takaamiseksi. Talouden näkökulmasta selvitetään, mistä SMR:n hinta koostuu ja kuinka suuriksi lopulliset hinnat voivat kohota sekä millaiset kilpailumahdollisuudet SMR:illä on energiamarkkinoilla.

Luvussa 2 kerrotaan SMR:n rakenteesta, toimintaperiaatteista ja siitä, miten se eroaa perinteisestä ydinvoimalasta. Luvussa 3 keskitytään SMR:ien turvallisuusmekanismeihin sekä voimaloiden turvalliseen sijoittamiseen sekä ydinjätteen turvalliseen käsittelyyn. Luvussa 4 selvitetään, mistä SMR:ien hinta muodostuu, millaisia kustannusarvioita niille on ja millaiset kilpailumahdollisuudet niillä on energiamarkkinoilla. Luvussa 5 käydään läpi syntyneitä johtopäätöksiä.

2. PIENET MODULAARISET REAKTORIT

International Atomic Energy Agency (IAEA) määritelmän mukaan SMR on ydinreaktorimoduuli, joka on sähköteholtaan alle 300 MW. SMR:t voidaan jakaa vesijäähdytteisiin kevyt- ja raskasvesireaktoreihin, korkean lämpötilan kaasujäähdytteisiin reaktoreihin, metallijäähdytteisiin ja natrium- ja kaasujäähdytteisiin nopeaneutronisiin reaktoreihin sekä sulasuolareaktoreihin. Näistä eniten suunnitteilla on vesijäähdytteisiä kevytvesireaktoreita (LWR), jotka voidaan jakaa painevesireaktoreihin (PWR) ja kiehutusvesireaktoreihin (BWR) sekä kaukolämmöntuotannossa käytettäviin reaktoreihin. Näistä yleisimpiä ovat painevesireaktorit, joita voidaan sijoittaa sekä maalle että merelle. (IAEA 2016) SMR-teknologiaa voidaan käyttää sähkön- ja kaukolämmöntuotannon lisäksi esimerkiksi suolan erottamiseen merivedestä sekä vedyn valmistukseen polttokennokäyttöön.

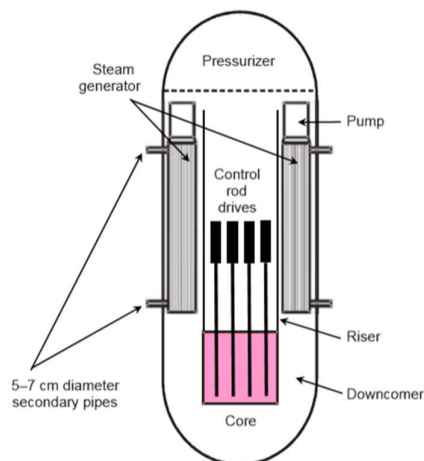
SMR:t eroavat perinteisistä ydinreaktoreista esimerkiksi höyrystimien sijainnin suhteen. Kuvassa 1 esiintyvässä perinteisessä PWR:ssä höyrystin, jossa primääri- ja sekundäripiirit kohtaavat, on erillään ytimestä, jossa ydinreaktio tapahtuu. Myös ydinreaktion hallitsemiseen käytettävien säätösauvojen hallintamekanismit ja reaktorin paineistukseen käytettävä paineastia ovat reaktorikapselin ulkopuolella.



Kuva 1. Perinteinen PWR erillisellä höyrystimellä (Ingersoll 2016)

Kuvassa 2 on periaatekuva SMR:ien käytölle melko tyypillisestä painevesireaktorista, jossa höyrystimet ovat ytimen kanssa samassa paineastiassa. Primääripiirin vesi virtaa

paineastiassa, jonka ytimessä tapahtuvat ydinreaktiot kuumentavat sitä. Primääripiirin vesi puolestaan luovuttaa lämpöä höyrystimissä virtaavalle sekundääripiirin vedelle, joka höyrystyy. Paineastiassa on keskellä urania, useimmiten U-235-isotooppia, sisältävä ydin ja säätösauvat, joilla voidaan säätää ytimessä tapahtuvia fissioreaktioita.



Kuva 2. Periaatekuva painevesi-SMR:stä (Ingersoll 2016)

Sähköverkon kannalta SMR:t ovat joustavampia kuin suuret perinteiset ydinvoimalat. Matalan tuotannon SMR:t voitaisiin kytkeä pienempijännitteisempään verkkoon kuin suuret voimalaitokset, eikä pienen voimalaitoksen alasajo vaikuta juurikaan verkkoon. Tämä osaltaan mahdollistaa SMR:ien hajautetun sijoittamisen. (NEA & OECD 2016)

3. TURVALLISUUS

SMR:issä suurin turvallisuushaaste on radioaktiivinen säteily. On varmistettava, että reaktori on riittävän hyvin suojattu ja että fissiossa syntyvää säteilyä ei pääse juurikaan ympäristöön. Vikatilanteissa on pystyttävä hillitsemään muun muassa polttoaineen ylikuumeneminen. Syntyvä ydinjäte on myös pystyttävä säilömään turvallisesti kymmeneksi tuhanneksi vuodeksi, kunnes radioaktiivisuus on laskenut riittävästi (STUK 2019b). Turvallisuustoimiin on monia mahdollisia ratkaisuja, joiden käyttö riippuu voimalaitostyypistä ja valtioiden lainsäädännöistä. Alaluvussa 3.1 käsitellään SMR:ien turvajärjestelmiä, luvussa 3.2 SMR-voimalan turvallista sijoittamista ja luvussa 3.3 ydinjätteen turvallisuutta.

3.1 Reaktorin turvajärjestelmät

PWR:n tärkeimmät turvallisuusmekanismit normaalissa käytössä ovat säteilyn estävä suojakuori ja säätösauvat, joilla säädetään reaktorissa tapahtuvia ydinreaktioita. Sauvat on valmistettu esimerkiksi grafiitista ja ne sisältävät booria tai muuta materiaalia, joka absorboi neutroneita. Säätösauvojen toiminta perustuu siis vapaiden neutronien säätelyyn. Normaalitilanteessa sauvojen avulla ydinreaktiot voidaan myös tarvittaessa pysäyttää kokonaan. Perinteisissä ydinreaktoreissa säätösauvojen hallintamekanismit sijaitsevat yleensä paineastian ulkopuolella, mutta SMR:issä ne sijaitsevat usein paineastian sisällä, jolloin riski säätösauvavikaan on pienempi kuin perinteisessä ydinreaktorissa (IAEA 2016). Lisäksi reaktoreissa on jälkilämmönpoisto- ja ruiskutusmekanismeja sekä muita järjestelmiä, joilla voidaan säädellä esimerkiksi painetta. Lisäksi vakaviin onnettomuuksiin varaudutaan erilaisilla onnettomuustilanteiden hallintajärjestelmillä.

