

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pienet kaukolämmitysreaktorit

Small district heating reactors

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenranta 25.03.2019

Tomi Rahkonen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Tomi Rahkonen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2019

33 sivua, 10 kuvaa

Hakusanat: kaukolämpö, kaukolämmitysreaktori, ydinenergia, ydinreaktori, SMR

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli saada käsitys siitä, onko ydinreaktoreita mahdollista ja järkevää käyttää kaukolämmityksessä, saada käsitys teknologian nykytasosta sekä verrata eroja perinteiseen ydinvoimalaan. Työssä käytiin myös läpi ydinkaukolämmön historia ja esiteltiin aikaisempia suunnitelmia sen toteuttamiseksi suuressa mittakaavassa.

Pienten kaukolämmitysreaktorien suurin ero perinteisiin ydinvoimaloihin nähden on niiden pieni koko sekä matalammat käyttölämpötilat ja -paineet. Tämän ansiosta myös turvallisuusjärjestelmät voidaan suunnitella yksinkertaisemmiksi, passiivisiksi järjestelmiksi. Näin laitoksen turvallisuus ongelmatilanteessa ei riipu mekaanisen laitteen toiminnasta tai käyttöhenkilön päätöksestä.

Kaukolämmityksessä pääasiallisesti käytetyt polttoaineet ovat tällä hetkellä kivihiili ja maakaasu. Etenkin Kiinassa, joka omaa maailman suurimman kaukolämpöverkon, tämä tuottaa merkittäviä ympäristöllisiä ongelmia esimerkiksi ilmanlaadulle. Ilmastomuutoksen kiihtyessä ja ilmastopöytäkirjojen ansiosta myös lämmitykselle on alettu etsiä ekologisempaa vaihtoehtoa. Ydinkaukolämmön suurin ongelma on tällä hetkellä lainsäädäntö, sillä ydinvoimaa koskevaa lupapolitiikkaa ei olla laadittu ydinkaukolämpöä ajatellen. Ydinkaukolämpö on yksi potentiaalisimmista vaihtoehdoista kaukolämmityksen tuotantoon tulevaisuudessa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo	3
1 Johdanto	5
2 Kaukolämmitys	6
2.1 Yleiset vaatimukset.....	7
2.2 Ydinreaktorin soveltuvuus kaukolämmitykseen.....	8
3 Ydinkaukolämmön historia	9
3.1 Suomi.....	9
3.1 Ruotsi.....	12
3.1 Kiina.....	13
3.1 Venäjä.....	14
4 Kaukolämmön tuotantoon soveltuvat pienet reaktorit	16
4.1 NuScale.....	17
4.2 SECURE.....	19
4.3 NHR.....	21
4.1 DPR.....	22
5 Potentiaali	24
5.1 Suomi.....	24
5.2 Kiina.....	27
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	29
Lähdeluettelo	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

t Lämpö

e Sähkö

Lyhenteet

SMR Pieni modulaarinen ydinreaktori

DH Kaukolämmön erillistuotanto

DPR Deep Pool Reactor

CHP Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

EPR European Pressurized water Reactor

PWR Painevesireaktori

1 JOHDANTO

Pariisin ilmastopöytäkirja sekä EU:n ilmasto- ja energiavoitteet antavat selkeän viestin siitä, että maailma on siirtymässä kohti päästötöntä tulevaisuutta ja näin myös energiantuotantoa. Energiantuotannolla on erittäin keskeinen rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa, sillä energian- ja sähköntuotanto kattaa tällä hetkellä noin 25 % maailman vuosittaisista kasvihuonepäästöistä (IPCC 2014, 62). Sähkön- ja lämmöntuotannossa yksi potentiaalisimmista korvaajista fossiilille polttoaineille lähitulevaisuudessa on ydinvoima. Aurinko- ja tuulivoiman tapaan ydinvoiman tuotanto itsessään on lähes päästötöntä, mutta ydinvoiman tuotantoturvallisuus on nykyteknologialla merkittävästi korkeampi, sillä se ei ole sidonnainen esimerkiksi vuorokaudenaikaan ja vuodenaikaan.

Ydinvoiman hyödyntäminen painottuu vielä lähes täysin sähköntuotantoon, vaikka joitakin kokeellisia yksiköitä lämmöntuotannossa on jo testattu. Tällä hetkellä toiminnassa olevasta 438 ydinreaktorista 277 on painevesireaktoreita. Painevesireaktorin termien hyötysuhde on vain 33 %, minkä vuoksi suurin osa ydinpolttoaineen lämpöenergiasta jätetään hyödyntämättä. Painevesireaktori voidaan jo nykyteknologialla muuntaa sähkön- ja lämmön yhteistuotantoon vaarantamatta reaktorin turvallisuutta. Tämänkaltaisen yhteistuotantoreaktorin termien hyötysuhde voitaisiin nostaa jopa 66 %:iin, mikä parantaisi energiatehokkuutta vähintään 50 %. (Leurent et al. 2017)

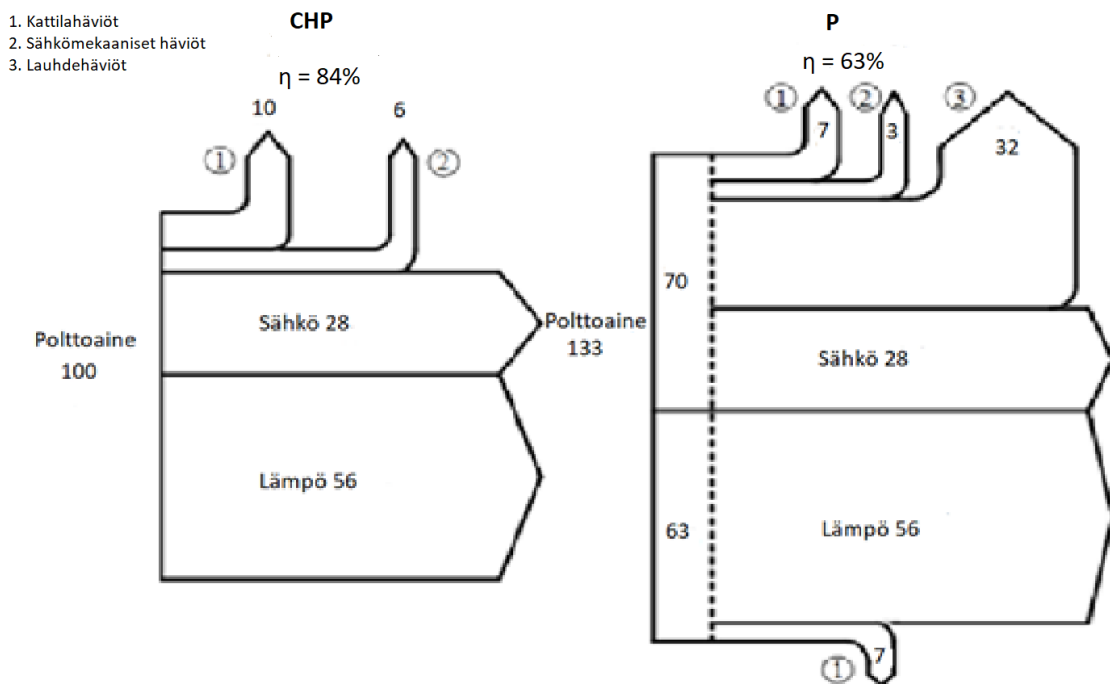
Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan ydinreaktorin soveltuvuutta kaukolämmitykseen, joko yhteistuotantona sähkön kanssa tai lämmön erillistuotantona. Lisäksi perehdytään tarkemmin pienikokoisiin lämmitykseen soveltuviin reaktoreihin. Työssä käydään läpi muutaman jo olemassaolevan reaktorimallin erityispiirteet, rakenne ja potentiaali.

Työn tavoitteena on saada käsitys siitä, onko ydinreaktoreita mahdollista ja järkevää käyttää kaukolämmityksessä, saada käsitys teknologian nykytasosta sekä verrata eroja perinteiseen ydinvoimalaan

2 KAUKOLÄMMITYS

Kaukolämmitys on suurien asutuskeskittymien kuten kaupunkien lämmöntuotannon ja -jakelun järjestelmä. Kaukolämmitykseen vaadittu lämpöenergia tuotetaan keskitetysti voimalaitoksissa, jonka jälkeen jakelu suoritetaan kaukolämpöverkostolla asiakkaille. Nykyaikainen lämmönjakelu perustuu pääosin kuuman veden käyttöön. Tehokkainta kaukolämmön tuottaminen on yhteistuotantona sähkön kanssa siten, että höyryllä tuotetaan ensin sähkö ja jäljelle jäävällä energialla kaukolämpövesi lämmitetään tarvittavaan lämpötilaan, joka on vuodenajasta ja tarvittavasta tehosta riippuen 70-120 °C (Mäkelä & Tuunanen 2015, 12).

Kaukolämmityksen yksi merkittävimmistä eduista on sen energiatehokkuus. Tämä energiatehokkuus perustuu pitkälti sen tuotannossa laajasti käytettyyn lämmön ja sähkön yhteistuotantoon, jota on noin 75 % vuosittaisesta lämpöenergian tuotannosta. Vuonna 2014 Suomessa tuotettiin 38,3 TWh kaukolämpöä, josta 24,7 TWh tuotettiin yhteistuotantona. Kuvassa 1 on esitettyä tuotannon häviöt ja hyödyksi saatavat energiamäärät CHP-, eli yhteistuotantona, sekä erillistuotantona. (Tilastokeskus, 2017)



Kuva 1. Tuotantohäviöt ja polttoaineesta saatavat energiamäärät CHP- ja erillistuotannossa (Mäkelä ja Tuunanen 2015, 14).

