Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kaukolämpöreaktorin jälkilämmönpoisto maaperään

Residual heat removal of district heating reactor to the soil

Työn tarkastaja: Juhani Vihavainen

Työn ohjaaja: Juhani Vihavainen

Lappeenranta 7.07.2021

Joonas Piispanen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Joonas Piispanen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Juhani Vihavainen

Kandidaatintyö 2021

43 sivua, 24 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: kandidaatintyö, Jälkilämmönpoisto, SMR, Jälkilämpö

Tässä kandidaatintyössä käydään läpi yleisellä tasolla ydinvoimalaitoksen ja -reaktorin toimintaperiaate. Työssä tutustutaan myös SMR-konsepteihin ja käydään tarkemmin läpi NuScale- ja FinReactor-konseptit. Lisäksi tarkastellaan jälkilämpötehon ajallista käyttäytymistä reaktorin sammutuksen aikana, jonka jälkeen mitoitetaan jälkilämmönpoistoputkisto 2 MW lämpöteholla toimivalle laitokselle.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä **2**

Sisällysluettelo **3**

Symboli- ja lyhenneluettelo **4**

1 Johdanto **5**

2 Ydinvoimalaitos **6**
2.1 Ydinreaktori 7
2.2 Reaktorin jälkilämpöteho 9

3 SMR- reaktorit **10**
3.1 NuScale 10
3.2 FinReactor- voimalaitoskonsepti 12
3.3 LUT Heat Experimental Reactor (LUTHER) 13

4 Lämmönsiirto **15**
4.1 Putkilämmönsiirto vakiopintalämpötilassa 15
4.2 Konvektiolämmönsiirtokertoimen määritys 17
4.3 Höyrystimen lämmönsiirto 19
4.4 Kokonaislämmönsiirtokeroimen määritys 21
4.5 Painehäviöt 24

5 Jälkilämmönpoistoputkiston mitoitus **25**
5.1 Mitoitusteho 26
5.2 Oletukset ja materiaalit 28

6 Tulosten tarkastelu **29**
6.1 Putkimateriaalin ja maaperän vaikutus 29
6.2 Putken pituuden vaikutus 30
6.3 Putken halkaisijan vaikutus 31
6.4 Virtausnopeuden vaikutus 32
6.5 Painehäviöt 33
6.6 Putkien välisen etäisyyden vaikutus 34
6.7 Tulosten yhteenveto 35

7 Yhteenveto **39**

Lähdeluettelo **40**

Liitteet: **42**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c	lämpökapasiteettivirta	[kJ/KgK]
d	putken halkaisija	[m^2]
h	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/mK]
k	lämmönjohtavuus	[W/mK]
L	pituus	[m]
p	paine	[kPa]
q	lämpöteho	[kg/s]
R	lämpövastus	[K/W]
r	säde	[m]
T	lämpötila	[℃]
U	kokonaislämmönsiirtokerroin	[W/K]
v	nopeus	[m/s]

Kreikkalaiset aakkoset

μ	dynaaminen viskositeetti	[Pas]
ρ	tiheys	[kg/m^3]

Dimensiottomat luvut

ϵ	Tehokkuus	[-]
f	kitkakerroin	[-]
Nu	Nusseltin luku	[-]
Pr	Prandtlin luku	[-]
Re	Reynoldsin luku	[-]

Lyhenteet

IAEA	International Atomic Energy Agency	STUK	Säteilyturvakeskus
HDPE	High-density polyethylene	TVO	Teollisuuden voima
NTU	Number of transfer units	VVER	Venäläinen painevesireaktori

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen torjunta on luonut suuren tarpeen hiilidioksidineutraalille energiantuotannolle. Lähes kaikki Suomessa tuotettava lämpöenergia tuotetaan kuitenkin vielä fossiilisilla polttoaineilla tai polttamalla biomassaa. Biomassan polttamisen lisääminen taas kasvattaisi metsien hakkuita, mikä ei olisi Suomen biodiversiteetin kannalta kestävää kehitystä. Metsien lisääntyneet hakkuut myös vähentävät hiilinielujen määrää, mikä on ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta haitallista.

Ydinvoiman käyttäminen kaukolämmön lähteenä ei ole uusi idea, mutta aikaisemmin fossiilisten polttoaineiden halpa hinta on tehnyt ydinkaukolämmöstä kannattamatonta. Ilmastonmuutoksen torjunta on kuitenkin otettu kansainvälisellä tasolla vakavasti. Tämä on johtanut siihen, että valtiot ovat sitoutuneet päästövähennyksiin, sekä päästökauppadirektiiveihin. Samaan aikaan ydinvoima-alan toimijat ovat tunnistaneet perinteisten voimalaitosten ongelmat muuttuneessa toimintaympäristössä, jossa uusiutuvien sähköntuotantomuotojen osuus kasvaa nopeasti. SMR-teknologia, jossa yhdistyy yksinkertaisuus, modulaarisuus, pieni koko, sekä jo olemassa olevat teknologiat, mahdollistavat kustannustehokkaan ja turvallisen voimalaitoksen rakentamisen.