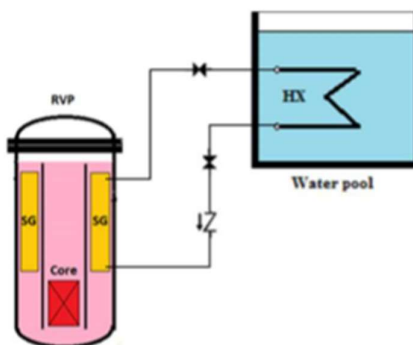
Perinteisten ydinvoimaloiden turvallisuusmekanismit ovat enimmäkseen aktiivisia järjestelmiä, jotka vaativat järjestelmälle käyttäjää ja joiden käyttö vaatii esimerkiksi sähköä. 1980-luvulla alettiin kehittää järjestelmiä, jotka eivät tarvitse sähköä tai aktiivista käyttöä ja jotka siksi olisivat varmempia kuin aktiiviset järjestelmät. Tuloksena saatiin aikaan passiivisia turvajärjestelmiä, jotka toimivat esimerkiksi painovoiman tai lämpötilaeron avulla ja joiden toiminta ei riipu ihmisistä eikä sähkön saannista. Tällaista passiivista järjestelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi reaktoriytimen jäädytyksessä. (Ingersoll 2016) SMR:n pieni koko mahdollistaa pelkkien passiivisten turvajärjestelmien käytön, minkä ansiosta SMR:ää voitaisiin käyttää ilman voimalassa olevaa henkilökuntaa (Mäkelä

2019). Voimalaitoksia voitaisiin ohjata etävalvomosta, mikä aiheuttaisi tietoturvallisuus- haasteita, kun laitosten tietoliikenne ei perinteisten ydinvoimaloiden tavoin rajoitu vartioidun laitosalueen sisälle (STUK 2019a).

3.1.1 Jälkilämmönpoisto

Ydinreaktorissa syntyy lämpöä fissiotuotteiden hajotessa myös sen jälkeen, kun reaktiot on pysäytetty säätösauvojen avulla. Tämä syntyvä jälkilämpö kuumentaa reaktoria, jota pitää jäähdyttää. Ydinreaktorissa eräs tärkeä turvallisuusmekanismi on siis jälkilämmönpoistomenetelmät. SMR-teknologiassa jälkilämpö poistetaan usein passiivisilla lämmönpoistomenetelmillä. (IAEA 2016)

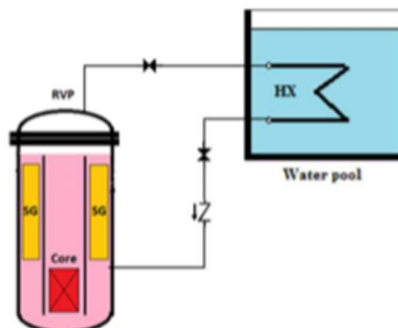
Kuten kuvassa 3, SMR:issä höyrystin voi olla kytkettynä jäähdytysaltaassa olevan lauhduttimen kanssa samaan piiriin, jossa höyrystimen ja lauhduttimen erottaa venttiilit sekä lauhduttimen ja höyrystimen välissä oleva varoventtiili. Jälkilämmönpoistossa höyrystimissä syntyvä höyry virtaa lauhduttimeen avoimen venttiilin läpi ja lauhtunut vesi virtaa takaisin höyrystimeen painovoiman avulla. (Khattak et al. 2017) Kuvan 3 mukaista jälkilämmönpoistomenetelmää hyödynnetään IRIS-reaktoreissa (Carelli et al. 2004).



Kuva 3. Jälkilämmönpoisto höyrystintä jäähdyttämällä (IAEA 2016)

Toinen vaihtoehtoinen menetelmä on jäähdyttää kuvan 4 tavoin reaktorin primääripiiriä höyrystimen sijaan. Ylempi venttiili paineastian ja lauhduttimen välillä on aina avoin ja alempi lauhduttimen ja paineastian välinen venttiili on normaalitilanteessa kiinni. Alemman venttiilin avautuessa lauhtunut vesi palaa painovoimaisesti takaisin paineastiaan,

jolloin syntyy kierto paineastian ja lauhduttimen välille. Tällaista järjestelmää hyödynnetään Argentiinalaisissa CAREM25- ja Yhdysvaltalaisissa NuScale-reaktoreissa. (IAEA 2016)



Kuva 4. Jälkilämmönpoisto primääripiiriä jäähdyttämällä (IAEA 2016)

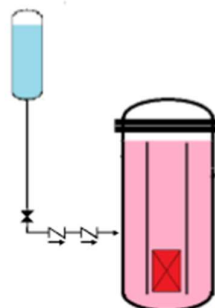
Samankaltainen järjestely voidaan tehdä myös pumppua käyttäen. Pumppukäyttöisessä järjestelmässä pumpun on saatava sähköä toimiakseen, ja siksi se on epävarmempi kuin painovoimalla toimiva järjestelmä. (IAEA 2016)

3.1.2 Korkeapaineiset ruiskutusmenetelmät

Koska reaktoriytimen sulaminen on erittäin vakava onnettomuus, sen välttämiseksi on kehitetty hätäruiskutusjärjestelmä. Hätäruiskutusjärjestelmän tarkoitus estää reaktoriytimen ympärillä olevan veden pinnan laskeminen niin alas, ettei se enää suojaa ydintä. Useimmat korkeapaineiset ruiskutusjärjestelmät on kehitetty toimimaan heti, kun reaktorin jäähdytysveden pinta laskee liian alas. Ruiskutus on usein kertaluontoinen ja useissa reaktoreissa sen tarkoitus on varmistaa jäähdytysveden riittävyys, kunnes matalapaineinen ruiskutusjärjestelmä saadaan käyntiin. (IAEA 2016)

Eräs passiivinen ruiskutusjärjestelmä koostuu kuvan 5 mukaisesta boorivettä sisältävästä säiliöstä, joka on paineistettu esimerkiksi typen avulla. Säiliön pohja on yhdistetty paineastian alaosaan putkella, jossa on kaksi varoventtiiliä, jotka aukeavat, kun paine reaktorin paineastiassa laskee boorivesisäiliön paineen alapuolelle. Tällä ruiskutustekniikalla voidaan ruiskuttaa jäähdytysvettä paineastiaan vain kerran tilanteessa, jossa esimerkiksi paineastiassa veden pinta on vaarassa laskea liian alas. Ruiskutusveden boori absorboi vapaita neutroneja, mikä hidastaa ydinreaktioita. (IAEA 2016; Khattak et al. 2017) Paineistettu boorivesisäiliö voidaan myös asentaa käyttäen aktiivista järjestelmää niin, että säiliön ja paineastian välillä on sähköllä toimiva pumppu. Tällaista pumpulla

toimivaa järjestelmää on suunniteltu käytettäväksi Etelä-Korean SMART-reaktoreissa. (IAEA 2016)



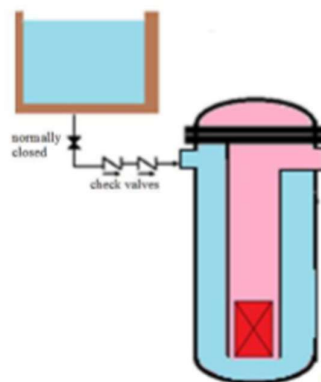
Kuva 5. Booritankillinen ruiskutusjärjestelmä (IAEA 2016)

Kolmas vaihtoehto on kytkeä myös boorivesisäiliön yläosa paineastiaan. Paineastian ja boorivesisäiliön välillä on normaalitilanteessa auki oleva venttiili, minkä vuoksi säiliö on paineastian kanssa samassa paineessa. Säiliön ja paineastian välillä on kiinni oleva venttiili ja kaksi varoventtiiliä, kuten kuvassa 5. Säiliön alaosaan lähtevä putki yhdistyy paineastian alaosaan. Häätätilanteessa kiinni olevat venttiilit aukeavat, jolloin boorivesi virtaa paineastiaan hidastaen ydinreaktioita. (Carelli et al. 2004; IAEA 2016; Khattak et al. 2017) Tätä tekniikkaa hyödynnetään muun muassa IRIS- ja Westinghouse-reaktoreissa (IAEA 2016).