Kaukolämmön tuottamiseen käytetään useita eri polttoaineita riippuen näiden hinnasta ja saatavuudesta. Suomessa näistä yleisimmät vuonna 2017 olivat kivihiili, metsäpolttoaine ja turve. Fossiilisten tuontipolttoaineiden käyttö on laskenut merkittävästi viime vuosina näiden osuuden ollessa enää 35 % tuotetusta kaukolämmöstä vuonna 2017. (Energiateollisuus ry, 2017) Kaukolämmitys on Pohjois- ja Itä-Euroopassa yleisimpiä lämmitysmuotoja. Norjaa lukuunottamatta se on pääasiallinen lämmitysmuoto kaikissa Pohjoismaissa. (Vattenfall, 2018)

2.1 Yleiset vaatimukset

Kaukolämmityksen käyttöönotto vaatii laajan jakeluverkoston, johon kuuluvat siirtoputket, taloputket ja runkoputket. Tämä laaja jakeluverkosto mahdollistaa lämmöntuotannon keskitetysti laajalle alueelle. Jakelun järjestäminen on suurista rakennuskustannuksista johtuen koko kaukolämpöjärjestelmän kallein osuus. Koska kaukolämpöverkosto sijaitsee yleensä asutuskeskusten keskellä, aiheuttavat korjaus- ja kunnossapitotyöt haittoja liikenteelle ja muulle toiminnalle. Kaukolämpöverkoston kannattavuuden takia sen tuleekin kestää käyttökuntoisena vähintään 30-50 vuotta. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 50-52)

Kaukolämmitykselle esteitä asettaa myös välimatka. Suurempi välimatka lisää lämpöhäviöitä ja näin ollen nostaa vaadittavaa menolämpötilaa, sillä kaukaisimpien asiakkaiden kaukolämpöveden on oltava vähintään 65 °C. Toisaalta korkein sallittu menolämpötila on Suomessa 120 °C, joka perustuu painelaitelainsäädäntöön. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 140). Välimatkaa rajoittaa myös jakeluverkoston paine-ero. Verkoston paine-erolle on määriteltävä minimiarvo ja koska verkon rakennepainetta ei voida ylittää, täytyy jakeluverkostoon rakentaa välipumppaamoja, jotta jakeluetäisyyttä voitaisiin kasvattaa. (Viander 2014, 21)

2.2 Ydinreaktorin soveltuvuus kaukolämmitykseen

Ilmastostrategiat ja ilmastopöytäkirjat ovat viime vuosina pakottaneet myös energian- ja lämmöntuotannon siirtymään kohti päästöttömiä polttoaineita. Fossiilisilla tuontipolttoaineilla tuotetun kaukolämmön osuus vuonna 2017 oli enää 35 %, kun se vielä 2005 oli lähes 80 %. Kokonaistuotannosta hiilidioksidineutraaleja polttoaineita oli vuonna 2017 46 %. (Energiateollisuus ry, 2017).

Aikaisemmin polttoaineen valinta kaukolämmön tuottamista varten riippui lähinnä polttoaineen hinnasta, mutta nykyään ympäristönsuojelu on noussut tärkeäksi tekijäksi polttoaineen valinnassa. Yksi potentiaalinen korvaaja fossiilisille polttoaineille kaukolämmössä on ydinpolttoaine. Ydinenergia on lähes päästötön lämpöenergian lähde ja on tämän lisäksi hinnaltaan erittäin kilpailukykyinen muihin vähäpäästöisiin polttoaineisiin nähden, kun tarkastellaan kustannuksia voimalan koko elinkaaren ajalta.

Ydinreaktoreita on tavallisesti käytetty vain sähköntuotantoon, mutta erityisesti SMR-tekniikan kehittyessä ovat pelkästään lämmöntuotantoon soveltuvat ydinreaktorit nousseet potentiaalisiksi vaihtoehdoksi kaukolämmön tuotannossa. Sähköntuotanto järkevällä hyötysuhteella vaatii korkeaa lämpötilaa ja koska useimmissa ydinreaktoreissa höyryn tulistaminen ei ole mahdollista, tarvitaan korkea paine. Korkea paine taas vaatii paksuseinäiset paineastiat, jolloin laitevaatimukset ja investointikustannukset nousevat erittäin suuriksi. Olkiluoto 3-tyyppisessä EPR-reaktorissa teräksen paksuus on noin 25 cm, kun kaukolämpöreaktorissa seinämävahvuudeksi riittäisi muutama sentti. Perinteisten reaktoripaineastioiden valmistus myös kestää vuosia ja koko maailmassa on vain muutamia valmistajia, jotka sellaisen kykenevät valmistamaan. Kaukolämpöreaktorin pienempi paineastia voitaisiin valmistaa halvemmalla ja helpommin, esimerkiksi suomalaisessa konepajassa. Pelkkä kaukolämmön tuotantoon suunniteltu reaktori käyttää selvästi matalampia lämpötiloja, joten myös vaadittu paine jää suhteessa pieneksi. Tämä taas madaltaa vaatimuksia rakenteille sekä laitteistolle. Kaukolämpöreaktorit voidaan siis rakentaa kevyemmiksi ja yksinkertaisemmiksi kuin CHP- tai tavalliset sähköntuotantoon suunnitellut ydinreaktorit. (Tulkki, 2018)

Yksi tavallisten ydinreaktoreiden suurimmista ongelmista sekä sähköntuotannossa että potentiaalisena CHP-voimalana ovat todella suuret investointikustannukset. Pienten kaukolämmitysreaktorien investointikustannukset voidaan joidenkin reaktorityyppien kohdalla saada lähelle vastaavan kokoista hiilivoimalaa (Beijing Review, 2018). Tämä mahdollistaisi useiden voimaloiden rakentamisen hajautetusti alueille, jossa niille on tarvetta. Nämä ovat kuitenkin vasta alustavia laskelmia ja kustannukset voivat vielä merkittävästi muuttua ennen kuin vastaavat reaktorit saadaan markkinoille.

3 YDINKAUKOLÄMMÖN HISTORIA

Muutamissa maissa on jo kehitetty pienikokoisia, pelkän lämmön tuottamiseen suunniteltuja, kaukolämmitysreaktoreita. Nämä pienet reaktorit ovat kooltaan merkittävästi tavallista reaktoria pienempiä, yleensä alle 300 MW ja myös rakenteeltaan yksinkertaisempia. Reaktorin jäähdytteen lämpötila on onnistuttu laskemaan vain vähän yli 100-asteen lämpötilaan, joka puolestaan laskee järjestelmän painetta.

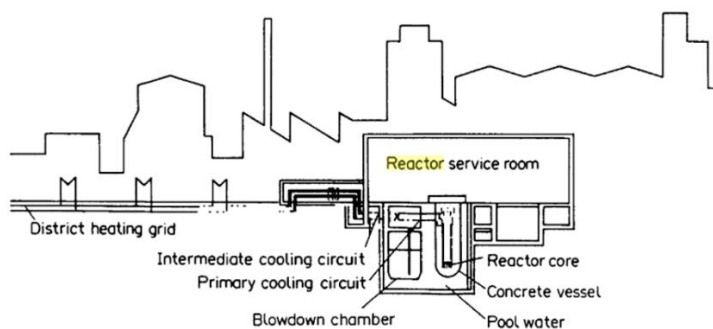
Passiivisten turvallisuusjärjestelmien lisääminen vähentää myös koulutettujen työntekijöiden tarvetta, mikä kustannusten lisäksi vähentää inhimillisten virheiden todennäköisyyttä. (U.S Department of Energy 2001, 12-14)

3.1 Historia Suomessa

Suomessa ydinkaukolämmön mahdollisuuksia alettiin selvittää jo 1970-luvulla Valtion Teknisessä Tutkimuskeskuksessa. Kyseiseen hankkeeseen osallistui VTT:n lisäksi myös useita energiayhtiöitä kuten Imatran voima, nykyisin Fortum, sekä suomalaisia teollisuusyrityksiä. Selvityksen kohteena oli 100 MW:n kaukolämmityslaitos, joka perustui suurilta osin jo olemassa olevaan painevesireaktoriteknologiaan. Erona tällä reaktorilla perinteisiin reaktoreihin oli alhaisempi käyttölämpötila ja -paine. Reaktori suunniteltiin käytettäväksi yli 50 000 asukkaan taajamiin, joissa infrastruktuuri kaukolämmölle oli jo olemassa. Hankkeeseen valikoitui taajamia Porista, Hämeenlinnasta, Lappeenrannasta, Kuopiosta, Vaasasta, Jyväskylästä, Oulusta, Vantaalta, Espoosta, Lahdesta ja Helsingistä. Hankkeen loppuraportissa kaukolämmön tuottaminen ydinenergialla todettiin kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi fossiilisille polttoaineille. Reaktoriin kaupallistamiseen vaadittavan teknologian arvioitiin olevan riittävällä tasolla 1980-luvulle mennessä. (Tarjanne et al. 1974)

Pian VTT:n selvityksen jälkeen pohjoismaiden markkinoille kaavailtiin SECURE (Safe Environmentally Clean Urban REactor) reaktorikonseptia 1976-1977. Hankkeeseen osallistui VTT ja Finnatom sekä ruotsalaiset AB ASEA-Atom ja Ab Atomenergi. Hankkeen tavoitteena oli 200 MW:n kaukolämpöreaktori, jolla tuotettaisiin 95 °C asteista vettä suurten asutuskeskusten kaukolämpöverkkoihin. SECURE eroaa merkittävästi perinteisistä paine- tai kiehutusvesilaitoksista, sillä reaktorin suunnittelun tarkoitus oli kehittää miehittämätön lämpölaitos, joka on immuuni tavanomaisten aseiden hyökkäykselle

ja hyödyntää mahdollisimman paljon passiivisia turvallisuusjärjestelmiä. Tämä mahdollistaa reaktorin sijoituksen aivan asutuskeskusten viereen. Koska lämmönsiirtoa ei voida järjestää yhtä kustannustehokkaasti kuin sähkönsiirtoa pitkillä matkoilla, on tuotannon sijoitus lähelle kulutusta erittäin tärkeää. Tämä asettaa myös laitoksen turvallisuusjärjestelmille lisää vaatimuksia. SECURE:n suunnittelussa pyrittiin välttämään järjestelmiä, jotka ovat riippuvaisia automaatiosta, laitteiden toimintavarmuudesta tai laitetta käyttävien ohjaajien päätöksistä (Lemmetty 2012a). SECURE-laitoksen rakenne on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. SECURE-laitoksen rakenne (Osterwind et al., 1987, 89)

SECURE-konsepti kaatui pitkälti poliittisista syistä. Ydinvoimalaitoksia koskevat viranomaisvaatimukset on laadittu siltä pohjalta, että laitoksen lähiympäristössä ei ole suuria asutuskeskuksia. Luvitus on laadittu enemmänkin aikaisempien laitosten pohjalta, eikä niinkään siksi, ettei laitosta voisi sijoittaa asutuskeskittymän lähelle. Tämän lisäksi ydinvoima ajautui 1980-luvulla poliittisiin ongelmiin mm. onnettomuuksien takia ja hanke aiheutti ymmärrettävästi vastustusta myös paikallisten asukkaiden keskuudessa. Koska mallintaminen ja todennäköisyysanalyysien vakuuttavuus edellyttäisi turvallisuustekniikan ymmärtämistä, rakennettiin reaktorista lasinen demonstraatiomalli, jolla voitiin visuaalisesti esittää laitoksen passiiviset turvatoiminnot. Asea-Atom antoi hankkeesta sitovan tarjouksen Helsingin kaupungille ja Souliin Koreaan, mutta tarjousta ei koskaan hyväksytty ja lopulta SECUREN kehitys- ja myyntityö lopetettiin tilauksien puutteen takia. (Graae 2010, 16-17) Vaikka kaukolämpöreaktoreiden kehitystä ei täysin lopetettu, sen kiinnostus hiipui merkittävästi 1980-luvun jälkeen myös pohjoismaissa, kunnes kiristyneet hiilidioksidin päästövaatimukset ja muut ympäristövaikutukset ovat lisänneet aiheen kiinnostusta.