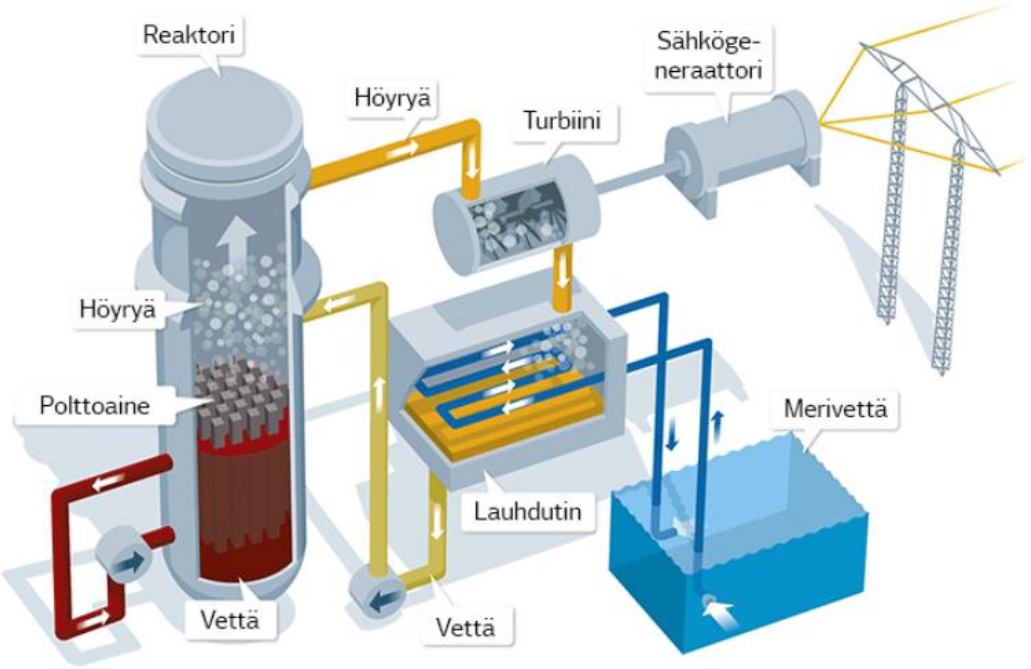
Suomen kaltaisessa kylmässä maassa on suuri tarve kaukolämmölle ja tähän tarpeeseen kehitetyllä pienellä ja modulaarisella reaktorilla, voitaisiin tuottaa hiilidioksidineutraalia kaukolämpöä kustannustehokkaasti, vuosikymmeniksi eteenpäin.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutustua SMR-konsepteihin ja mitoittaa karkeasti, tarvittava jälkilämmönpoistoputkisto 2 MW lämpöteholla toimivalle reaktorille. Teoriaosuudessa keskitytään kevytvesiteknologiaan, sillä ensimmäisten kaukolämpöreaktorien voidaan olettaa olevan tähän teknologiaan pohjautuvia (Ahonen et al. 2020).

Teoriaosuudessa käydään läpi ydinvoimalaitoksen toimintaperiaate yleisellä tasolla, sekä käydään läpi sisäisen putkivirtauksen lämmönsiirron teoriaa, jota hyödynnetään työn mitoitusosiossa.

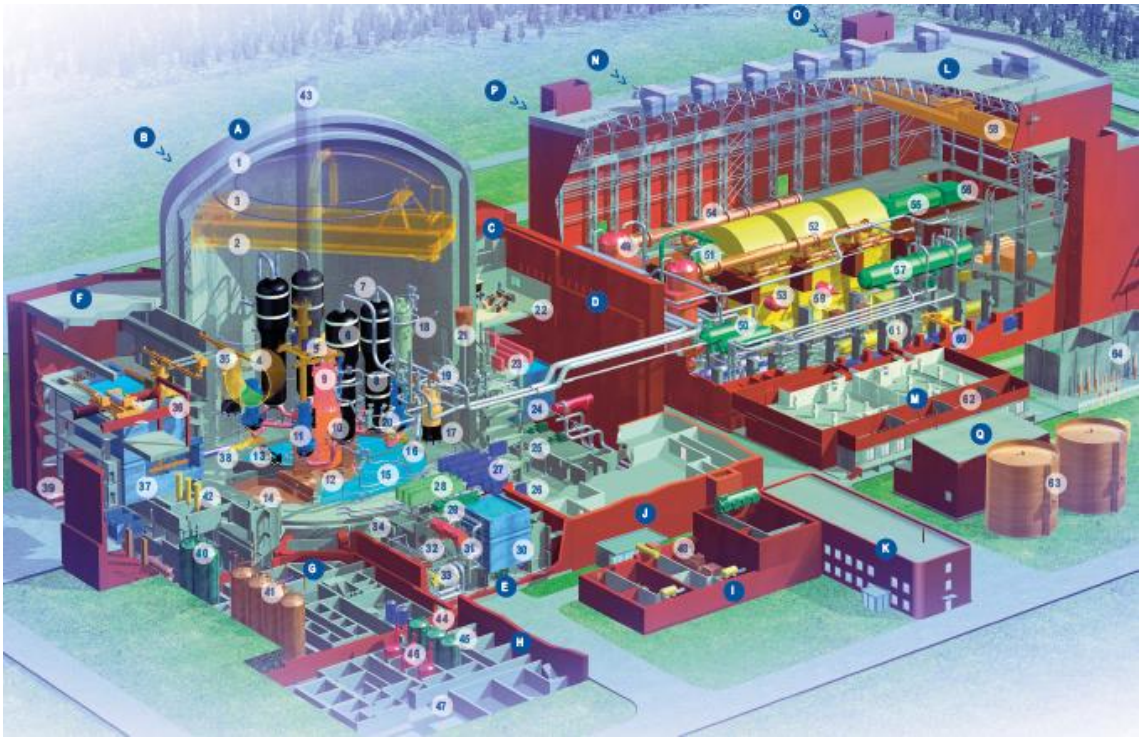
2 YDINVOIMALAITOS

Ydinvoimalaitos on sähkön- ja lämmön tuotantoon tarkoitettu lämpövoimalaitos, jossa lämpö syntyy ydinreaktorissa tapahtuvissa fissioreaktioissa. Voimalaitosteknisesti ydinvoimalaitokset eroavat tavallisia polttoaineita polttavista laitoksista vähän. Käytännössä niin ydinvoimalaitokset kuin perinteisetkin laitokset tuottavat sähköenergiaa samalla periaatteella. Vettä höyrystetään lämmönlähteellä ja tulistettu höyry ohjataan turbiinille, joka pyörittää generaattoria. Kuvassa 1 on esitetty kiehutusvesireaktorin toimintaperiaate.



Kuva 1. Kiehutusvesireaktorin toimintaperiaate. (Vattenfall 2020.)

Isoista ydinvoimalaitoksista tulee kuitenkin helposti hyvin monimutkaisia, sillä ydinturvallisuuden varmistamiseksi kaikissa olosuhteissa, on turvallisuusjärjestelmien oltava toisistaan riippumattomia ja tämän tavoitteen saavuttamiseksi joudutaan rakentamaan useita rinnakkaisia, eri toimintaperiaatteisiin perustuvia järjestelmiä. Alla olevassa kuvassa 2 on Olkiluoto-3 laitoksen halkileikkauskuva.