3.1.3 Matalapaineiset ruiskutusmenetelmät

Kuvassa 6 on esitetty passiivinen matalapaineinen ruiskutusjärjestelmä, jossa reaktorin paineastia on yhdistetty putkella isoon boorivettä sisältävään altaaseen, joka sijaitsee ylempänä kuin paineastia. Allas voi olla sama kuin jälkilämmönpoistossa käytettävä jäähdytysvesiallas. Altaan ja paineastian välillä on normaalitilanteessa suljettu venttiili ja kaksi varoventtiiliä. Kun säiliön paine laskee alemmaksi kuin altaan paine, venttiilit avautuvat ja boorivesi virtaa paineastiaan. Jotta ruiskutusjärjestelmä toimisi häätätilanteessa, paineastian paine on laskettava erillisellä automaattisella alipaineistamisjärjestelmällä.

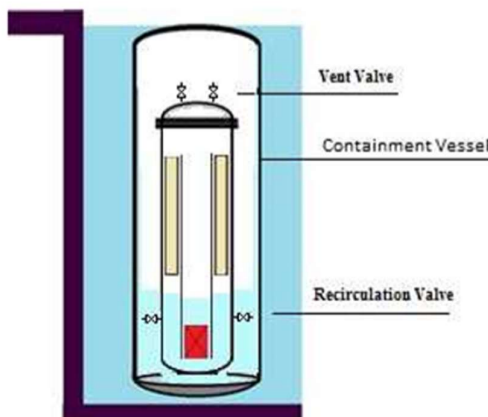
(Khattak et al. 2017) Alipaineistamisjärjestelmä koostuu venttileistä, jotka laskevat paineen automaattisesti veden pinnan laskiessa liian alas, jolloin passiivinen matalapaine-ruiskutusjärjestelmä alkaa toimia (Carelli et al. 2004).



Kuva 6. Passiivinen matalapaineinen ruiskutusjärjestelmä (IAEA 2016)

Toinen reaktorin paineastian alhaisesta paineesta aktivoituva ruiskutusjärjestelmä hyödyntää, korkeapaineisten ruiskutusjärjestelmien tavoin, boorivettä sisältävää paineistettua säiliötä. Säiliö on erotettu paineastiasta levyillä, jotka aukeavat paine-eron kasvaessa riittävän suureksi. Levyjen auetessa vesi pääsee virtaamaan paineastiaan jäädyttämään ydintä. Kyseistä menetelmää hyödynnetään CAREM25-reaktoreissa. (IAEA 2016)

Lisäksi ruiskutus voidaan tehdä rakentamalla paineastian ympärille suojakuori ja upottamalla tämä vesialtaaseen kuten kuvassa 7. Järjestelmällä jäähdytetään ydintä ja estetään paineen nousu avaamalla paineastian yläosassa olevat venttiilit, jolloin paineastiassa syntynyt höyry pääsee virtaamaan suojakuoren ja paineastian väliseen tilaan. Paineastian ulkopuolella höyry lauhtuu vedeksi luovuttaessaan lämpöä suojakuoren ulkopuolella olevalle vedelle. Kun suojakuoren sisällä olevan veden pinta nousee paineastian alaosaan olevien venttiileiden tasolle, venttiilit aukeavat, ja vesi pääsee virtaamaan takaisin paineastian sisälle. Tässä järjestelmässä, jota hyödynnetään NuScale-reaktoreissa, yhdistyy jäähdytysjärjestelmä ja fyysinen suojakuori. (IAEA 2016; Ingersoll et al. 2014)



Kuva 7. Ruiskutusjärjestelmä kiertoventtiileillä (IAEA 2016)

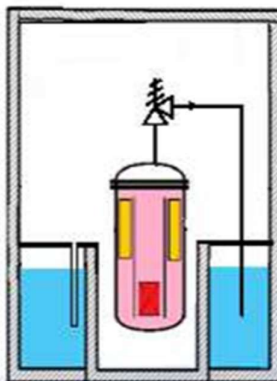
Matalapaineisille ruiskutusjärjestelmille on siis tyypillistä suuret vesialtaat, joista vesi virtaa paineastiaan venttiilien aueissa. Niiden tarkoitus on taata jäähdytysveden riittävyys reaktorissa.

3.1.4 Suojarakenteet

Ydinvoimaloiden suojarakennuksien tärkeimmät tehtävät ovat radioaktiivisen säteilyn ja radioaktiivisten aineiden pääsyn estäminen ympäristöön sekä reaktorin suojaaminen luonnonilmiöiltä ja ihmisten aiheuttamilta riskitekijöiltä. SMR:issä suojakuoriin liittyy fyysisen säteilyesteen lisäksi paineensäätö- ja jäähdytysmekanismeja (Khattak et al. 2017).

Eräs tapa hillitä paineen nousua suojakuoren sisällä on useissa perinteisissä PWR:issä sekä SMART-reaktorissa käytettävä pumpulla toimiva ruiskutusjärjestelmä. Siinä reaktori on sijoitettu betonikuoren sisään vesialtaiden väliin. Altaista pumpataan vettä suojakuoren yläosaan, josta vesi ruiskutetaan takaisin suojakuoren sisälle. Ruiskutettava vesi lauhduttaa höyryä suojakuoren sisällä, hilliten paineen kasvua. (IAEA 2016)

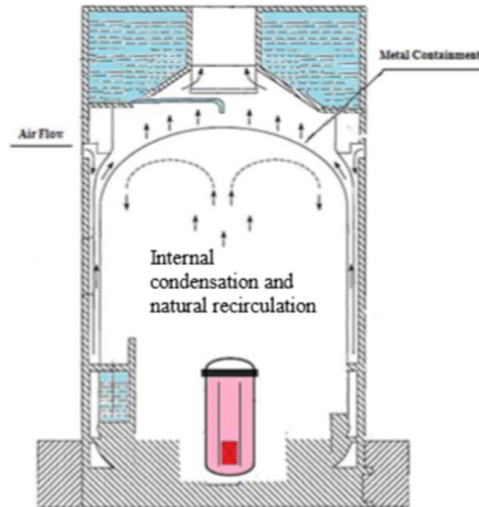
CAREM25- ja IRIS-reaktoreissa sekä perinteisissä BWR:issä käytettävä, kuvassa 8 esiintyvä, suojakuori yhdistää paineensäädön ja fyysisen säteilysuojan, hyödyntäen passiivista järjestelmää. Paineastiassa syntyvä höyry ohjataan, turvaventtiilien läpi, putkia pitkin lauhdutusvesialtaisiin, joissa höyry lauhtuu vedeksi laskien painetta suojakuoren sisällä. (Carelli et al. 2004; IAEA 2016)