SECURE:n lisäksi toinen pitkälle kehitetty idea ydinkaukolämmön käytöstä pääkaupunkiseudulla on Fortumin suunnittelema projekti, jossa pääkaupunkiseudun kaukolämmitys hoidettaisiin Loviisa 3:n avulla. Aihetta tutkittiin jo 1980-luvulla, kun Loviisan ydinvoimalan kahta VVER-440-reaktoria rakennettiin, mutta yhteistuotantoa ei silloin koettu käytännölliseksi sillä kyseinen teknologia ei ollut kovin kehittynyttä eikä ilmastonmuutos ollut yhtä suuri tekijä energiamuotojen valinnassa (Bergroth & Nici 2010). Projektin tavoitteena oli kehittää paine- tai kiehumusvesireaktori, jolla tuotettaisiin 800-1300 MW sähköteho ja 1000 MW lämpöteho ollen näin maailman suurin kaukolämpövoimala. (Leurent et al. 2017, 3-4) Projektin tavoitteena oli kattaa 60 % pääkaupunkiseudun vuosittaisesta kaukolämmön kulutuksesta, joka on noin 7 TWh vuodessa. Fortumin kaukolämpöverkko kattaa tästä vain noin 2.5 TWh, joten onnistuakseen projekti tarvitsisi laajaa yhteistyötä muiden alueen energiayhtiöiden kanssa. Asiaa vaikeuttaa entisestään se, että HELEN ja Vantaan energia ovat kaupungin omistuksessa ja projekti tarvitsisi tuen ja hyväksynnän kyseisiltä kaupungeilta. (Leurent et al. 2017, 4-5)

Ydinenergia on politiikassa hyvin mielipiteitä jakava aihe, joten vaikka projekti on hyvinkin lupaava, ei sen hyväksyminen kaupungin taholta ole taattu. Tämän lisäksi Loviisa 3:n projektissa oli suuria käytännön ongelmia: Kuvassa 3 näkyvän jakeluverkon rakentaminen Loviisasta Helsinkiin vaatii suuria investointeja. Ydinkaukolämmön takaisinmaksuaika on pitkä ja koska ydinkaukolämpö ei ole vielä ollut laajassa käytössä Venäjää lukuunottamatta, nostaa se päättäjien ja rahoittajien silmissä projektin riskiä. Loviisa 3:n kaukolämpöprojekti on siis monelta osin lupaava, mutta se eteni vain suunnittelun ja ideoinnin tasolle. Projekti kaatui lopullisesti, kun rakentamispäätöksen vaatimaa periaatepäätöstä Loviisa3-reaktorille ei hyväksytty eduskunnassa.



Kuva 3. Suunniteltu reitti lämmönsiirrolle Loviisasta Helsinkiin, 80 kilometriä (Tuomisto, 2013)

3.2 Ruotsi

Ruotsin ensimmäinen kaupallinen ydinvoimala oli Ågesta lähellä Tukholmaa, joka valmistui 1962. Voimalan reaktorina toiminut raskasvesireaktori R1 oli myös ensimmäinen lämmön ja sähkön yhteistuotantoon soveltuva reaktori ja se oli toiminnassa vuodesta 1964 vuoteen 1974. Turvallisuussyistä laitos rakennettiin kallioluolaan 25 metriä maan alle. Laitoksen pääasiallinen tehtävä oli tuottaa lämpöä kaukolämmitykseen Tukholmaan, jota se tuotti 68 MW teholla, jonka lisäksi se tuotti myös 12 MW sähköä. (Rüdiger 2009, 120-123)

Reaktorin käyttölämpötila oli yli 200 °C joka on korkea verrattaessa nykyaikaisiin kaukolämpöreaktoreihin mutta silti merkittävästi matalampi nykyisiin kevytvesireaktoreihin. Tämä johtui siitä, että laitos suunniteltiin alunperin CHP-tuotantoon. Ågestan reaktori tuotti 78-115 °C vettä kaukolämmitykseen ja paluuveden lämpötila oli noin 55-60 °C (Sandstöm 1966, s. 24).

Ågesta oli ensimmäinen suuren mittakaavan kokeilu ydinlämmön käyttämisestä kaukolämmitykseen. Projekti ei menestynyt kaupallisesti, sillä sen alkuperäinen budjetti nousi lopulta moninkertaiseksi. Se kuitenkin todisti, että ydinvoiman käyttäminen kaukolämmön tuottamiseen sekä sen liittäminen kaukolämpöverkkoon on mahdollista.

3.3 Kiina

Kiina on ollut jo kauan edelläkävijä kaukolämmitysreaktoreiden kehityksessä. Ydinenergian lämmityskäyttöä on tutkittu Kiinassa jo 1980-luvulta lähtien ja ensimmäinen kiinteistöjen lämmitykseen käytettävä ydinreaktori aloitti toimintansa Pekingissä vuonna 1989. Institute of Nuclear Energy Technology (INET) kehitti Tsinghuan yliopistossa kokeellisen viiden megawatin NHR-5 reaktorin, josta tuli myös ensimmäinen toiminnassa oleva pelkästään lämpöä tuottava reaktori. (Dafang Z. et al. 1997.)

Reaktoria käytettiin onnistuneesti lämmitykseen usean vuoden ajan, samalla testaten sen passiivisia turvallisuusjärjestelmiä simuloitujen häiriötilanteiden avulla. NHR-5 saavutti onnistuneiden testien jälkeen viranomaisten ja useiden kaupunkien kiinnostuksen Kiinassa, minkä johdosta INET aloitti samankaltaisen 200 MW:n NHR-200 kehittämisen markkinoille. Sekä NHR-5 ja NHR-200 ovat kevytvesireaktoreita ja molemmissa pääasiallinen jäähdytys on toteutettu passiivisesti luonnonkierrolla. Ensimmäisen NHR-200

II-laitoksen rakentamista varten aloitettiin alustavat suunnitelmat helmikuussa 2018 Tsinghuan yliopistossa (World Nuclear Association, 2019a).

NHR-reaktoreiden ohella samoihin aikoihin alettiin Kiinassa kehittää myös kilpailevaa DPR-reaktoria, joka on suunniteltu tarjoamaan lämpöä 90 °C asteessa 200 000 ihmiselle. Tässä reaktorissa lämpö tuotetaan hydrostaattisen paineen avulla, sijoittamalla reaktori altaaseen 25 metriä vedenpinnan alapuolelle. DPR-tyypin reaktoria voidaan kuvata perinteisemmäksi versioksi SECURE-reaktorista, sillä jälkilämmönpoisto suoritetaan molemmissa passiivisen luonnonkierron avulla, mutta DPR-reaktoreissa virtausmekaniikkaan perustuva järjestelmä on korvattu yksinkertaisella jäähdytyskierrolla ja tehon säätämiseen käytetään säätösauvoja. Kuten SECURE, myös DPR on suunniteltu upotettavaksi maanalaiseen kallioluolaan. (Tian 2000, 271-276)

Suunnittelun tuloksena on 400 megawatin DHR-400, jonka suunnittelu valmistui syyskuussa 2018. Tämä allastyypinen reaktori tunnetaan myös nimellä Yanlong. Reaktori on suunniteltu erittäin turvalliseksi, sillä lämpötila koko prosessissa on saatu äärimmäisen matalaksi ja reaktori on upotettu altaaseen, joka on täytetty 1800 tonnilla vettä. DHR-400 reaktorin hinnaksi arvioidaan 226 miljoonaa dollaria ja sen rakentamisen on suunniteltu kestävän vain 3 vuotta ja se voidaan kytkeä suoraan jo olemassa olevaan kaukolämpöverkkoon. Reaktorin rakennuskustannukset tulisivat olemaan noin 2-3 kertaa suuremmat, kuin Pohjois-Kiinassa tällä hetkellä paljon käytetyillä hiililaitoksilla, mutta ydinvoimaloiden käyttöiän ollessa 60 vuotta ovat kokonaiskustannukset pienemmät. Reaktorin prototyypillä suoritettiin 168 tuntia kestävä koeajo onnistuneesti 2017. Yhden reaktorin on tarkoitus lämmittää 200 000 asuntoa ja tuotannon odotetaan olevan hinnaltaan kilpailukykyinen kivihiilen kanssa ja halvempaa kuin maakaasun polttaminen. Vastaava määrä lämpöenergiaa tuotettuna maakaasulla tuottaisi 204 600 tonnia enemmän hiilidioksidipäästöjä vuosittain. Yanlongille odotetaan rakennuslupaa vuoden 2019 alussa, jolloin reaktori voisi olla markkinoilla jo 2020-luvulla. (Beijing Review, 2018)

3.4 Venäjä

Neuvostoliitossa aloitettiin 1970-luvun lopulla pelkän lämmön tuotantoon tarkoitettun matalan lämpötilan reaktorin AST-500:n suunnittelu. Laitoksen tarkoituksena oli korvata kalliit fossiiliset polttoaineet suurten kaupunkien lämmityksessä ja se suunniteltiin tuottamaan 150 °C asteista vettä kaukolämmitykseen. Suunnittelun lähtökohta oli luoda

pienelle eristetylle alueelle mahdollisimman turvallinen ydinlämmityslaitos, joka ei olisi yhtä riippuvainen raakaveden saannista kuin perinteiset voimalat. Kyseinen reaktori mahdollistaisi rakentamisen lähelle tiheästi asuttua aluetta ja yksinkertaisi lämmönjakelua, kun taas matala lämpötila yksinkertaistaisi itse reaktorin rakennetta ja laskisi näin investoinnin hintaa. AST-500 on perinteinen painevesireaktori, jonka jäähtytys on toteutettu luonnonkierrolla, joka toimii ilman ulkoista virtalähdettä usean päivän ajan. AST-500:n koko reaktori on sijoitettu paineastiaan, jota ympäröi vesiallas. Tämä rakenne suunniteltiin estämään reaktorin sulaminen onnettomuuksissa allasveden ympäröidessä reaktoria, jonka lisäksi veteen lisätty boori pysäyttäisi tarvittaessa ketjureaktion. Radioaktiiviset reaktiotuotteet kerääntyvät paineastiaan huoltojen välillä. Kahden AST-500 ydinkaukolämpölaitoksen rakentaminen aloitettiin Voronetsin ja Gorkyn kaupungeissa 1980-luvun alussa, IAEA tarkasti ensimmäiseksi rakennettavan AST-500:n ja totesi sen turvalliseksi. Vuonna 1990 reaktoreiden rakentaminen kuitenkin lopetettiin Tsernobylin onnettomuutta seuranneiden poliittisten ongelmien vuoksi, vaikka ensimmäinen laitos oli jo lähes valmistunut. Laitoksen rakentamista jatkettiin kuitenkin 1996 lämmitysongelmien aiheuttaman painostuksen ansiosta, mutta lopulta AST-500 reaktoreita ei kuitenkaan koskaan otettu käyttöön (Samoilov & Kurachenkov, 1997)