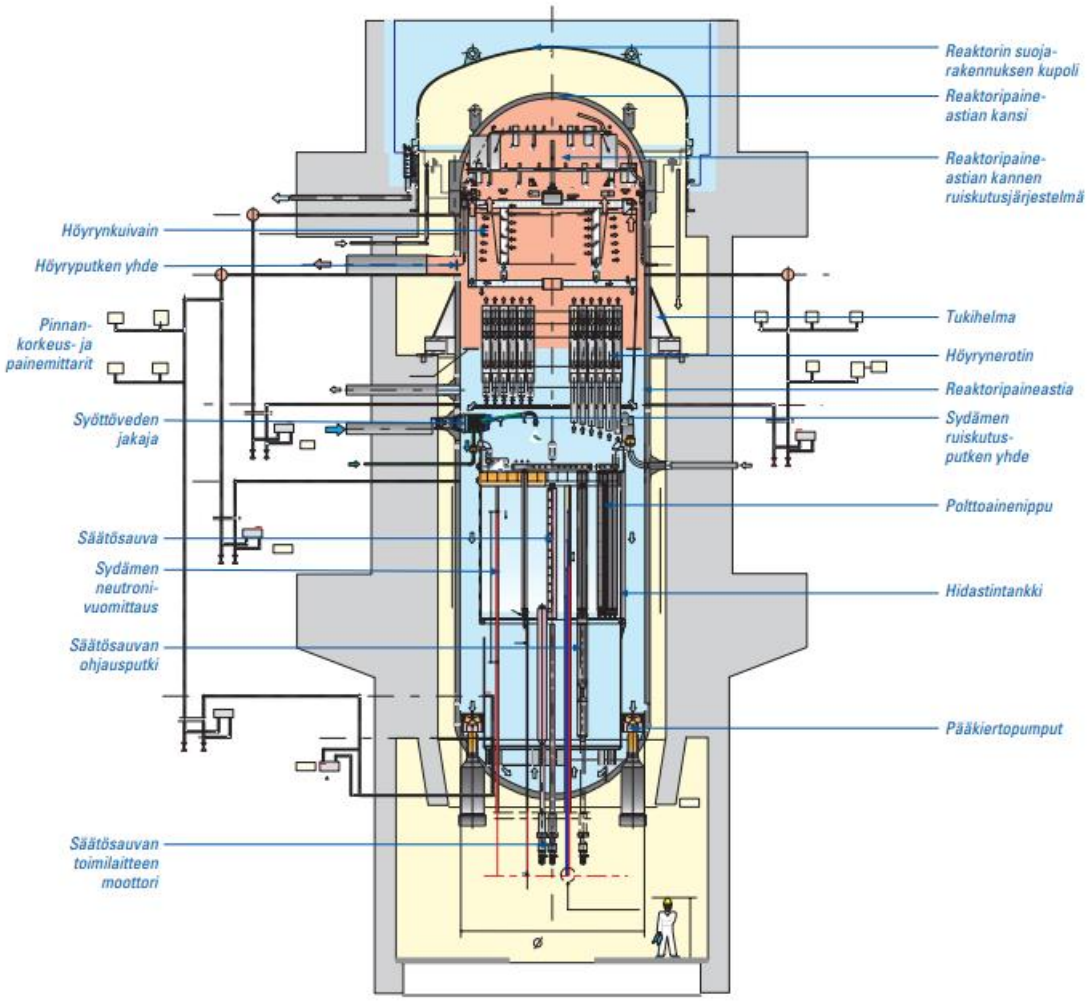
Kuva 2. Olkiluoto 3 halkileikkauskuva. (Muokattu. TVO 2020)

Isojen laitosten rakentaminen on osoittautunut haasteelliseksi, sillä laitosten rakentamisessa kestää pitkään ja suurten pääomakustannusten myötä taloudelliset riskit ovat korkeat. Ilmastonmuutoksen luoma tarve hiilidioksidineutraalille sähkö- ja lämpöenergialle on kuitenkin suurempi kuin koskaan aikaisemmin. Nämä tekijät yhdessä, ovat luoneet kiinnostuksen pienille ja modulaarisille reaktoreille, joiden komponentteja voitaisiin valmistaa sarjatuotannolla ja asentaa paikan päällä. Pienen tehotiheyden ansiosta pienet reaktorit on mahdollista rakentaa paljon nykyisiä laitoksia turvallisemmiksi, jolloin ne soveltuisivat mahdollisesti kaupunkien kaukolämmönlähteeksi, ilman perinteisen ydinvoimalaitoksen vaatimaa isoa suojavyöhykettä (STUK 2020, s 19.)

2.1 Ydinreaktori

Ydinreaktori on ydinvoimalaitoksen merkittävin ydintekninen komponentti. Käytännössä kaikki muut voimalaitoksen komponentit pois lukien polttoaineen jäähdytys-, käsittely- ja varastointijärjestelmät, löytyvät myös perinteistä vastapainelaitoksista. Kuvassa 3

halkileikkaus Olkiluoto-2 reaktorin paineastiasta. Ydinreaktoreita on erilaisia, mutta Suomessa ja maailmalla käytössä olevilla perinteisillä tehoreaktoreilla on käytännössä samat pääkomponentit kuten pääkiertopumput, reaktoripaineastia, säätösauvat ja niiden toimilaitteet, höyrystin, moderaattori, sekä tietenkin polttoaineniput.