Kuva 8. Yhdistetty suojakuori ja paineensäätömekanismi (IAEA 2016)

Kuten edellä olevasta kuvasta 7 nähdään, NuScale-reaktoreissa yhdistyvät metallinen suojakuori ja jäähdytys. Tässä tekniikassa suojakuori on upotettuna vesialtaaseen, johon lämpö siirtyy johtumisen ja konvektion avulla jäähdyttäen reaktoria ja suojakuoren sisällä virtaavaa vettä. Normaalitylanteessa suojakuoren sisälle imetään tyhjiö, mikä vähentää hukkalämpöä ja toimii paineastian lämpöerityksenä. Lisäksi tyhjiö vähentää korroosiota ja kosteusongelmia suojakuoren sisällä. (IAEA 2016; Ingersoll et al. 2014)

Reaktorin paineastian kuumentuessa metallikuorta voidaan jäähdyttää myös passiivisesti ilmalla ja vesisuihkulla, kuten kuvassa 9. Suojakuoren yläpuolella on vesialtaat sekä tila, johon ohjataan ilmavirtaa. Vesisuihku ja ilmavirta jäähdyttävät metallikuoren pintaa saaden vesihöyryn suojakuoren sisällä tiivistymään. Tiivistynyt vesi putoaa alas suojakuoren pohjalle, jossa se höyrystyy uudelleen jäähdyttäen samalla reaktoria. (IAEA 2016; Khattak et al. 2017)



Kuva 9. Ilmajäähdytteinen metallinen suoja kuori (IAEA, 2016)

Voimalaitoksissa on siis säteilyn pysäyttävän suoja kuoreen integroituna erilaisia jäähdytys- ja turvalaitteistoja, joiden avulla pyritään takaamaan reaktorin turvallinen käyttö. Eri reaktorityypeille on suunniteltu omat, useista pienemmistä järjestelmistä koostuvat, turvajärjestelmät.

3.1.5 Onnettomuustilanteiden hallintajärjestelmät

SMR:ien suunnittelussa on varauduttava myös vakavien onnettomuuksien hallintaan. Erilaisten jälkilämmönpoisto- ja ruiskutusjärjestelmien lisäksi SMR:issä on järjestelmiä, jotka toimivat, jos edellä esitetyt järjestelmät eivät esimerkiksi hillitse riittävästi ytimen lämpötilan nousua. (IAEA 2016)

Eräissä järjestelmissä reaktorin paineastia on osittain suoja kuoreen yhdistetyssä vesialtaassa. Jos reaktoriydin pääsee onnettomuustilanteessa sulamaan, järjestelmän avulla pidetään huoli siitä, että reaktorin paineastian alaosa on koko ajan vedessä. Kun paineastian ympärillä olevan altaan vesi kuumenee ja höyrystyy, sivultaista virtaa viileää vettä jäähdyttämään paineastiaa. Höyrystynyt vesi tiivistyy suoja kuoren pinnoilla, tippuen takaisin jäähdytysaltaisiin. Tätä järjestelmää käytetään muun muassa SMART- ja IRIS-reaktoreissa. (Carelli et al. 2004; IAEA 2016)

Toinen ytimensulamisonnettomuudessa käytettävä järjestelmä on reaktorin paineastian alle sijoitettava rakenne, johon sulaa ydin valuu onnettomuustilanteessa. Tällä järjestel-

mällä estetään sulan ytimen valuminen muualle voimalaitokseen ja näin hillitään onnettomuutta. Kuumuutta kestävässä rakenteessa, johon sula ydin valuu, on jäädytysjärjestelmä, jonka avulla sula ydin voidaan pitää stabiilina pitkään. (IAEA 2016)

Ydinpolttoaineen vahingoittuessa vaarana on vedyn räjähtäminen. Ydinpolttoaine ladataan yleensä polttoainesauvoihin, jotka on valmistettu zirkoniumpohjaisesta metalliseoksesta (Eurasto et al.). Ylikuumentuneet zirkoniumputket alkavat hapettua vesihöyryn vaikutuksesta, mikä lisää vedyn määrää reaktorissa. Vedyn osuuden, ja samalla paineen, noustessa liian korkeaksi, tapahtuu vetyräjähdys. Räjähdys voidaan estää lisäämällä onnettomuustilanteessa reaktorin hapen määrää. Happi reagoi vapaan vedyn kanssa muodostaen vettä. Räjähdysten estämiseksi SMR:issä on katalyyttilevyjä, joissa hapen ja vedyn yhdistyminen tapahtuu. Tällaista järjestelmää käytetään muun muassa SMART-, IRIS- ja CAREM25-reaktoreissa. (IAEA 2016)

Suojakuoren paineen noustessa onnettomuustilanteessa niin korkeaksi, että suojakuoren painekestoisuus saavutetaan tai ylitetään, ilmaa voidaan johtaa suodattimien kautta ulos reaktorista. Erittäin vakavissa tilanteissa, käytettävä ilmaputki on normaalisti suljettu useilla venttiileillä ja levyllä, joka repeää suuren paine-eron vuoksi. Putken lopussa on useita suodattimia, joiden tarkoitus on estää radioaktiivinen säteily reaktorin ulkopuolelle. Tällainen hätäjärjestelmä on suunniteltu useimpiin SMR-tyyppeihin. (IAEA 2016)

3.2 Voimalan turvallinen sijoittaminen

SMR-tekniikan kehityksessä eräänä tavoitteena on, että voimalat voitaisiin sijoittaa lähelle asutusta ja että niiden ympärille ei tarvitsisi rakentaa yhtä massiivisia turvatoimia kuin perinteisissä ydinvoimaloissa. Suomessa perinteisten ydinvoimaloiden ympärille on nykyään rakennettava noin 5 km² laajuinen suojavyöhyke, jonka sisäpuolella ei saa olla esimerkiksi sairaaloita, kouluja tai merkittäviä teollisuuslaitoksia, joiden evakuoiminen olisi vaikeaa (Ahonen et al. 2020). Pienreaktoreille pitäisi siis laatia uudenlaiset turvallisuusvaatimukset, jotta toivotunlainen asutuksen lähelle sijoittaminen olisi mahdollista. SMR:n turvallisen sijoittamisen asutuksen lähelle voisi mahdollistaa niissä käytettävät passiiviset turvajärjestelmät ja perinteisiä ydinvoimaloita pienempi käytettävän ydinpoltoaineen määrä.

SMR-voimalan turvallisessa sijoittamisessa on huomioitava myös terrorismin uhka, sillä ydinvoimaan kohdistuvalla terrorismilla voisi olla tuhoisat seuraukset. Esimerkiksi IRIS-

reaktori on suunniteltu sijoitettavaksi puoleksi maan alle, mitä perustellaan muun muassa sillä, että matalampaan kohteeseen on vaikeampi osua ohjuksilla (Carelli et al. 2004). Myös SMR-teknologiaa käytettäessä on huolehdittava siitä, ettei liian lähelle voimalaitosta pääse ulkopuolisia henkilöitä.