Vaikka puhdasta kaukolämmitysreaktoria ei Venäjällä koskaan saatu käyttöön, on lämmön ja sähkön yhteistuotannolla maassa pitkä historia. Bilibinossa sijaitseva maailman pohjoisin ydinvoimala on vuodesta 1974 lähtien tuottanut kaukolämpöä ja sähköä yhteistuotantona. Laitoksen 4 reaktoria tuottavat vain 48 MW:n tehon, joka tekee Bilibinosta myös teholtaan maailman pienimmän ydinvoimalan. Vuonna 2021 Bilibinon tulee korvamaan Venäjän ensimmäinen kelluva ydinvoimalaitos Akademik Lomonosov. Bilibinon lisäksi Venäjällä on useita muita CHP-reaktoreita, joiden tuottama lämpöenergia yhteensä on 11PJ/vuosi joka vastaa noin 350 MW:n voimalaa. Rakenteilla olevista reaktoreista muutama on myös tarkoitettu lämmön ja sähkön yhteistuotantoon, kuten 2022 käyttöön otettava Leningrad II, joka tulee lähes tuplaamaan ydinennergialla tuotetun lämmön Venäjällä sekä 2030 mennessä käyttöön otettava 1200MW:n Seversk AES-2006. (World Nuclear Association 2018b)

4 KAUKOLÄMMÖN TUOTANTOON SOVELTUVAT PIENET REAKTORIT

Pienreaktoreiden sekä etenkin lämmitykseen soveltuvien kaukolämmitysreaktoreiden turvallisuusjärjestelmät voidaan tehdä matalampien käyttölämpötilojen ja -paineiden ansiosta yksinkertaisemmiksi, perustuen lähinnä passiivisiin turvallisuusjärjestelmiin. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että tärkein turvallisuuteen vaikuttava tekijä, reaktorin jäähdytys häiriötilanteessa, on pienissä reaktoreissa merkittävästi helpompi toteuttaa, sillä niissä on suhteellisen pieni teho tilaan nähden. Aktiiviset turvallisuusjärjestelmät, joita käytetään perinteisissä ydinreaktoreissa, on luotu suorittamaan toiminto saatuaan poikkeustilanteessa komennon operaattorilta tai vaihtoehtoisesti automaattiselta hälytysjärjestelmältä, ne myös usein tarvitsevat ihmistä ohjaamaan toimintoja. Nämä järjestelmät ovat yleensä monimutkaisia ja sisältävät useita eri vaiheita lisäten häiriöiden todennäköisyyttä. pienreaktoreissa voidaan hyödyntää passiivisia turvallisuusjärjestelmiä, jotka eivät tarvitse turvallisuusjärjestelmän aktivointisignaalia toimiakseen. Tällainen laite on esimerkiksi varoventtiili, joka avautuu itsestään, kun järjestelmän paine ylittää tietyn rajan. Passiivisia turvallisuusjärjestelmiä käytettäessä turvallisuus ei siis riipu täysin suunniteltujen osien toimivuudesta, vaan ne perustuvat yksinkertaisiin fysiikan ilmiöihin, kuten lämpölaajenemiseen. (World Nuclear Association 2018a)

Koska polttoaineen jälkilämmöntuotto on suoraan verrannollinen reaktorin tehoon, tuottaa esimerkiksi 300 MW:n kaukolämpöreaktori vain vähän yli 5 % Olkiluoto 3:n kaltaisen suuren EPR-reaktorin jälkilämpötehosta. Tämän ansiosta jälkilämmönpoisto reaktorista voidaan toteuttaa passiivisilla järjestelmillä, jotka perustuvat luonnonkiertoon. Kun vesi kulkee polttoaineen läpi, se lämpenee ja pyrkii ylöspäin. Jos lämmönvaihdin sijoitetaan oikein suhteessa reaktoriin, käynnistyy virtaus itsestään ilman pumppuja ja ulkoista voimaa. Tällöin tarve kalliille hätäjäähdytysjärjestelmälle häviää, sillä ongelmatilanteessa reaktori jäähtyy itsestään luonnonkierron avulla siirtäen jälkilämmön lämmönvaihtimien avulla reaktorirakennuksen ulkopuolelle.

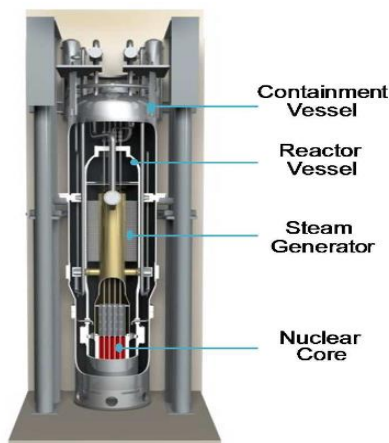
Koska reaktorityyppejä on useita erilaisia, turvallisuusjärjestelmät vaihtelevat merkittävästi näiden välillä. Pienikokoiset ydinreaktorit ovat kuitenkin yleisesti turvallisempia kuin perinteiset suuret reaktorit matalamman tehonsa ja siksi merkittävästi pienemmän jälkilämpötehonsa ansiosta. Lämmön erillistuotantoon suunnitellut reaktorit ovat vielä

kauttaaltaan merkittävästi CHP-reaktoreita turvallisempia, sillä reaktorin käyttölämpötila voidaan laskea vain noin 100°C lämpötilaan.

4.1 NuScale

Yksi SMR- ja CHP-reaktorien edelläkävijöistä on Yhdysvaltalainen NuScale. NuScale-reaktorit, sekä sähköntuotantoon soveltuvat että kaukolämmitysreaktorit, on yleensä suunniteltu modulaarisiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että reaktorit valmistetaan valmistajan tehtaalla, jonka jälkeen ne kuljetetaan haluttuun paikkaan, jossa ne kootaan käyttövalmiiksi. NuScale:n lähitulevaisuudessa tuotantoon siirtyvä modulaarinen reaktori on painevesireaktori, jonka kokoluokka on noin 160 MW_t, 50 MW_E. Alkuperäinen malli kehitettiin 2003 Oregonin yliopistossa usean tutkijaryhmän yhteistyössä, joiden pohjalta NuScale Incorporated perustettiin vuonna 2007 reaktorin kaupallistamiseksi. Ensimmäisen moduulin oletetaan valmistuvan 2020 ja ensimmäisen 600 MW voimalan toimitus odotetaan tapahtuvan 2026. (Nuclear Energy Insider 2018)

NuScale-voimalaitos koostuu 1-12 itsenäisestä moduulista ja jokainen moduuli sisältää oman integroidun painevesireaktorinsa. Jokainen reaktori on upotettuna vesialtaaseen, joka on vahvistettu ruostumattomalla teräksellä. Koko moduuli on pakattu 24,8 metriä pitkän ja 4.6 metrin halkaisijan kokoiseen teräskoteloon. Tämän lisäksi reaktori, lämmönsiirtimet ja paineistin on ympäröity korkeaa painetta kestäväällä säiliöllä, jonka pituus on noin 20 metriä ja halkaisija 2,8 metriä. Havainnollistavampi kuva rakenteesta on nähtävissä kuvassa 4. (IAEA 2013, 2-4)



Kuva 4. reaktorimoduulin rakenne (IAEA 2013, 4)

Reaktorisydämen ainoat erot tyypilliseen painevesireaktoriin ovat lyhennetty pituus (2 metriä vrt. tyypilliseen 4 metriin) sekä polttoaineniippujen määrä jolloin myös reaktorisydämen säde on pienempi. Voimalan polttoainekierto on kaksi vuotta ja se käyttää polttoaineena keraamisia UO_2 -pellettejä, jotka on rikastettu 4,95 %:n pitoisuuteen ja tämän lisäksi polttoainesauvoihin lisätään gadoliniumia absorptiovaikutuksen takia, eli kompensoimaan ylijäämäreaktiivisuutta. (Värri 2018, 7-8)

Reaktorisydämen jäähdytys toimii passiivisella jäähdytyksellä. Tämä tarkoittaa, että lämmönkierto reaktorissa toimii lämpötilaerojen aiheuttaman nosteen avulla, eikä jäähdytykseen tämän takia tarvita ylimääräisiä pumppuja, putkia tai venttiilejä. Tämä vähentää liikkuvien osien määrää reaktorissa ja lisää turvallisuutta. Teräsallas, johon reaktorimoduuli on upotettu, mahdollistaa jälkilämmön keräämisen ympäröivään veteen, se myös esimerkiksi vähentää mahdollisten maanjäristysten aiheuttamaa vaikutusta sekä tarjoaa ylimääräistä suojaa säteilyltä. (IAEA 2013, 4-7)

Suurena etuna useamman moduulin voimalassa on se, että yksittäisiä reaktoreita voidaan sammuttaa tai reaktorin osakuorma voidaan laskea 40 % asti vain pienillä muutoksilla. Polttoainekiertoa voidaan myös jaksottaa moduulien välillä, jolloin osakuormaa voidaan soveltaa niihin reaktoreihin, joissa se on helpompaa eli niihin, joissa polttoaine on juuri vaihdettu. (Värri 2018, 8-11)