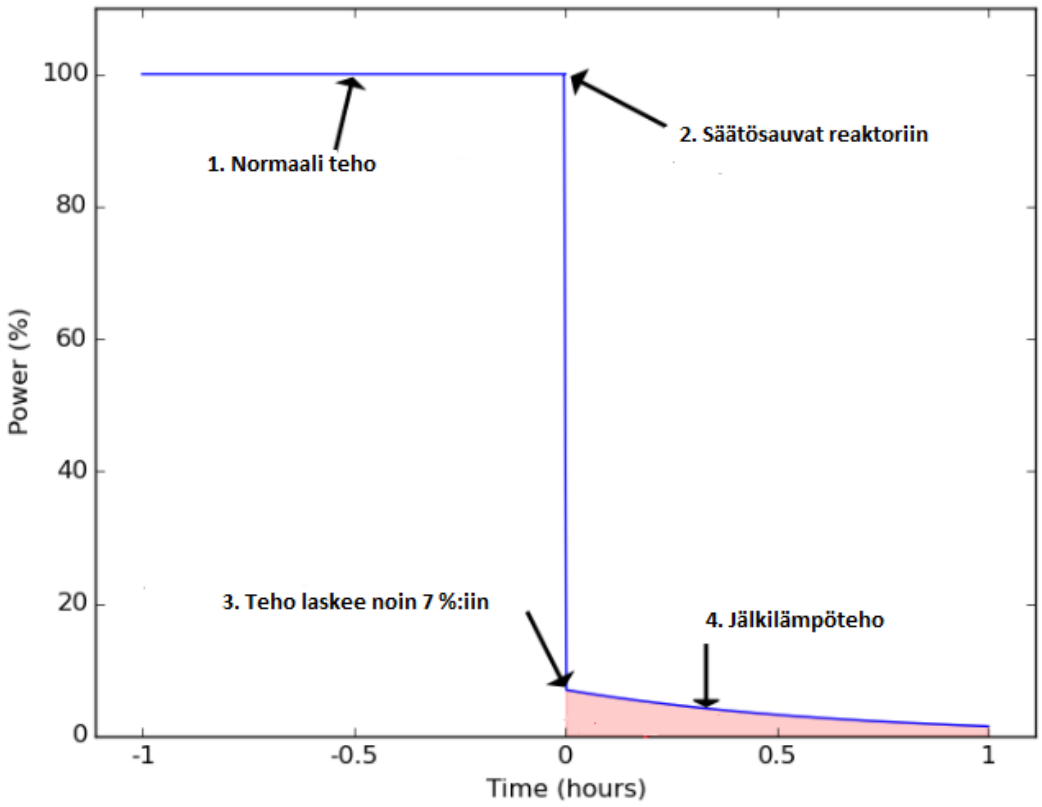
Kuva 3. Olkiluoto-2 kiehutusvesireaktorin paineastian halkileikkauskuva. (TVO, Ydinvoimalaitosyksiköt OL-1 ja OL-2.)

Ydinreaktorin toiminta perustuu hallittuun fissioketjureaktioon. Fissioketjureaktiossa fissiilin ytimen hajoamisessa vapautuvat neutronit indusoivat uusia hajoamisreaktioita fissiileissä atomiytimissä, jotka taas hajotessaan vapauttavat uusia neutroneita reaktoriin. Jos neutronien lukumäärä pysyy vakiona, pysyy reaktorin fissionopeus ja edelleen teho vakiona. Kevytvesireaktoreissa kiertoaineena toimiva vesi toimii myös reaktorin

moderaattorina. Moderaattorin tehtävänä on hidastaa fissioreaktiossa vapautuvat nopeat neutronit termiselle tehoalueelle, jolloin ne aiheuttavat uusia fissioreaktioita erityisen tehokkaasti. (Kalli 2010, s. 55.)

2.2 Reaktorin jälkilämpöteho

Käytön aikana ydinreaktoriin kertyy fissiotuotteita ja nämä fissiotuotteet jatkavat hajoamistaan vielä reaktorin sammuttamisen jälkeen. Lämpötehoa, joka muodostuu fissiotuotteiden hajotessa sammuttamisen jälkeen, kutsutaan jälkilämpötehoksi. (Kalli 2010, 33.) Kuvassa 4 On havainnollistettu reaktorin tehon käyttäytymistä ennen sammuttamista ja sammuttamisen jälkeen.



Kuva 4. Reaktorin suhteellinen teho säätösauvojen laskemisen aikana. (Muokattu. Touran.)

Jälkilämpöteho on heti säätösauvojen laskemisen jälkeen noin 7 % koko lämpötehosta ja riittäisi sulattamaan polttoaineen ilman jäähdytystä. Tunnin kuluttua reaktorin pysäyttämisestä jälkilämpöteho on noin 1,3 % ja kuukauden päästä noin 0,1 %. (Eurasto et al. 2004, s. 40). Polttoaineen eheyden varmistamiseksi on siis erittäin tärkeää, että

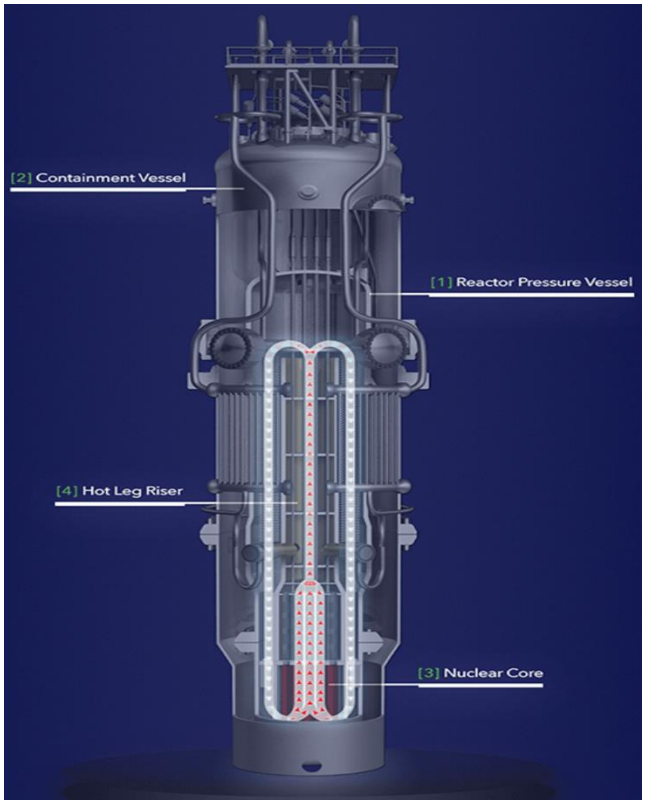
jälkilämmönpoisto on toteutettu luotettavasti. Jälkilämpötehon ajallista käyttäytymistä käsitellään tarkemmin jälkilämmönpoistoputkiston mitoituksen yhteydessä.

3 SMR- REAKTORIT

IAEA: n (International Atomic Energy Agency) määritelmän mukaan lyhenne SMR tulee sanoista small and medium sized- tai modular reactor. Tällaiset reaktorit ovat tavallisesti suurimmillaan sähköteholtaan 300 MW, modulaarisia, sekä pääasiassa rakennettavissa tehtaissa, jolloin valmiit komponentit kuljetettaisiin rakennuspaikalle asennettaviksi. (IAEA, 2018, s.1.) Modulaarisuus tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että pieniä reaktoreita voidaan rakentaa useita rinnakkain, jolloin sähkö- ja lämpötehoa voidaan kasvattaa joustavasti tarpeen mukaan. Pienempien laitosyksiköiden voidaan myös olettaa valmistuvan huomattavasti nopeammin, kuin suurempien laitosten, jolloin rahoituskustannukset jäävät pienemmiksi. SMR-teknologia on siten myös useampien tahojen saavutettavissa (Mäkelä, 2019, s. 14).