Säteilyturvakeskuksen (STUK) mukaan, jotta Suomessa SMR voitaisiin sijoittaa lähelle asutusta tai teollisuuslaitosta, on kyettävä osoittamaan, että radioaktiivista säteilyä ei pääse ympäristöön missään tilanteessa. Jos tämän osoittaminen ei ole mahdollista, on tilannetta tarkasteltava tapauskohtaisesti ottaen huomioon SMR:n teho ja turvallisuusominaisuudet. Kevytvesireaktoreissa radioaktiivisen aineen määrä on lähes suoraan verrannollinen reaktorin tehoon, minkä vuoksi pienemmissä reaktoreissa syntyvä säteily on vähäisempää kuin periteisissä suurissa reaktoreissa. (STUK 2019)

3.3 Ydinjätteen turvallisuus

Ydinjätettä on jäähdytettävä noin 40 vuotta ennen loppusijoitusta, ja kunkin ydinvoimavaltion on kehitettävä oma järjestelmänsä ydinjätteen käsittelyyn ja loppusijoitukseen. Loppusijoitusratkaisuihin vaikuttaa muun muassa ydinvoimavaltioiden erilainen geologia. Esimerkiksi Suomessa ja Ruotsissa kallioperä on paksu ja vakaa, minkä vuoksi ydinjäte voidaan loppusijoittaa turvallisesti syvälle maan alle.

Suomessa matala- ja keskiaktiiviselle ydinjätteelle on kehitetty infrastruktuuri, jossa sitä voidaan käsitellä, varastoida ja lopulta se voidaan loppusijoittaa turvallisesti. Myös korkea-aktiivista jätettä, eli käytettyä ydinpolttoainetta, käsitellään ja varastoidaan nykyisten ydinvoimaloiden alueella, ja sen loppusijoituksen toteuttaa Posiva Oy Olkiluodossa, Eurajoella. (STUK 2019) Suomessa on siis hyvät edellytykset huolehtia myös SMR:issä syntyvän ydinjätteen turvallisesta käsittelystä ja loppusijoituksesta.

Olkiluodon loppusijoituslaitos koostuu maanpäällisestä kapselointilaitoksesta ja yli 400 m syvyydessä peruskalliossa sijaitsevasta loppusijoitustilasta. Kapselointilaitoksessa käytetyt polttoainesauvaniput siirretään metallisiin kapseleihin, jotka täytetään argonkaasulla ja suljetaan tiiviisti. Kapselin kansi hitsataan kiinni ja hitsausauma tarkastetaan vielä esimerkiksi röntgensäteilyn avulla. Tämän jälkeen kapselit siirretään loppusijoitustunneleihin, joiden kokonaispituus on noin 42 km. Tunneleiden lattiaan porataan 6–8 m syvyisiä reikiä, joihin kapselit sijoitetaan ja jotka täytetään betonisavella. Lopuksi loppusijoitustunneli, johon kapseleita on sijoitettu, täytetään savilohkoilla. Loppusijoitus on määrä aloittaa 2020-luvulla. (Posiva)

SMR-tekniikan käyttöönotto edellyttäisi muutoksia Suomen ydinjätejärjestelmään ja mahdollisesti myös lainsäädäntöön. Suomessa ydinjätteen tuottajalla on vastuu tuottamiensa ydinjätteiden turvallisesta käsittelystä. SMR:ien jätehuoltoon olisi kehitettävä uudenlaisia toimintamalleja, jos voimalaitoksia sijoitetaan hajautetusti tai jos reaktorin omistaa muu pienempi taho kuin nykyisten ydinvoimaloiden omistajat. Ei olisi järkevää, että jokaisella SMR:llä olisi oma ydinjätehuoltonsa, vaan tulisi kehittää keskitetty järjestelmä. Suomeen pitäisi rakentaa erillinen moduulien käsittelylaitos, jos otettaisiin käyttöön konsepti, jossa ydinpolttoaine vaihdettaisiin moduuleittain ja jossa laitoksessa ei varastoitaisi tai käsiteltäisi polttoainetta, koska ydinenergialaki kieltää ydinjätteen kuljettamisen Suomen rajojen ulkopuolelle. (Ahonen et al. 2020)

Maailmalla matala- ja keskiaktiivista jätettä on loppusijoitettu 1950-luvulta alkaen, mutta korkea-aktiivisen jätteen loppusijoitusta ei ole vielä aloitettu. Matala- ja keskiaktiivisen jäte loppusijoitetaan joko kallioperään 50–100 m syvyyteen tai betonibunkkeriin maan pintakerrokseen. Lähellä maan pintaa oleva loppusijoitusalue vaatii laitoksen sulkemisen jälkeenkin valvontaa yli sadan vuoden ajan, kun taas kallioperään sijoitettua ydinjätettä ei tarvitse valvoa. Asiantuntijoiden mukaan korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen paras ratkaisu on ydinjätteen loppusijoitus syvälle kallioperään, joka on myös Suomen strategia. Väliaikaisena ratkaisuna voidaan myös säilyttää korkea-aktiivista ydinjätettä maanpäällisissä varastoissa. Tällainen väliaikaisratkaisu kuitenkin vain siirtää loppusijoitusta ja on alttiimpi esimerkiksi terrorismille. (STUK 2015)

4. TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS

SMR:ien todellisia kustannuksia ei vielä tunneta, koska niiden tuotanto on vasta alkuvaiheessa, eikä esimerkiksi sarjatuotantoa ole aloitettu. Kustannuksista voidaan kuitenkin tehdä erilaisia arvioita, jotka pohjautuvat muun muassa nykyisten ydinvoimaloiden kustannuksiin. Kustannuksia laskevin tekijöinä voidaan pitää mahdollista sarjatuotanto ja passiivisia turvajärjestelmiä. Ydinvoimaloilla on muihin energiantuotantolaitoksiin verrattuna pitkä käyttöikä, usein noin 60 vuotta, mikä osaltaan laskee ydinenergian hintaa, vaikka investointikustannukset ovat korkeat.

4.1 Kustannusrakenne

NEA:n (Nuclear Energy Agency) ja OECD:n (Organisation for Economic Co-operation and Development) mukaan, kuten perinteisissä ydinvoimaloissa, SMR:issä kustannukset syntyvät investointi-, käyttö-, ylläpito- sekä polttoainekustannuksista. Investointikustannukset syntyvät suunnittelusta, hankinnoista ja rakentamisesta sekä omistuskustannuksista, jotka syntyvät enimmäkseen erilaisista luvista, kun taas käyttö- ja ylläpitokustannuksiin liittyy materiaaleista, palkoista ja lisensseistä syntyvät kustannukset. SMR-suunnittelijat väittävät, että SMR:ien kustannukset tuotettua sähkötehoa kohden jäävät alhaisemmiksi kuin perinteisissä ydinvoimaloissa. (NEA & OECD 2016)