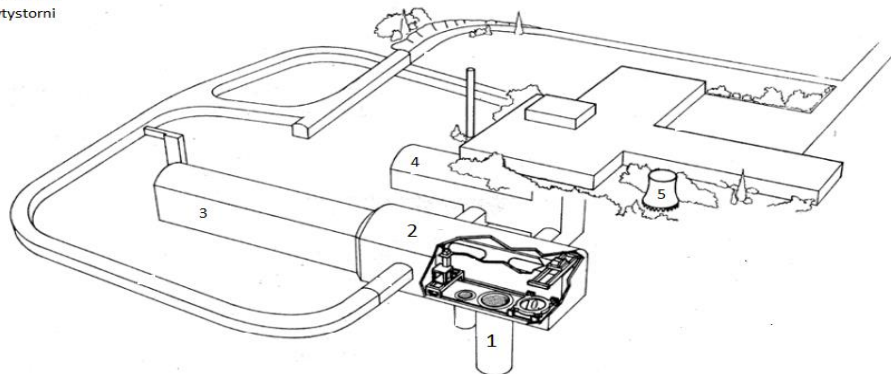
4.2 SECURE

Secure on passiivisen turvallisuuden pohjalta suunniteltu kaukolämpöreaktori, jota suunniteltiin pohjoismaiden markkinoille 1970-luvulla. Laitos suunniteltiin tuottamaan noin 95 °C vettä suurien asutuskeskusten kaukolämpöverkon käyttöön 200 MW:n reaktorilla. Maanpinnalla laitoksesta on vain hätätilanteissa käytettävä jäähdytystorni sekä hallintorakennus. Reaktori suunniteltiin toimivan korkeintaan 0,7 MPa paineessa ja 115 °C asteen lämpötilassa. Reaktorin paineastiana toimii teräsbetoninen allas, jonka sisällä on avoin reaktori. Koko paineastia on sijoitettuna kallioluolaan maan alle, minkä takia perinteistä suojarakennusta ei laitoksessa ollut. Laitoksella käydään tekemässä tarkastuskierros ainakin kerran päivässä ja voimayhtiön henkilöstön oletettiin ehtivän laitokselle 30 minuutin varoitusajalla. Voimalaan on kuitenkin suunniteltu valvomo, mutta sitä oli tarkoitettu käytettäväksi vain seisokkien, sekä ylös- ja alasajon aikana. Normaalityllassa jäähdytettyä kierrätetään reaktorista kaukolämpöverkkoon kytkettyihin

lämmönvaihtimiin pumpuilla. Koska SECURE:ssa ei ole säätösauvoja, myös reaktorin sammuttaminen tapahtuu pysäyttämällä pääkiertopumput, jotka pitävät yllä virtausta. Jäähdytyskierto reaktoria ympäröivään altaaseen on auki, mutta paine-ero estää allasveden pääsyn reaktoriin. Reaktorin sammuttua esimerkiksi hätätilanteessa allasvesi pääsee reaktoriin pumppujen pysähtyessä jolloin reaktorialtaan lämpö poistuu jäähdytystorniin ja samalla allasveden boori pysäyttää ketjureaktion. Jäähdytyspiirin tai primääripiirin ongelmatilanteissa olisi henkilökunnalla noin 24 tuntia aikaa palauttaa jäähdytys ennen reaktorialtaan kiehumista. Tällaisessa tilanteessa jälkilämmönpoistoon tarvittaisiin vaihtosähköä. (Lemmetty 2012b)

SECURE-laitosalueen suunniteltu rakenne on esitetty kuvassa 5.

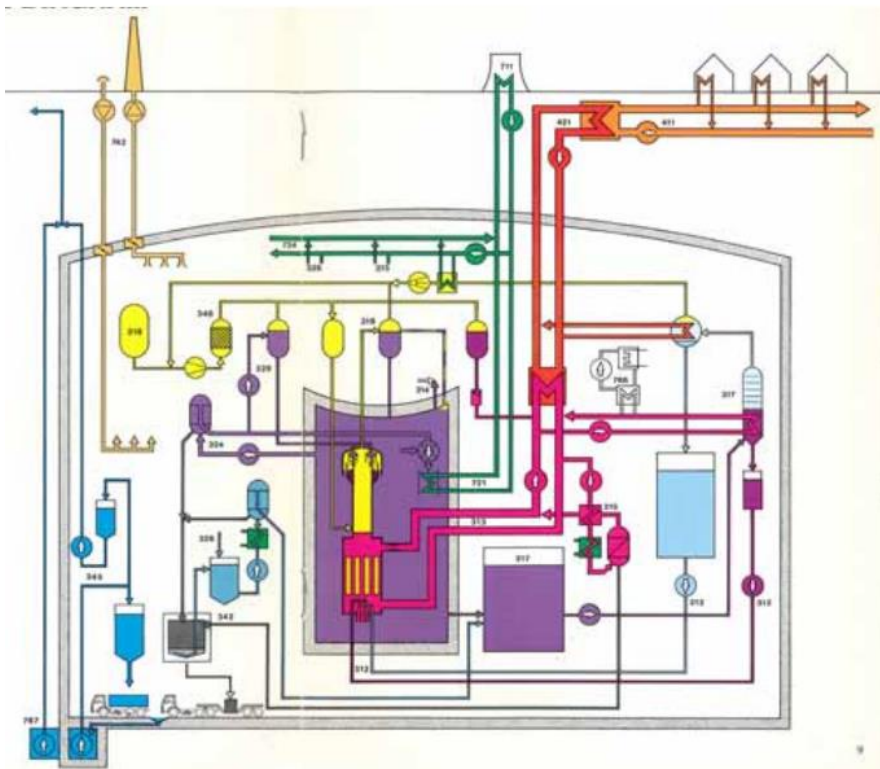
1. Reaktioallas
2. Reaktorihalli
3. Apujärjestelmäluola
4. Sähkölaiteluola
5. Jäähdytystorni



Kuva 5. SECURE-laitoksen rakenne (Lemmetty 2012a, s.13)

SECUREN merkittävänä puutteena on se, ettei suojarakennuksesta pystytä poistamaan lämpöä primääripiirin tai reaktorialtaan ongelmatilanteissa. Esimerkiksi reaktorialtaan alkaessa kiehua, onnistuisi jälkilämmön poisto vain päästämällä höyryä ympäristöön. Tätä varten ei oltu suunniteltu höyryä kestäviä suodattimia. Lisäksi turvallisuustoiminnot esimerkiksi polttoaineenkäsittelyonnettomuuden tapahtuessa olivat heikot: Ainoana suojarakennustoimintona toimii ilmastoinnin hätäeristys. Primääripiiri oli auki reaktioaltaaseen, joten se ei voi toimia leviämisesteenä. Näiden toimintojen puute perustui lähinnä siihen, että polttoaineaurioita ei suunnitteluperusteonnettomuuksissa odotettu tapahtuvan. SECURE ei täyttäisi nykyaikaisia ydinvoimalaitoksen vaatimuksia, mutta sen turvallisuuspuutteet ovat yleisiä 1970-luvulle suunnitelluissa reaktoreissa. Jotta laitos saisi turvallisuutensa nykyisten vaatimusten tasolle Suomessa, täytyisi vakavan onnettomuuden

hallintaa sekä rajoittavia järjestelmiä parantaa. Laitokseen täytyisi vähintäänkin suunnitella nykystandardien mukainen suojarakennus ja lisätä jälkilämmön poistamista varten suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä, lämpönielu, suurempi boorattua vettä sisältävä vesiallas ja esimerkiksi käyttää passiivista suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmää. SECURE:n pääkiertokaavio on esitetty kuvassa 6. (Lemmetty 2012)



Kuva 6. SECURE:n pääkiertokaavio. (Lemmetty, 2012b)

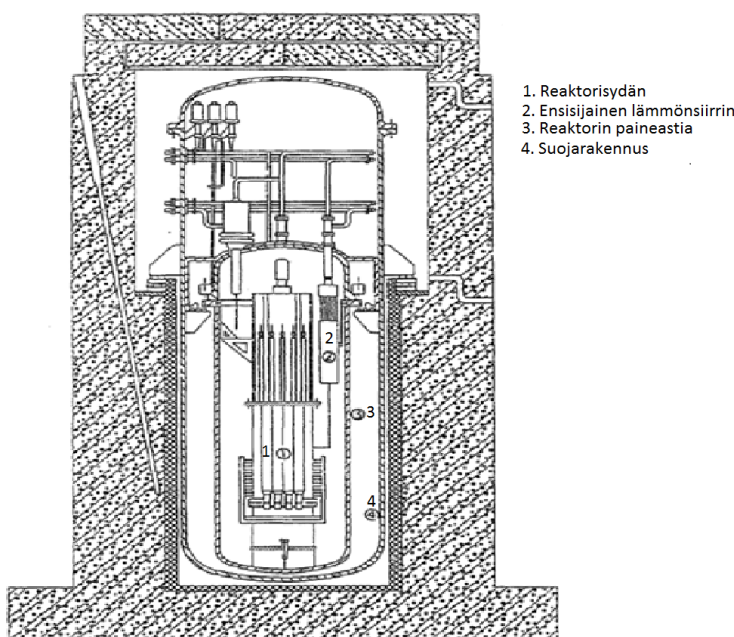
4.3 NHR

NHR-5 sekä sen seuraajat NHR-200 ja NHR-200-II perustuvat perinteiseen paineastiattyyppiseen rakenteeseen, mutta jäähdytys on hoidettu passiivisesti luonnonkieron avulla. NHR-5 on suunniteltu toimimaan matalassa lämpötilassa, paineessa ja matalalla tehotiheydellä. Reaktorin suunniteltu käyttöpaine on 1,5 MPa 177 °C lämpötilassa. Reaktiivisuuden hallintaan käytetään säätösauvoja ja vaihtoehtoisena sammutusmenetelmänä pikasulkuilanteessa toimii boorihapon syöttö jäähdytteeseen. (Zhang et al. 1997, 195-198)

Reaktorisydän koostuu 12 polttoainepusta, joissa jokaisessa on 96 polttoainesauvaa sekä neljästä nipusta joissa jokaisessa on 35 polttoainesauvaa. Polttoainesauvat ovat 690 mm pitkiä sekä halkaisijaltaan 10mm ja ne on päällystetty Zirkoniumista valmistetusta Zircaloy-4-seoksella. Polttoaineena NHR-reaktorit käyttävät 3 % rikastettua uraanioksidia. Reaktorisydän siis sisältää uraanioksidia yhteensä 0,508 tonnia. Reaktiivisuutta hallitaan booria sisältävillä 13 säätösauvalla, lisäämällä polttoainesauvoihin 1,5 % palavaa gadoliniumoksidia sekä jäähdytteen negatiivisella reaktiivisuudella. Reaktorisauvoja ohjaa hydraulinen hallintajärjestelmä, mutta ne voidaan pudottaa sydämeen myös painovoiman avulla kun reaktori täytyy sammuttaa. Onnettomuuksissa ja/tai poikkeustilanteissa boorin syöttäminen käynnistyy pumpuilla tai paineistetulla tyypellä (Zhang et al. 1997, 259-263)

Jälkilämmönpoistojärjestelmä koostuu kahdesta itsenäisestä alajärjestelmästä joista molemmat siirtävät lämpöä kolmea eri reittiä pitkin. Ensisijaisesti lämpö ohjataan lämmönvaihtimien avulla höyrystimelle, mutta jälkilämpöä voidaan myös vapauttaa ympäristöön ilman luonnollisen konvektion avulla.