3.1 NuScale

NuScale-reaktori on yhdysvaltalaisen NuScale Power Inc.-yhtiön suunnittelema SMR. Yksittäisen moduulin sähkötehoksi ilmoitetaan 60 MW ja lämpötehoksi 160 MW. Jokaisella moduulilla on myös oma laitosinfrastruktuurinsa sekä turbiini. Reaktori on niin sanottu integroitu painevesireaktori. Tämä tarkoittaa sitä, että höyryntuottojärjestelmä on paineastian sisällä. Alla olevassa kuvassa 5 on NuScalen sylinterimäinen astia. SMR:issä integroidut ratkaisut ovat yleisiä ja nämä ratkaisut ovatkin keskeisimpiä eroavaisuuksia perinteisiin voimalaitoksiin verrattuna. NuScale paineastian halkaisija on 3 metriä ja korkeus 17,8 metriä. Koko järjestelmä on ulomman suoja-astian sisällä. Ulomman astian halkaisija 4,5 metriä ja korkeus 23,1 metriä. Reaktorin jäähdytteenä toimiva vesi kiertää luonnonkierrolla, jolloin pumppuja ei tarvita. Reaktorin merkittävänä turvallisuusominaisuutena mainitaan sen kyky selvitä rajoittamaton aika ilman sähkövirtaa tai käyttöhenkilökunnan toimintaa. Laitoksen moduulit ovat riippumattomia toisistaan ja esimerkiksi polttoaineen vaihto vaikuttaa vain yhteen moduuliin kerrallaan. Ohjausjärjestelmä on täysin digitaalinen. (Mäkelä, 2019, s.15.)



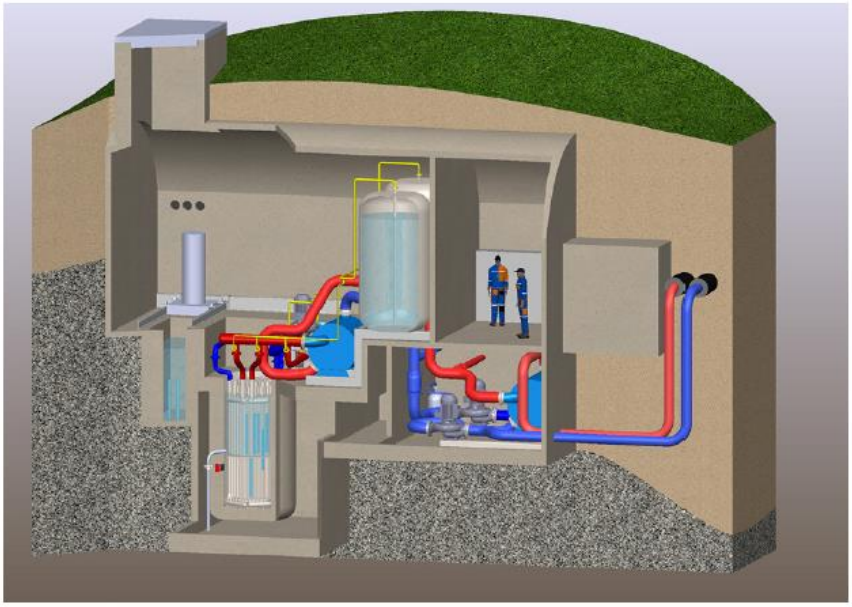
Kuva 5. NuScale moduuli. (NuScale.)

NuScale voimalassa on suunnitelmien mukaan tilaa 12 moduulille ja tällainen laitos tuottaisi sähköä 720 MW teholla. Itse voimalaitos koostuisi pääasiassa kahdesta turbiini-generaattori-rakennuksesta, joissa on molemmissa 6 kappaletta turbiini-generaattori-yhdistelmiä, ohjaushuoneen sisältävästä rakennuksesta, jätteenkäsittelyrakennuksesta, jäähdytystorneista, kytkentäkentästä, käytetyn polttoaineen varastointialueesta, sekä reaktorirakennuksesta. Moduulien lisäksi reaktorirakennukseen tarvitaan moduulien purkamiseen ja kokoamiseen, sekä polttoaineen käsittelyyn tarvittavat laitteet. Kaikki moduulit upotettaisiin samaan altaaseen omiin osastoihinsa. Moduulien päälle asetettaisiin betonilevyjä biologiseksi suojaksi ja käytetty polttoaine varastoitaisiin erilliseen altaaseen. (Mäkelä, 2019, 17.)

Kuva 6. NuScale-laitoksen reaktorirakennus. (NuScale.)

3.2 FinReactor- voimalaitoskonsepti

FinReactor on Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston suunnittelema kaukolämmöntuotantoon tarkoitettu SMR-konsepti. Laitos olisi kevytvesiteknologiaan perustuva, lisäksi laitoksessa hyödynnettäisiin jo nyt käytössä olevaa polttoainetta, jolloin sen tuottamalle jätteelle voidaan käyttää nykyisiä jätehuoltoratkaisuita. Lisäksi laitoksessa hyödynnettäisiin teollisesti valmistettavia standardiosia. Laitos olisi yksinkertainen, modulaarinen ja se sijoitettaisiin maan alle, mikä lisää konseptin turvallisuutta. Yksinkertainen rakenne helpottaa myös laitokseen kohdistuvaa sääntelyä. FinReactorissa olisi matala paine ja lämpötila (180 °C ja 1,5 MPa) ja sen lämpöteho olisi vain 24 MW. (Mäkelä, 2019, 30.) Kuvassa 7 on FinReactor-konsepti.



Kuva 7. FinReactor-laitos. Alkuperäinen kuva LUT-Ydintekniikka. (Ahonen et al, 2020.)