NEA:n ja OECD:n mukaan vaihtuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä polttoainekustannukset tehoa kohden todennäköisesti ovat SMR:illä korkeammat kuin perinteisillä kevytvesireaktoreilla. Suurempia polttoainekustannuksia perustellaan sillä, että pienemmän kapasiteetin reaktorissa tehokkuus on huonompi. Kuitenkin voimaloissa, joissa on useampi SMR käyttö- ja ylläpitokustannukset todennäköisesti laskevat verrattuna perinteisiin ydinvoimaloihin, jos niissä voidaan käyttää vähemmän henkilöstöä kuin perinteisissä ydinvoimaloissa. (NEA & OECD 2016) Myös Energy options networkin mukaan monet SMR-yritykset uskovat, että käyttö- ja ylläpitokustannuksia laskevat, koska henkilöstöä tarvitaan vähemmän kuin perinteisissä ydinvoimaloissa (Energy Options Network 2017). Etenkin sarjatuotantona valmistettujen SMR:ien korottomat pääomakustannukset voisivat olla matalammat kuin perinteisillä ydinvoimaloilla, sillä esimerkiksi suunnittelukustannukset jakautuisivat suuremmalle määrälle reaktoreita. Vielä sarjatuotanto ei ole kuitenkaan mahdollista ja korottomat pääomakustannukset voivat nousta SMR:illä

korkeammiksi kuin perinteisillä ydinvoimaloilla. SMR:ien kokonaiskustannukset voivat kuitenkin lyhyemmän rakennusajan ansiosta olla matalammat kuin suuren ydinvoimalan rakennuskustannukset. Lisäksi rahoituksen saaminen pienemmälle laitokselle on luultavasti helpompaa. (NEA & OECD 2016)

SMR-voimalan koon kasvaessa turvajärjestelmä- ja henkilöstökustannukset voivat nousta. Modulaarisuus mahdollistaa kuitenkin edelleen pelkkien passiivisten turvajärjestelmien käytön, kun jokaisella reaktorimoduulilla on omat turvajärjestelmänsä, ja yksittäinen reaktori voidaan ajaa alas sen sijaan, että koko voimalaitos ajettaisiin alas. Energiantuotantoa voitaisiin siten pitää yllä, vaikka jokin reaktoreista jouduttaisiin ajamaan alas, mikä laskee alasajossa syntyviä kustannuksia. Vielä ei ole kuitenkaan selvää vähentävätkö passiiviset turvajärjestelmät henkilöstön määrää ja täten kustannuksia halutulla tavalla.

4.2 Kustannukset sähköntuotannossa

Perinteisellä ydinvoimalla tuotettu sähköenergia on Suomessa maatuulivoiman jälkeen edullisinta. Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tehdyn tutkimuksen mukaan ydinsähkön kustannukset uudelle paikalle rakennettavalla perinteisellä ydinvoimalalla tuotetuna ovat noin 55 €/MWh, kun päästökauppaa ei huomioida ja laskennassa käytetään annuiteettimenetelmää 5 %:n korolla. Kun ydinvoimala rakennetaan olemassa olevalle tontille, kustannukset laskevat ja kustannuksiksi tulee noin 42 €/MWh. (Vakkilainen & Kivistö 2017) SMR-tekniikan osalta Suomessa kiinnostus kohdistuu tällä hetkellä lähinnä kaukolämpöreaktoreihin, mutta jos SMR:t saavuttaisivat perinteistä ydinvoimaa matalamman kustannustason, voisi SMR:illä tuotettu sähkö kiinnostaa myös Suomessa. Yhden suuren ydinvoimalaitoksen sijaan useat pienemmät voimalaitokset muun muassa vakauttaisivat sähköverkkoa, mikä on positiivista myös kustannuskilpailun kannalta.

Vaikka Suomessa ydinvoimalla tuotetulla sähköenergialla kustannukset ovat matalammat kuin useimmilla muilla energiantuotantomuodoilla, esimerkiksi Yhdysvalloissa kaasukombivoimalaitoksella tuotettu sähköenergia on maakaasun matalan hinnan vuoksi edullisempaa. IEA:n (International Energy Agency), OECD:n ja NEA:n selvityksen mukaan vuonna 2015 Yhdysvalloissa ydinvoimalla tuotetun sähköenergian kustannukset olivat noin 65 \$/MWh, kun laskennassa käytetään 5 %:n diskonttokorkoa. Samalla ko-

rolla hiilellä tuotetun energian kustannukset olivat noin 88 \$/MWh ja kaasukombivoimalaitoksella tuotetun energian kustannukset noin 63 \$/MWh. Laskennassa hiilidioksidipäästöjen hintana on käytetty 30 \$/tCO₂. (IEA et al. 2015) Näyttäisi siis siltä, että Yhdysvalloissa kaasu kilpailee kustannuksissa ydinvoiman kanssa. Lisäksi korkotasoa nostettaessa kaasukombivoimalaitoksella tuotetun energian kustannukset eivät nouse merkittävästi, kun taas ydinvoimalla tuotetun energian kustannukset nousevat reilusti, sillä ydinvoimalan investointikustannukset ovat korkeat.

Energy options networkin selvityksen mukaan SMR:ien keskimääräiset sähkötuotantokustannukset ovat noin 60 \$/MWh ja kustannukset vaihtelevat 30 \$/MWh ja 90 \$/MWh välillä. Perinteisillä PWR:illä kustannukset ovat selvityksen mukaan keskimäärin noin 97 \$/MWh. SMR:ien arvioidut pääomakustannukset ovat kesimäärin noin 3800 \$/kW, kun taas perinteisellä PWR:illä pääomakustannukset ovat noin 6800 \$/kW. Tutkimuksessa käytetyt kustannusarviot ovat kahdeksan SMR-yrityksen ilmoittamia kustannusarvioita ja käytetty diskonttokorko on 7 %. Yrityksistä viisi on kehittänyt sulasuolareaktoreita ja vain yksi, NuScale, kevytvesireaktoria. (Energy Options Network 2017) NuScalen tavoite ensimmäisen valmistuvan laitoksen kustannuksiksi on 65 \$/MWh (Patel 2018). Luvut ovat kuitenkin vasta arvioita, eikä niiden perusteella voida arvioida kannattavuutta.