NHR-5 reaktorin käyttöaste vuoden 1989 ja 1993 välisinä testijaksoina oli noin 99 %, joka on erittäin korkea. Neljän talviajon aikana tapahtui 4 odottamatonta alasajoa, jotka johtuivat pääosin apujärjestelmien ongelmista. Reaktorin sulkua kesti keskimäärin alle 4 tuntia. (Zhang et al. 1997, 265-266)



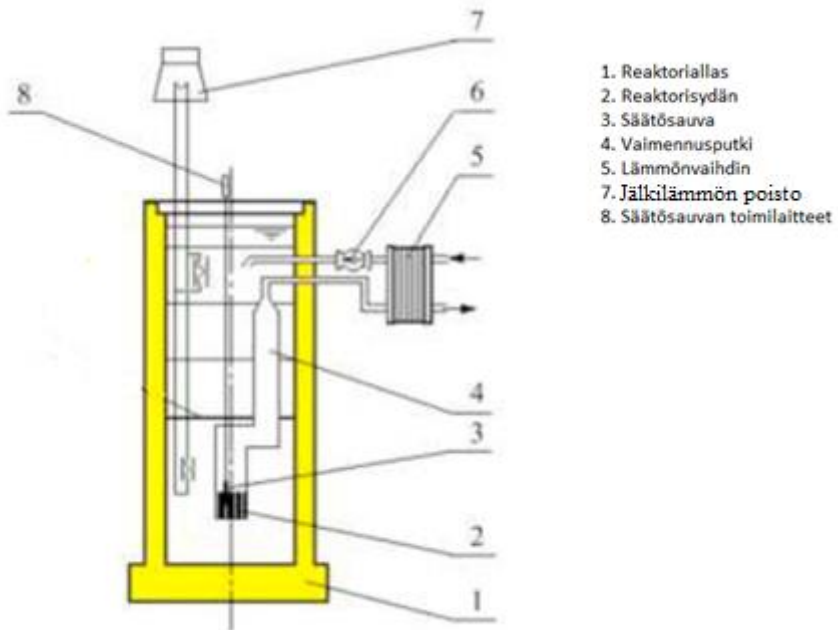
Kuva 7. NHR-5-reaktorin reaktorirakennuksen komponentit (Zhang et al. 1997, 262.)

4.4 DPR

DPR (Deep pool reactor) on lämmöntuotantoon suunniteltu reaktorityyppi, jossa reaktorisydän upotetaan syvään vesialtaaseen ja toimii erittäin matalissa lämpötiloissa. Jäähdytykseen käytetty vesi on vain matalassa hydrostaattisessa paineessa, joka mahdollistaa kaukolämpöverkon edellyttämät lämpötilat sekä laitoksen suhteellisen pienen teholuokan. Tehotason säätämiseen käytetään säätösauvoja. DPR-reaktorista on suunniteltu eri versioita 60, 120, 240 sekä 400 MW lämpötehoilla. Näistä jokaisessa kiertävän veden lämpötila kohoaa korkeimmillaan vain 90 °C lämpötilaan lukuunottamatta 200 MW DPR-6:ta jonka lämpötila nousee korkeimmillaan 120 °C-asteeseen. DPR-3 ja DPR-6 malleissa vesialtaan syvyys vaihtelee 21 ja 27 metrin välillä. (Tian 2000, 272-273)

Reaktoriallas on vahvistettu betoninen allas, joka on sijoitettu maan alle. Allasveden vähenemistä altaasta itsestään ei koskaan tapahdu ja näinollen reaktori pysyy aina upotettuna. Jos pumppujen toiminta menetetään poikkeustilanteessa eikä kaikkia säätösauvoja saada laskettua, jatkaa luonnonkierto jälkilämmönsiirtoa reaktorisydäimestä riittävällä teholla ympäröivän allasveden toimiessa lämpönielulla jolloin reaktori kykenee säilyttämään jäähdytyksen itsenäisesti sammumiseen asti. Pumput, primäärilämmönvaihtimet sekä säätösauvojen toimilaitteet on sijoitettu altaan ulkopuolelle huoltotoimenpiteiden helpottamiseksi. Sydäimestä poistuva vesi virtaa hitaasti aktiivisuuden poistoon suunnitellun säiliön läpi. Polttoaineen vaihdon yhteydessä osa altaan vedestä siirretään toiseen väliaikaiseen altaaseen, joka mahdollistaa helpomman ja nopeamman polttoaineen vaihdon. DPR-reaktorin rakenne on esitetty kuvassa 8 (Tian 2000, 272-273)

DPR:n yksinkertaisen rakenteen ja sen turvallisuuden ansiosta jäävät sen investointikustannukset alustavien laskelmien mukaan merkittävästi alemmas muihin kaukolämpöreaktoreihin verrattuna.



1. Reaktoriallas
2. Reaktorisydän
3. Säätösauva
4. Vaimennusputki
5. Lämmönvaihdin
7. Jälkilämmön poisto
8. Säätösauvan toimilaitteet

Kuva 8. DPR-reaktorin rakenne

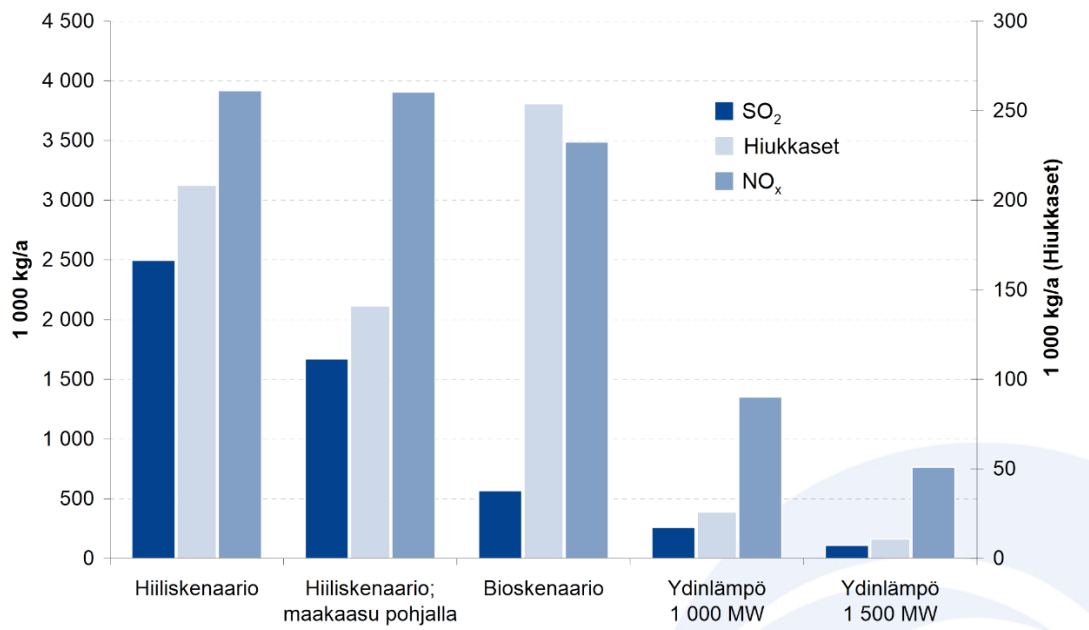
5 POTENTIAALI

5.1 Suomi

Suomessa sekä kaukolämpö että ydinvoima ovat jo kauan olleet laajassa käytössä, joten näiden yhdistäminen tulevaisuudessa EU:n ilmastotavoitteiden täyttämiseksi on potentiaalinen ja hyvin todennäköinen ratkaisu. Tällä hetkellä pääkaupunkiseudun kaukolämmönkulutus vaihtelee 400 ja 350 MW välillä vuodenajasta riippuen. Tästä lämmönkulutuksesta 90 % on tällä hetkellä tuotettu kivihieillä ja maakaasulla, jotka tuottavat 50 % Helsingin kasvihuonekaasupäästöistä (HELEN 2015). Aikaisemmin suuren mittakaavan ydinkaukolämpöprojekteja ei ole pidetty järkevinä, koska ydinvoimalat on tyypillisesti turvallisuussyistä sijoitettu pitkän välimatkan päähän asutuskeskuksista eli alueelta, jossa kaukolämpöä tarvitaan. Lämmönsiirron heikko hyötysuhde pitkillä välimatkoilla verrattuna esimerkiksi sähkönsiirtoon tekee tästä olennaisen tekijän. Teknologian kehityksen ansiosta lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa ovat vähentyneet ja niitä pystytään vielä merkittävästi laskemaan (Hongwei & Wang 2014, 1-4). SMR-reaktorit on myös saatu passiivisten turvallisuusjärjestelmien sekä matalampien käyttölämpötilojen ja -paineiden avulla niin turvallisiksi, että sijoitus asutuskeskusten läheisyyteen on jo mahdollista. Ydinkaukolämmön suurimmat haasteet ovat Suomessa pitkälti poliittisia ja Fukushima voimalan kaltaisilla onnettomuuksilla on ollut voimakas vaikutus niin alueiden ihmisiin kuin poliitikkoihin, jotka eivät usein tiedä tapahtumiin johtaneita syitä tai eroja perinteisen ydinvoimalan ja potentiaalisen kaukolämpöydinvoiman välillä.

Energiateollisuuden konsultointiyritys Pöyry toteutti 2010 Fortumin tilaaman selvityksen ydinkaukolämmön teknisestä toteutettavuudesta ja kannattavuudesta pääkaupunkiseudulla vuosina 2020-2080. Selvityksessä ydinkaukolämpö tuotettaisiin Loviisa 3-ydinvoimalaitoksessa ja johdettaisiin putkien avulla pääkaupunkiseudulle. Selvityksessä verrattiin kolmea skenaariota: Hiiliskenaario, jossa kaukolämmityksen tuotannossa jatketaan nykyisellä tuotantorakenteella, bioskenaario, jossa tuotanto perustuu biomassan ja maakaasun käyttöön sekä ydinlämpöskenaario, jossa lämpö tuotetaan ydinreaktoreilla vaihtoehtoisesti 1000 MW:n tai 1500 MW:n kaukolämpötehdolla. Näitä skenaarioita vertailtiin niin taloudellisten kuin ympäristövaikutusten suhteen. Oletetussa skenaariossa ydinvoimala myy tuottamansa energian osakkailleen omakustannushintaan. Selvityksessä päästöt jäisivät pienimmiksi 1500 MW:n ydinlämpö-skenaariossa CO₂-päästöjen ollessa 75