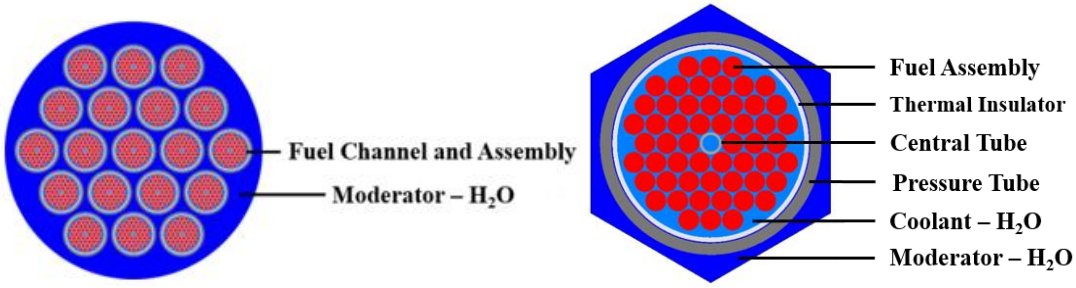
Reaktorin sijoitus maanpinnan alapuolelle suojaa laitosta ulkoisilta uhilta ja maaperä toimii myös fyysisenä esteenä radioaktiivisuuden leviämiselle onnettomuustilanteissa. Lisäksi reaktorin jälkilämpö voitaisiin poistaa maaperään. (Thinh Truong, et al. 2020, s.2)

Ydinreaktorin suunnitteleminen vain kaukolämmöntuotantoa varten vähentää rakentamis- ja ylläpitokustannuksia merkittävästi, sillä esimerkiksi turbiinisaareketta ei tarvita lainkaan, sillä sähköä ei tuoteta. Kaukolämmöntuotannossa ei tarvita myöskään korkeita paineita, jolloin paineastiaa ei, joko tarvita ollenkaan tai sitä koskevat vaatimukset ovat huomattavasti pienemmät verrattuna tavallisiin isoihin laitoksiin. Kaukolämpöreaktoria voidaan käyttää myös kaukokylmän tuotantoon. Rakentamisen kustannustehokkuuteen vaikuttaa myös yleisesti SMR:iin liitettävät hyödyt kuten sarjatuotannon mahdollisuus. (Mäkelä, 2019, s. 37.)

3.3 LUT Heat Experimental Reactor (LUTHER)

LUTHER on LUTissa suunniteltu, skaalautuva reaktoriydin-konsepti, joka on tarkoitettu erityisesti kaukolämmöntuotantoon. LUTHER on tehotiheydeltään alhainen, painekanava kevytvesireaktori, joka on suunniteltu matalalle lämpötilalle ja paineelle. LUTHERin tarkoituksena olisi toimia 150-180 °C lämpötiloissa ja 1,25 MPa:n paineessa

primääripiirissä. LUTHERin polttoainekokoonpano perustuu muokattuun VVER-1000 Robust Westinghouse Fuel Assemblyyn. (Thinh Truong, 2020, s.38.) Kuvassa 8 vasemmalla kaaviokuva reaktorisydämen kokoonpanosta ja oikealla kaaviokuva polttoainekanavasta.



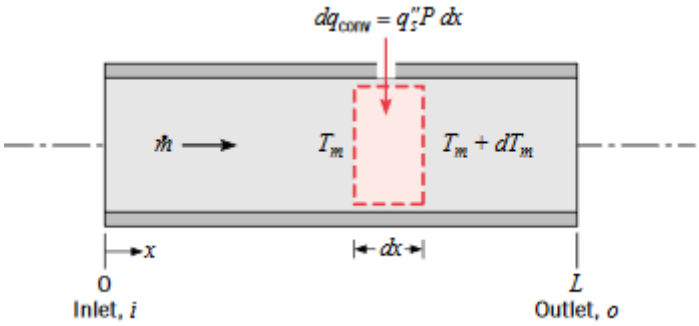
Kuva 8. LUTHER reaktorisydämen kokoonpano vasemmalla ja oikealla polttoainekanava.(Thinh Truong, 2020.)

Ytimen reaktiivisuutta säädeltäisiin nostamalla tai laskemalla polttoaine-elementtejä, jolloin tavanomaisia säätösauvoja tai liuotettavaa booria ei tarvittaisi ollenkaan. Konseptin tarkoituksena on yksinkertaistaa reaktorisydäntä ja sen järjestelmiä mahdollisimman paljon, sillä kaukolämpöreaktorit sijoitetaan suhteellisen lähelle asutusta.(Thinh Truong, 2019, s. 38.)

4 LÄMMÖNSIIRTO

4.1 Putkilämmönsiirto vakiopintalämpötilassa

Jos putken seinämän lämpötila oletetaan olevan maaperän lämpötilassa, voidaan putken differentiaalisen elementin lämmönsiirto laskea konvektion avulla seuraavasti. (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 497). Kuvassa 9 lämpöä siirtyy konvektiivisesti virtaukseen, mutta jäähdytysputken tapauksessa lämpöä poistuu.



Kuva 9. Putken differentiaalisen elementin konvektiivinen lämmönsiirto. (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 497).

Jos lämpöä siirtyy tai poistuu putkesta vain konvektiivisesti, voidaan differentiaalisen elementin lämmönsiirto kuva 9, määrittää yhtälöllä:

$$dq_{konv} = \dot{m}c_p[(T_m + dT_m) - T_m] \tag{1}$$

joka voidaan lyhentää muotoon:

$$dq_{konv} = \dot{m}c_p dT_m \tag{2}$$

jossa, T_m keskimääräinen lämpötila [°C],

$\dot{m}$ massavirta [kg/s],

c_p virtauksen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK].

Konvektiolämmönsiirron nopeus on Newtonin jäähdytyslain mukaisesti:

$$q''_s = h(T_m - T_s) \tag{3}$$

jossa, $T_s$on putken pinnan lämpötila [°C].

Nyt putken differentiaalisen elementin keskimääräisen lämpötilan muutos saadaan, kun jaetaan yhtälön 2 molemmat puolet differentiaalisella pituudella *dx* ja ratkaistaan termi $\frac{dT_m}{dx}$, saadaan:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{dq_{konv}}{\dot{m}c_p dx} \tag{4}$$

Toisaalta konvektiolämmönsiirto differentiaalielementtiin voidaan laskea lämmönsiirtopinta-alan ja Newtonin jäähdytyslain avulla

$$dq_{konv} = q_s'' P dx \tag{5}$$

jossa, $P = \pi d$ putkelle.