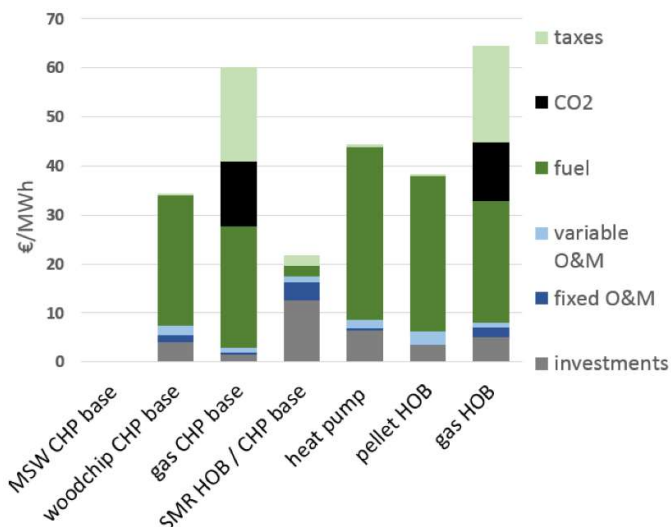
Nian ja Zhongin artikkelissa vertaillaan kahden SMR:n, venäläisen KLT-40S- ja kiinalaisen HTR-PM-reaktorin, kustannuksia kahden perinteisen PWR-voimalaitostyyppin, kiinalaisen Hualong One ja venäläisen VVER-1200, kustannuksiin. Hualong One on sähkötehoaltaan 1000 MW:n reaktori ja VVER-1200 1200 MW:n reaktori. KLT-40S on tyypiltään kelluva PWR ja sähkötehoaltaan 35 MW ja HTR-PM kaasujäähdytteinen korkean lämpötilan reaktori, jonka sähköteho on 210 MW. KLT-40S-reaktorin pääomakustannukset sähkötehoon suhteutettuna ovat 3314 \$/kW ja kustannukset tuotettavalle energialle noin 55 \$/MWh, kun diskonttokorko on 7 % ja reaktori toimii täydellä kapasiteetilla. HTR-PM reaktorille vastaavat kustannukset ovat 3270 \$/kW ja noin 50 \$/MWh. Hualong One -reaktorin kustannukset ovat 3500 \$/kW ja noin 55 \$/MWh, kun taas VVER-1200-reaktorilla kustannukset ovat huomattavasti matalammat 2100 \$/kW ja noin 35 \$/MWh. Artikkelissa SMR:ien kustannukset ovat ensimmäisille rakennetuille reaktoreille. Jos samanlaisia SMR:iä rakennetaan lisää, voidaan kustannusten odottaa laskevan. (Nian & Zhong 2020) On huomioitava, että eri valtioiden kustannukset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, johtuen erilaisista hintatasoista. Näyttäisi kuitenkin siltä, että korkeanlämpötilan kaasujäähdytteiset SMR:t voisivat jo kilpailla perinteisen ydinvoiman kanssa toisin kuin PWR-tyypin SMR:t. On huomioitava myös, että KLT-40S on tyypiltään

kelluva ydinreaktori, eikä siis täysin verrattavissa maalle rakennettavaan painevesi-SMR:ään.

4.3 Kustannukset kaukolämmöntuotannossa ja CHP-tuotannossa

Kaukolämmöntuotannossa voidaan käyttää yksinkertaisempia ja halvempia reaktoreita kuin sähköntuotantoon, sillä kaukolämmöntuotannossa lämpötilat ovat alhaisempia eikä korkeaa painetta tarvita (Partanen 2019). Sen lisäksi, että erillisillä reaktoreilla voidaan tuottaa joko sähköä tai kaukolämpöä, voidaan yhdellä reaktorilla tuottaa molempia. Yhdistetyn kaukolämpö- ja sähköntuotantolaitoksille eli CHP-voimaloille (combined heat and power) voidaan laskea erikseen arvioidut kustannukset kaukolämmölle ja sähkölle. (Värrä & Syri 2019)

Kuvassa 10 on arviot kaukolämpöenergian hinnalle pääkaupunkiseudulla vuonna 2030, kun energia tuotetaan CHP-tuotantona yhdyskuntajätteestä, puuhakkeesta, kaasusta ja SMR-tekniikalla, lämpöpumpuilla sekä kaukolämpönä polttamalla pellettiä ja kaasua. Arviossa ei ole kustannuksia kivihieillä tuotetulle energialle, sillä Helsingin kaupungin on päättänyt luopua kivihieiden käytöstä kaukolämmöntuotannossa vuonna 2029. Arviossa kustannukset koostuvat investointikustannuksista, kiinteistä ja muuttuvista käyttö- ja kunnossapitokustannuksista, polttoainekustannuksista, hiilidioksidipäästökustannuksista sekä veroista voimalaitoksen elinkaaren aikana. Muiden voimalaitosten lämpöteho on määritetty 300 MW, mutta lämpöpumppulaitoksen lämpöteho on 20 MW. SMR:illä tuotetulle lämpöenergiolle on saatu kustannuksiksi hieman yli 20 €/MWh, kun yhdyskuntajätettä lukuun ottamatta muilla tavoilla tuotettu energia on vähintään 10 €/MWh kalliimpaa kuin SMR:illä tuotettu. Yhdyskuntajätteellä tuotetun energian kustannukset ovat noin 0 €/kWh, sillä polttoaineen hinta on negatiivinen. Kuvasta 10 nähdään, että SMR:illä investointikustannukset sekä kiinteät ylläpito- ja huoltokustannukset ovat korkeimmat, kun taas polttoainekustannukset ovat matalimmat, kun yhdyskuntajätettä ei huomioida. Artikkelissa SMR:n kustannukset on arvioitu NuScale-reaktorille ja lämpöpumppujen lämmönlähteenä käytetään esimerkiksi kaukolämmön jätelämpöä ja datakeskusten jäähdytystä. (Värrä & Syri 2019)



Kuva 10. Arvioidut kustannukset lämpöenergialle eri kaukolämmön- ja yhteistuotannon muodoilla (Värri & Syri 2019)

Artikkelin mukaan arvioidut sähköenergian tuotantokustannukset SMR:illä ovat noin 55 €/MWh, kun sähkö tuotetaan CHP-laitoksessa, jonka sähköteho on 90 MW. Kustannukset ovat noin 50 €/MWh korkeammat kuin 110 MW:n jätteenpolttolaitoksella ja noin 20 €/MWh matalammat kuin maakaasua polttoaineena käytävällä CHP-laitoksella. Tuulivoiman arvioidut kustannukset ovat noin 45-50 €/MWh, kun merituulivoimalan sähkötehoksi on määritetty 12 MW on maatuulivoimalan 4 MW. Hakesähkön kustannukset ovat arvion mukaan noin 10 €/MWh suuremmat ja kaasusähkön kustannukset noin 20 €/MWh suuremmat kuin SMR:illä, kun hakelämpölaitoksen sähköteho on 145 MW ja kaasulaitoksen 391 MW. (Värri & Syri 2019) On huomioitava, että olosuhteiden mukaan vaihteleva tuulivoima ja tasainen ydinvoima ovat luonteeltaan hyvin erilaiset sähköntuotantomuodot. Tuulivoima vaatii rinnalleen muun muassa säätövoimaa, mikä saattaa nostaa tuulisähkön kustannuksiin.

Värri ja Syrin artikkelin perusteella näyttäisi siis siltä, että SMR-teknologia voisi olla kilpailukykyinen etenkin kaukolämmöntuotannossa. Yhdyskuntajätteellä tuotetun lämpöenergian kokonaiskustannukset näyttäisivät olevan olemattomat, mutta on huomioitavaa, että sen kapasiteetti on hyvin rajallinen, etenkin kun pyrkimyksenä tulisi olla kiertotalouden edistäminen ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Etenkin Suomessa pyrkimys vähähiiliseen energiantuotantoon nostanee maakaasulla, hiilellä ja turpeella tuotetun energian hintoja, mikä edesauttaa SMR-teknologian kilpailukykyä.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

SMR-tekniikan turvallinen käyttö perustuu samoihin menetelmiin kuin perinteisessä ydinvoimatekniikassa. Pienen koon ja modulaarisuuden ansiosta SMR:ssä voidaan kuitenkin hyödyntää suuremmissa määrin passiivisia turvallisuusmenetelmiä, jotka pienentävät muun muassa voimalan henkilöstön määrää ja tarvittavan turvavyöhykkeen kokoa.