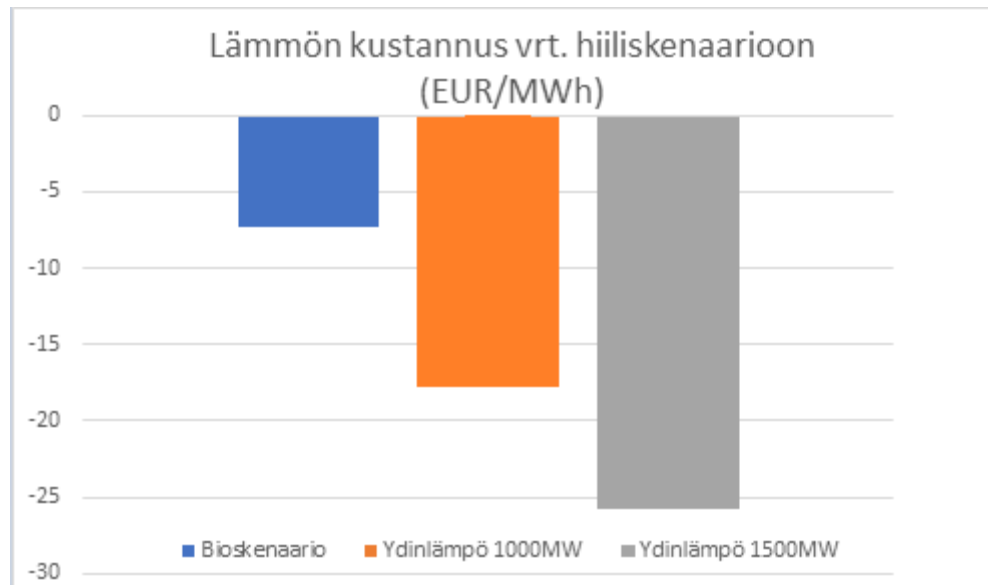
% matalammat vuoden 1990 päästötasoon verrattuna, jota käytetään vertailukohtana myös EU:n ympäristötavoitteille. Hiiliskenaariossa nykyisellä tuotantorakenteella hiilidioksidipäästöt vastaavasti nousisivat 24 %. Myös muut kasvihuonekaasupäästöt jäisivät merkittävästi matalammaksi ydinvoimaskenaarioissa kuin muissa vaihtoehdoissa, joka voidaan nähdä kuvasta 9.



Kuva 9. Skenaariokohtaiset päästöt pääkaupunkiseudulla (Pöyry, 2010)

Ydinlämpöskenaarion huonot puolet tulevat ilmi investointikustannuksia vertailtaessa. Investointikustannukset ydinvoimalle koko sen käyttöiän ajalta jäävät pienemmiksi kuin vertailukohteiden vastaavat, mutta investointikustannukset tarkastelujakson alussa ovat merkittävästi suuremmat Loviisa 3- reaktorin lisäksi pitäisi ydinvoimaskenaariossa rakentaa infrastruktuuri lämmön kuljettamiseen pääkaupunkiseudulle. Oletettussa skenaariossa putkilinjaston rakentaminen ja näin myös kulut ajoittuvat vuosille 2014-2019. Takaisinmaksuaika ydinvoimalalle ja siihen tarvittavalle infrastruktuurille olisi siis merkittävästi pidempi kuin vaihtoehtoisissa skenaarioissa. Taloudellisesta näkökulmasta ydinlämpöskenaariot ovat kuitenkin kannattavimmat vaihtoehdot. Selvityksessä suoritettiin myös herkkyystarkastelu, jossa verrattiin bioskenaariota ydinlämpöön eri muuttujien, kuten biomassan hinnan, vaihtelulla. Bioskenaarion keskeisiä ongelmia ovat polttoainelogistiikka ja biomassan saatavuus sekä hinta. Pöyryn herkkyystarkastelusta (kuva 10.) voidaan todeta, että skenaario, jossa lämmön tuotto biomassalla olisi taloudellisesti kannattavampaa pitkällä

aikavälillä, on lähes mahdoton. Esimerkiksi ydinenergian omakustannushinnan pitäisi nousta 114 % 1500 MW:n skenaariossa, jotta biomassan ja maakaasun käyttö olisi taloudellisesti kilpailukykyinen.



Kuva 10. Lämpökustannusten ero verrattuna hiiliskenaarioon (Pöyry, 2010)

VTT:n selvityksessä simuloitiin suomalaisen esimerkkikaupungin kaukolämpöverkko vuonna 2030 ja esitettiin lämmöntuotannon hinta eri tuotantorakenteilla. Selvityksestä käy ilmi, että sekä CHP-reaktorilla että kaukolämpöön tarkoitettulla ydinreaktorilla lämmön tuotantokustannukset jäävät merkittävästi alemmiksi kuin vertailutilanteessa, jossa kaukolämpö tuotetaan ilman ydinvoimaa. Taloudellisesti kannattavin vaihtoehto on kuitenkin pelkästään kaukolämmön tuotantoon suunnitellun reaktorin käyttäminen. Kyseinen tutkimus on kuitenkin melko yksinkertaistettu, eikä se ota huomioon esimerkiksi luvitusvaiheessa usein ilmeneviä ongelmia ja lisäkustannuksia. Esimerkiksi Olkiluoto 3-reaktorin lopullinen hinta on lähes tuplaantunut alkuperäisistä laskelmista turvallisuuspuutteiden takia, vaikka kyseiset laskelmat olivat varmasti tarkemmat kuin kyseisessä tutkimuksessa. (Pursiheimo & Tulkki, 2017)

Vaikka kustannuslaskelmat ja ympäristövaikutusten ennusteet kaukolämmitysreaktoreiden käyttöönotolle ovat yleensä äärimmäisen lupaavia, ei niiden valinta fossiilisten polttoaineiden korvaajaksi ole varmaa. Ylivoimaisesti suurin ongelma ydinvoiman ja -

kaukolämmön käyttöönotossa ovat lupamenettelyt ja poliittinen ilmapiiri. Etenkin kaukolämmitysreaktorin tilanteessa reaktori on rakennettava mahdollisimman lähelle kulutusta, sillä lämmönsiirron tehokkuus on merkittävästi sähköä heikompi. Tämä lisää entisestään lähiasukkaiden vastustusta, sillä jo perinteiset syrjempään rakennetut ydinvoimalat herättävät paljon negatiivisia mielipiteitä ja tämä puolestaan nostaa poliittisten päättäjien kynnystä hyväksyä periaatepäätös ydinvoimalan rakentamiselle. Japanin Fukushimaa vuonna 2011 tapahtuneen ydinvoimalaonnettomuuden seurauksena esimerkiksi Saksa on ilmoittanut luopuvansa kokonaan ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä (World Nuclear Association, 2019b).

Potentiaalia ydinkaukolämmön käyttöön on Suomessa paljon, mutta tähän asti yritykset ovat kaatuneet poliittisista syistä. Ymmärrystä ydinkaukolämmön mahdollisuuksista tulisi lisätä niin päättäjille, kuin kyseisten alueiden asukkaille. Ihmisten tieto ydinvoimasta rajoittuu yleensä uutisiin ydinonnettomuuksista, mikä aiheuttaa käsitteen ympärille negatiivisia asioita ja vastustusta. Mikäli tietoa erityisesti kaukolämpöreaktoreista ja niiden turvallisuudesta verrattuna perinteisiin ydinvoimalaitoksiin saadaan levitettyä, myös päättäjien kynnys hyväksyä uusien voimaloiden rakentamista madaltuu ja kyseisten reaktorien potentiaali saadaan käyttöön.

5.2 Kiina

Kiina on yksi maailman suurimmista energiantuottajista ja -kuluttajista, joka tuottaa myös eniten CO₂-päästöjä vuosittain. Vuonna 2016 kiinan energiantuotannosta 58 % tuotettiin kivihieillä, joka on ympäristön kannalta yksi haitallisimmista tuotantomuodoista. Tämän lisäksi ennusteiden mukaan vain 80 % Kiinan energiantuotannosta kyettäisiin tuottamaan öljyllä, maakaasulla, kivihieillä ja vesivoimalla vuoteen 2050 mennessä. Hiilenpoltto on myös aiheuttanut vakavia ongelmia ilmanlaadulle Kiinassa. Energiankulutuksesta 25 % käytetään lämpöenergiana alle 150 °C lämpötiloissa, mikä on saanut viranomaiset etsimään ekologisempaa vaihtoehtoa lämmitykselle. Kiinassa on myös ylivoimaisesti eniten asennettua kaukolämmityskapasiteettia maailmassa, 463 GW_t ja arviolta noin 55 % koko lämmityspinta-alasta Pohjois-Kiinassa lämmitetään kaukolämmöllä ja alueella asuu 500-600 miljoonaa ihmistä. (Euroheat & Power, 2015).

Näistä syistä johtuen Kiina on viime vuosina ollut selvä edelläkävijä ydinkaukolämmön kehityksessä. Ydinvoima tarjoaa lähes päästöttömän vaihtoehdon Pohjois-Kiinan

lämmitykseen. Kyseiseen ongelmaan ratkaisua kehittänyt tutkimus on Kiinassa jakaantunut kahteen kehityslinjaan. NHR-200 II sekä DHR-400-reaktorit saadaan todennäköisesti tuotantoon lähivuosina, sillä ydinenergian ja -lämmön tuotannolla on jo kauan ollut Kiinassa poliittisen johdon tuki ja tämän ansiosta myös rahoitus. Maaliskuussa 2011 Fukushima onnettomuuden jälkeen. Vuonna 2011 Kiinan valtioneuvosto ilmoitti jäädyttävänsä kaikki vireillä olevat lupahakemukset uusista ydinvoimaloista ja suorittavansa perusteelliset turvallisuustarkastukset kaikkiin käynnissä oleviin projekteihin. Myös neljän uuden voimalan rakentamista lykättiin. Seuraavana vuonna Kiina otti käyttöön IAEA:n ydinturvallisuusstandardit, joka aiheutti lisäkuluja kaikissa maan jo olemassa olevissa laitoksissa. Tästä huolimatta myöhemmin samana vuona Kiinan kansallinen energiahallinto NEA ilmoitti, että ydinenergiasta tulee perusta koko maan energiantuotannolle seuraavan 10-20 vuoden aikana ja että maa tulee lisäämään ydinkapasiteettiaan 300 GW_e verran. Vuonna 2014 energiahallinto ilmoitti myös, että Kiina tähtää maailman kärkeen ydinteknologiassa. (World Nuclear Association, 2019a) Näistä lausunnoista voi päätellä, että myös ydinkaukolämmön merkitys Kiinassa tulee kasvamaan merkittävästi lähivuosina.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutustuttiin pienikokoisiin ydinreaktoreihin, joita on mahdollista käyttää kaukolämmityksessä joko CHP- tai erillistuotannossa. Työn tavoitteena oli saada käsitys siitä, onko ydinreaktoreita mahdollista ja järkevää käyttää kaukolämmityksessä, saada käsitys teknologian nykytasosta sekä verrata eroja perinteiseen ydinvoimalaan. Työssä käytiin myös läpi ydinkaukolämmön historia ja esiteltiin aikaisempia suunnitelmia sen toteuttamiseksi suuressa mittakaavassa.