Yhdistämällä yhtälöt 3, 4 ja 5, saadaan differentiaalielementin keskimääräisen lämpötilan muutos ilmaistua konvektion avulla:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h(T_m - T_s) \tag{6}$$

Vakio pintalämpötilan tapauksessa keskimääräisen lämpötilan muutos voidaan määritellä, putken seinän T_s ja putken keskimääräisen lämpötilan $T_m$avulla seuraavasti:

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{d(\Delta T)}{dx} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h\Delta T \tag{7}$$

jossa $\Delta T = T_m - T_s$,

Seuraavaksi integroidaan muuttujat putken sisääntulosta ulostuloon:

$$\int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m}c_p} \int_0^L h\, dx \tag{8}$$

Keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $\bar{h}$ [W/m^{2}K] on määritelty seuraavasti: (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 353)

$$\bar{h}_L = \frac{1}{L} \int_0^L h\, dx \tag{9}$$

Tällöin voidaan muokata yhtälö 8 muotoon:

$$\int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{PL}{\dot{m}c_p}\frac{1}{L}\int_0^L h\,dx \tag{10}$$

Integroidaan yhtälön 10 vasen puoli ja yhdistää yhtälöt 8 ja 9, saadaan:

$$\ln\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = -\frac{PL}{\dot{m}c_p}\,\bar{h}_L \tag{11}$$

Korottamalla yhtälön 11 molemmat puolet *e* kantaiseen potenssiin saadaan:

$$\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = \frac{T_{m,out} - T_s}{T_{m,in} - T_s} = e^{\left(-\frac{PL\,\bar{h}_L}{\dot{m}c_p}\right)} \tag{12}$$

Kun $PL = A$ [m^2]. Saadaan:

$$\frac{T_{m,o} - T_s}{T_{m,i} - T_s} = e^{\left(-\frac{A\,\bar{h}_L}{\dot{m}c_p}\right)} \tag{13}$$

Josta voidaan ratkaista putken ulostulolämpötila $T_{m,out}$:

$$T_{m,out} = T_s + \left(T_{m,in} - T_s\right) e^{\left(-\frac{A\,\bar{h}_L}{\dot{m}c_p}\right)} \tag{14}$$

4.2 Konvektiolämmönsiirtokertoimen määritys

Veden konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi on ensiksi laskettava virtauksen Nusseltin luku *Nu*. Nusseltin luvun laskemiseksi on kuitenkin ensin selvitettävä virtauksen Reynoldsin ja Prandtlin luvut. Nusseltin luvun määritelmä putkigeometrialle on:

$$Nu = \frac{h d_{sisä}}{\mathrm{k}_{vesi}} \tag{15}$$

jossa h konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m^2K],

$d_{sisä}$ putken karakteristinen pituus [m],

k_{vesi} veden lämmönjohtavuus [W/mK].

Reynoldsin luku putkigeometrialle voidaan laskea yhtälöllä:

$$Re = \frac{d_{sisä} v}{\mu_{kin}} \quad (16)$$

jossa $d_{sisä}$ putken karakteristinen pituus [m],

v virtauksen nopeus [m/s],

μ_{kin} kinemaattinen viskositeetti [m^2/s].

Prandltin luku voidaan ratkaista yhtälöstä:

$$Pr = \frac{c_p \, \mu}{k_{vesi}} \quad (17)$$

Jossa c_p virtauksen ominaislämpökapasiteetti,

μ dynaaminen viskositeetti [Ns/m^2]

Nusseltin luku putkivirtaukselle jäähdytystilanteessa voidaan ratkaista Dittus-Boelterin-yhtälöstä:

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}3} \quad (18)$$

joka on voimassa vain, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

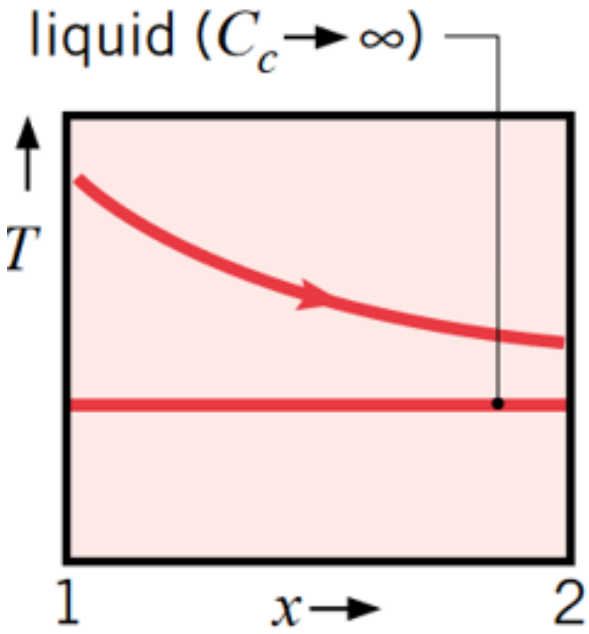
$0{,}6 \leq Pr \leq 160$,

$Re \geq 10\,000$,

$\frac{L}{D} \geq 10$

4.3 Höyrystimen lämmönsiirto

Tilanne, jossa putken seinämä on vakiolämpötilassa vastaa tilannetta, jossa putki höyrystää vettä. Koska vesi höyrystyy vakiolämpötilassa, voidaan putken ajatella olevan yksivirtalämmönvaihdin. (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 724.)



Kuva 10. Höyrystimen lämpötilaprofiili (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 680.)

Lämmönvaihtimen tehokkuus ε kuvaa todellisen lämmönsiirron suhdetta maksimilämmönsiirtoon (Incropera, & DeWitt, 2002, s. 687.)