Keskeisimmät turvamekanismit SMR:ssä ovat reaktorin suojakuori, joka estää radioaktiivisensäteilyn ympäristöön, jälkilämmönpoistojärjestelmät, lisävedenruiskutusjärjestelmät sekä onnettomuustilanteidenhallintajärjestelmät. Onnettomuustilanteidenhallintajärjestelmien tarkoituksena on rajata onnettomuus tilanteessa, jossa lämmönpoisto- ja ruiskutusjärjestelmät eivät ole estäneet onnettomuutta. Jokaisessa reaktorityypeissä on koottu turvajärjestelmä, jolla pystytään turvaamaan voimalaitoksen turvallinen käyttö. Useissa suunnitelluissa SMR:ssä hyödynnetään passiivisia turvamekanismeja, jotka perustuvat esimerkiksi veden luonnolliseen kiertoon tai paine-eroihin, eivätkä vaadi aktiivista käynnistystä tai pumppausta toimiakseen.

Ydinjätteen loppusijoitus tapahtuu pääosin samoilla periaatteilla, kuin perinteisen ydinvoiman kohdalla. SMR-tekniikan kehittämisen eräänä tavoitteena on kuitenkin hajauttaa ydinvoimaloita nykyistä laajemmalle alueelle ja useimmille toimijoille, mikä muuttaa toimintamalleja ydinjätehuollossa. Esimerkiksi keskitetty ydinjätehuolto voisi olla tehokkaampi ja edullisempi ratkaisumalli vaihtoehtona jokaisen SMR-laitoksen omalle ydinjätteenkäsittelylaitokselle. Uudet toimintamallit voivat puolestaan tuoda muutoksia lainsäädäntöön.

SMR:ien todellisista kustannuksista ei pystytä vielä arvioimaan, sillä reaktoreita ei juuriakaan ole käytössä. Näyttäisi kuitenkin siltä, että SMR-tekniikasta voisi tulla kilpailukykyinen niin sähkön- kuin kaukolämmöntuotannossa etenkin sarjatuotannon ansiosta, mutta selkeää näyttöä ei vielä ole. Muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna SMR:ien etuna on perinteisen ydinvoiman tavoin voimalaitoksen pitkä käyttöikä ja usein halpa polttoaine. Kuten perinteisillä ydinvoimaloilla, myös SMR:illä investointikustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin muilla voimalaitoksilla.

Kun SMR-tekniikkaa verrataan perinteiseen ydinvoimaan, SMR:ien taloudellisina etuina nähdään mahdollisuus sarjatuotantoon, lyhyemmät rakennusajat ja vähäisempi henkilöstön määrä voimalaitoksessa. Polttoainekustannukset todennäköisesti nousevat SMR:illä korkeammiksi kuin perinteisillä ydinvoimaloilla, mutta polttoainekustannusten

merkitys kokonaiskustannusten kannalta on huomattavasti pienempi kuin investointikustannusten. Kiinalainen korkeanlämpötilan kaasujäähdytteinen HTR-PM- reaktorin noin 50 \$/MWh:n kokonaisenergiakustannukset näyttäisivät jäävän perinteisen Hualong One -PWR:n energiakustannuksia alhaisemmiksi. Venäläisen kelluvan KLT-40S reaktorin noin 55 \$/MWh:n energiakustannukset puolestaan ovat huomattavasti korkeammat kuin perinteisen VVER-1200 reaktorin kustannukset. PWR-tyyppin SMR ei siis ainakaan vielä kilpaile kustannuksissa samalla tasolla kuin perinteiset PWR:t

LÄHTEET

Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N., & Tuomainen, M. (2020). Edellytykset pienreaktorien turvalliselle käytölle - lupajärjestelmän ja valvonnan kehitysnäkymät, 26 s. Saatavissa: www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/139152/Edellytykset_pienreaktorien_turvalliselle_kaytolle.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carelli, M.D., Conway, L.E., Oriani, L., Petrović, B., Lombardi, C.V., Ricotti, M.E., Barroso, A.C.O., Collado, J.M., Cinotti, L., Todreas, N.E., Grgić, D., Moraes, M.M., Borroughs, R.D., Ninokata, H., Ingersoll, D.T. & Oriolo, F. (2004). The design and safety features of the IRIS reactor, Nuclear engineering and design, Vol. 230, pp. 151-167.

Energy Options Network. (2017). What Will Advanced Nuclear Power Plants Cost? A Standardized Cost Analysis of Advanced Nuclear Technologies in Commercial Development, 43 p. Saatavissa: <https://www.innovationreform.org/wp-content/uploads/2018/01/Advanced-Nuclear-Reactors-Cost-Study.pdf>

Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen, M., Sandberg, J. & Sjöblom, K. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita, 87 s. Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf/74b3643c-419f-4381-89ff-423e406f98b1

IAEA (2016). Design safety considerations for water cooled small modular reactors incorporating lessons learned from the Fukushima Daiichi accident, IAEA-TECDOC-1785 Vienna, 152 p.

IEA (2019). Global Energy & CO2 Status Report 2019, Paris, Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>

IEA, OECD & NEA (2015). Projected Costs of Generating Electricity, OECD Publishing, Paris, 211 p.

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

Ingersoll, D.T. (2016). Small modular reactors: nuclear power fad or future? Woodhead Publishing, Amsterdam. 184 p.

Khattak, M., Kasmani, R., Mahadi, Z., Miftah, N., Hor, T., Jamaluddin, K., Faiz, M., Noorizab, F., Amhmad, A., Omran, B. & Najah, A. (2017). A review of safety features of Small Modular Reactor (SMR): Malaysian nuclear program perspective. 17 p.

Mäkelä, L. (2019). SMR (small modular reactors) -selvitys. 72 s.

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

Nian, V. & Zhong, S. (2020). Economic feasibility of flexible energy productions by small modular reactors from the perspective of integrated planning, Progress in Nuclear Energy, Vol. 118, 103106.

Partanen, R. (2019). Nuclear District Heating in Finland, Think Atom, Helsinki, 84 p. Saatavissa: https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2019/04/nuclear-district-heating-in-finland_1-2_web.pdf

Patel, S. (2018). NuScale poised to submit nation's first-ever SMR design certification application to NRC, Saatavissa: <https://www.powermag.com/nuscale-poised-to-submit-nations-first-ever-smr-design-certification-application-to-nrc/>

Posiva, Loppusijoitus, Saatavissa (Viitattu: 2.4.2020):
<http://www.posiva.fi/loppusijoitus#.XrA98m5uI25>

STUK (2015). Ydinjätteet ja niistä huolehtiminen maailmalla, Saatavissa (Viitattu 2.4.2020): <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/ydinjatteet-ja-niista-huolehtiminen-maailmalla>

STUK (2019a). Katsaus SMR-teknologiaan ja sen luvittamiseen Suomessa, Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/319501/1882563-YTN_SMR-aloite.pdf/566b1bfb-7500-0cff-ba34-b2ce2fa9478d?t=1575373387656

STUK (2019b). Loppusijoituksen turvallisuus, Saatavissa (Viitattu 19.3.2020):
<https://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/loppusijoituksen-turvallisuus>

Vakkilainen, E. & Kivistö, A. (2017). Sähkön tuotantokustannusvertailu, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 26 s. Saatavissa: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/Sähkön%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/S%C3%A4hk%C3%B6n%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Värri, K., & Syri, S. (2019). The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating: Case Helsinki Region, *Energies*, Vol. 12, 2195.