Suurin etu pienillä kaukolämmitysreaktoreilla verrattuna perinteisiin ydinvoimaloihin on niiden koko sekä lämmöntuotantoon suunnitellun reaktorin mahdollistamat matalat käyttöpaineet ja -lämpötilat. Alustavien laskelmien mukaan myös investointikustannukset on mahdollista saada lähelle vastaavia hiililaitoksia tulevaisuudessa. Nämä erot mahdollistavat passiiviset turvallisuusjärjestelmät, jotka toimivat miehittämättöminä ja hätätapauksissa ilman virtaa. Passiivisia turvallisuusjärjestelmiä hyödynnetään jälkilämmön poistossa ja reaktiivisuuden hallinnassa. Näiden avulla vakavan ydinonnettomuuden riskiä saadaan merkittävästi pienennettyä, sillä passiiviset turvallisuusjärjestelmät eivät ole riippuvaisia laitteen toimivuudesta tai ihmisen toiminnasta. SMR-reaktorit on myös yleensä rakennettu kokonaan painesäiliön sisään, jolloin moduulit voidaan rakentaa valmiiksi tehtaassa ennen niiden kuljetusta lopulliseen sijoituspaikkaan. Tämä nopeuttaa laitoksen rakentamista ja vähentää kustannuksia mikäli laitos sijaitsee syrjäisessä paikassa. Toisaalta pieni koko nostaa reaktoreiden ominaiskustannuksia, sillä polttoaineen kulutus on suhteellisesti korkeampi.

Kaukolämmitysreaktorin pieni koko sekä suhteellinen turvallisuus verrattuna perinteisiin ja monimutkaisempiin ydinreaktoreihin voi vakuuttaa viranomaiset vähentämään vaatimuksiaan ydinreaktorin sijoituksen suhteen, mikä on välttämätöntä kaukolämmön tehokkaalle käytölle. Nykyiset vaatimukset on määritetty vakavan onnettomuuden aiheuttamien päästöjen perusteella, mutta niitä laatiessa ei olla otettu huomioon modernien kaukolämmitysreaktorien kaltaisia laitoksia. Pienempi koko ja yksinkertaisempi rakenne laskevat myös investointikustannuksia, joka mahdollistaa usean reaktorin hajauttamisen eri alueille lähelle kulutusta.

Ympäristötekijät ovat yhä suuremmassa roolissa vertailtaessa energiantuotannon muotoja ja siksi usea maa etsiikin korvaajaa lämmityksessä yleisesti käytetyille kivihillelle ja

maakaasulle. Tässä merkittävimmissä roolissa on Kiina, joka suurimman kaukolämmityskapasiteetin lisäksi on suurin saastuttaja maailmassa. Tällä hetkellä sen pääasiallisena polttoaineena on kivihiili. Ydinkaukolämpö olisi korvaajana lähes päästötön vaihtoehto ja nykyteknologialla lämpökustannukset ydinvoimalla on saatu jopa samalle tasolle kivihiilen kanssa.

Oma arvioni on, että ydinkaukolämmön kehitys ja käyttöönotto tulee jatkumaan vahvimmin juuri Kiinassa, joka omaa suurimman osan asennetusta kaukolämmityskapasiteetista maailmassa. Kiina on jo vuosikymmeniä suorittanut testejä ydinkaukolämmöllä ja muutamia voimaloita on jo otettu käyttöön. Kiina on ilmoittanut lisäävänsä ydinvoiman käyttöä merkittävästi tulevina vuosikymmeninä, mikä tulee varmasti näkymään myös ydinkaukolämmön suurena kasvuna etenkin Pohjois-Kiinassa, jossa kaukolämmön piirissä on jopa 500-600 miljoonaa ihmistä. Myös ydinvoiman käyttö lämmön ja sähkön yhteistuotannossa tulee varmasti yleistymään, sillä se nostaa merkittävästi laitoksen hyötysuhdetta.

Kiinan lisäksi myös Venäjällä ja Suomessa on jo kauan ollut kiinnostusta ydinkaukolämmölle, mutta etenkin Suomessa lupaavatkin suunnitelmat ovat kaatuneet poliittisiin syihin. Uskon kuitenkin pääkaupunkiseudun kaukolämmön tuotannon siirtyvän tulevaisuudessa ydinkaukolämpöön, sillä se on yksi merkittävimmistä tavoista vähentää alueen päästöjä lyhyellä aikavälillä. Aiheesta täytyy keskustella laajemmin mediassa ja näin lisätä ihmisten ymmärrystä SMR-reaktoreista ja kaukolämmitysreaktoreista, jotta niitä ei yhdistetä tavallisiin ydinvoimaloihin ja näissä tapahtuneisiin ydinonnettomuuksiin. Tämä laskee myös päättäjien kynnystä hyväksyä uusien reaktorien rakennus. Venäjällä painopiste tulee jatkumaan ydinvoiman CHP-tuotannossa ja useita uusia laitoksia on jo suunniteltu otettavaksi käyttöön vuoteen 2030 mennessä.

LÄHDELUETTELO

- Beijing Review, 2018. Clean Heating [Verkkajulkaisu] [Viitattu 20.1.2019]
 Saatavissa: http://www.bjreview.com/Nation/201712/t20171229_800113368.html
- Dafang Z., Duo D. & Qingshan S, 1997. Five MW Nuclear Heating Reactor. Institute of Nuclear Energy and Technology, Tsinghua University.
- Energiateollisuus ry, 2017 Kaukolämpö [Verkkajulkaisu] [Viitattu 8.12.2018] Saatavilla: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_2017_g_raafeina.html#material-view
- Energiateollisuus ry, 2016. Hyvä tietää ydinvoimasta. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 9.12.2018]
 Saatavilla: https://energia.fi/files/277/ht_ydinvoimasta.pdf
- Euroheat & Power 2015. District Heating and Cooling country by country 2015 survey. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 11.12.2018]
- Graae Tapani, 2010. Kotimaisen Teollisuuden katsaus. ATS YG:n ja Seniorien seminaari
- HELEN, 2015. Energy production in Helsinki [Verkkajulkaisu] [Viitattu 11.12.2018]
 Saatavilla: <https://www.helen.fi/en/company/energy/energy-production/energy-production2/>
- Hongwei Li & Stephen Jia Wang, 2014. Challenges in Smart Low-Temperature District Heating Development, Energy Procedia 61, s.1472-1475
- IAEA, 2013. NuScale Power Modular and Scalable Reactor. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 11.12.2018] Saatavilla: <https://aris.iaea.org/sites/..%5CPDF%5CNuScale.pdf>
- IEA. 2017. World Energy Outlook 2017: China
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. 1454s ISBN 978-1-107-05821-7
- Koreneff K, Lehtilä A, Hurskainen M, Pursiheimo E, Tsupari E, Koljonen T ja Kärki J, 2016. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon hiilidioksidiveron puolituksen poiston vaikutukset, VTT. 62 s. VTT-R-01173-16

Lemmetty Mikko. 2012a. SECURE Mikä se oli. ATS Ydintekniikka 2/2012, s.12-14

Lemmetty Mikko. 2012b. SECURE Miltä näyttäisi tänään. ATS Ydintekniikka 3/2012, s. 21-23

Leurent Martin et al, 2017. Driving forces and obstacles to nuclear cogeneration in Europe: Lessons learnt from Finland, Energy Policy 107, s. 138-150

Mäkelä Veli-Matti & Tuunanen Jarmo. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin Ammattikorkeakoulu ISBN: 978-951-588-506-7

Nuclear Energy Insider. Nuscale eyes first SMR module by 202 as licensing hits 1 year targets, 2018. [Verkkajulkaisu] Saatavilla:

<https://analysis.nuclearenergyinsider.com/nuscale-eyes-first-smr-module-2020-licensing-hits-year-1-targets>

Oesterwind D, Savage W.F. et al, 1978. The SECURE Heating Reactor, Nuclear Technology 38. s.89

Pursiheimo Esa & Tulkki Ville, 2017. District heat with small modular reactors (SMR). Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).

Pöyry Management Consulting Oy. 2010. Skenaariotarkastelu pääkaupunkiseudun kaukolämmöntuotannosta vuosina 2020-2080.

Rüdiger Mogens. 2009. Culture of Energy. S. 120-123

Samoilov, O.B., Kurachenkov A.V. 1997. Nuclear district heating plants AST-500. Present status and prospects for future in Russia. Nuclear Engineering and Design 173, s.109-117

Sandström S, 1966. Operating experience at Ågesta nuclear power station. AE-246, Aktiebolaget Atomenergi.

Tarjanne et al. 1974. Lämmitysreaktoriprojektin loppuraportti. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) Lämmitysreaktoriryhmä .

Tian J. 2000. Simple and safe deep pool reactor for low-temperature heat supply. Progress in Nuclear Energy 37, s.271-276

- Tilastokeskus, 2018. Sähkön ja lämmön tuotanto ja polttoaineet tuotantomuodoittain 2017
- Tulkki Ville, Lindroos Tomi J, Pursiheimo Esa. 2018. Ydinvoima kaukolämmön tuotannossa. (VTT). [Verkojulkaisu] Saatavilla: <https://www.2018dedays.org/wp-content/uploads/2018/09/180927-3Finnish-Track-Ville-Tulkki.pdf>
- Tuomisto Harri, 2013. Nuclear District Heating Plans from Loviisa to Helsinki Metropolitan Area, Technical and Economic Assesment of Non-Electic Applications of Nuclear Energy.
- U.S Department of Energy, 2001. Report to Congress on Small Modular Nuclear Reactors
- Vattenfall. Kaukolämpö. [Verkojulkaisu] [Viitattu 8.12.2018]
Saatavilla: <https://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/energianjakelu/kaukolampo/>
- Viander Tero, 2014. Kaukolämpöverkon käytön optimointi. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto 118 s.
- Värri Konsta, 2018. Market Potential of Small Modular Nuclear Reactors in District Heating. Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulu. 76 s.
- World Nuclear Association, 2018a. Safety of Nuclear Power Reactors [Verkojulkaisu]
Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>
- World Nuclear Association, 2018b. Nuclear Power in Russia [Verkojulkaisu] Saatavilla:
<http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>
- World Nuclear Association, 2019a. Nuclear Power in China Reactors [Verkojulkaisu]
Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>
- World Nuclear Association, 2019b. Nuclear Power in Germany [Verkojulkaisu] Saatavilla:
<http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>
- Zhang Z. et al, 2016. The Shandog Shidao Bay 200 MW High-Temperature Gas-cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and

Technological Innovation. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University