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_s} \tag{19}$$

Höyrystimen ja lauhduttimen erikoistapauksissa lämpötila pysyy vakiona putken toisella puolella, tällöin tehokkuus on määritelty lämmönvaihtimen geometriasta riippumatta seuraavasti:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \tag{20}$$

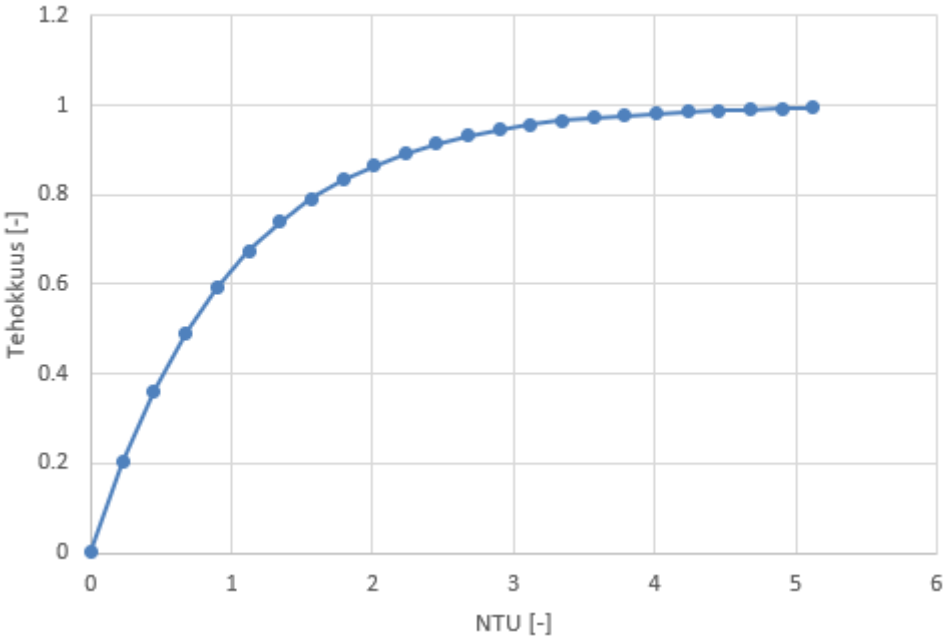
Jossa, NTU (number of transfer units) on dimensioton parametri. NTU on määritelty:

$$NTU = \frac{\bar{U}A}{\dot{m}c_p} \tag{21}$$

jossa $\bar{U}$ on kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K],

A lämmönsiirtopinta-ala [m^2].

Lämmönsiirtoyksiköiden (NTU), kasvaessa lämmönvaihtimen tehokkuus kasvaa kuvan 11 mukaisesti. NTU kasvaa, kun terminen resistanssi pienenee tai kun putken pituutta kasvatetaan, jolloin lämmönsiirtopinta-ala kasvaa. Massavirtaa kasvattamalla tehokkuus ε laskee, mutta lämpöä siirtyy enemmän.



Kuva 11. Tehokkuus-NTU-kuvaaja haihdutin geometrialle.

Nyt jos yhdistetään yhtälöt 19. 20. Ja 21. Saadaan:

$$\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_s} = 1 - e^{\left(-\frac{\bar{U}A}{\dot{m}c_p}\right)} \tag{22}$$

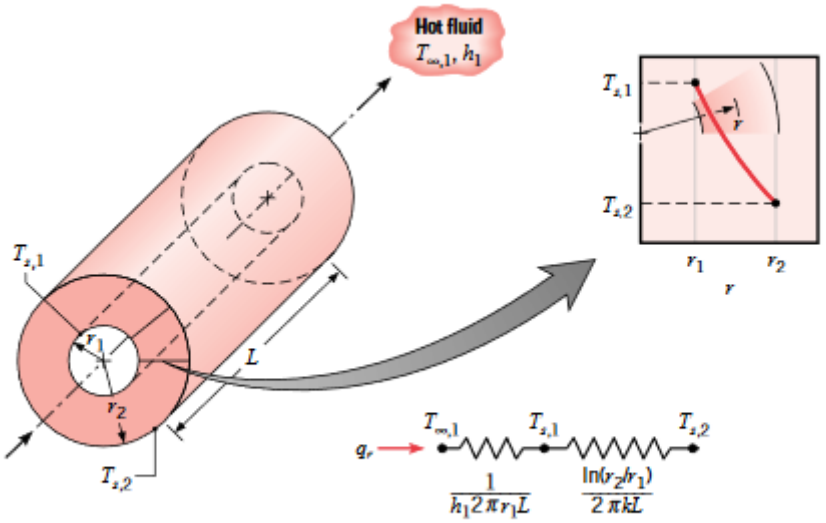
Josta voidaan ratkaista virtauksen loppulämpötila T_{out}.

$$T_{out} = T_s + (T_{in} - T_s)\, e^{\left(-\frac{\bar{U}A}{\dot{m}c_p}\right)} \tag{23}$$

Yhtälöstä 23 voidaan huomata, että se on samaa muotoa kuin yhtälö 14. Erona on se, että keskimääräisen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen sijaan käytetäänkin keskimääräistä kokonaislämmönsiirtokerrointa $\overline{U}$.

4.4 Kokonaislämmönsiirtokeroimen määritys

Kokonaislämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi on ensin laskettava kokonaisresistanssi.



Kuva 12. Putkigeometrian termiset resistanssit. (Muokattu. Incropera, & DeWitt, 2002, s. 680.)

Putkilämmönvaihtimelle kokonaisresistanssi voidaan laskea resistanssien sarjaan kytkentänä:

$$R_{tot} = \sum_{i=1}^{n} R_i = \frac{1}{UA} \tag{24}$$

jossa *R* on lämpövastus [K/W]

Maaperään asetetun putkigeometrian tapauksessa otetaan huomioon veden ja putken välinen konvektiivinen vastus, putkimateriaalin sisäinen johtumisvastus, sekä maaperän

johtumisvastus. Koska lämpövastukset ovat sarjassa, voidaan kokonaislämpövastukselle kirjoittaa yhtälö:

$$R_{tot} = R_{vesi} + R_{putki} + R_{maa} \tag{25}$$

Virtauksen konvektiivinen resistanssi saadaan yhtälöstä:

$$R_{vesi} = \frac{1}{h_{vesi}A} \tag{26}$$

Putken terminen resistanssi voidaan ratkaista yhtälöstä: (Incropera, & DeWitt, 2002, s.117).

$$R_{putki} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L k_{putki}} \tag{27}$$

Maaperän terminen resistanssi eristämättömälle haudatulle putkelle kuvassa 13, voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä: (ASHRAE, 2016, kappale 12.7.)

$$R_s = \frac{ln(2z/r_o)}{2\pi k_{maa}} \tag{28}$$

jos seuraava ehto on voimassa,

$$\frac{z}{r_o} > 4$$

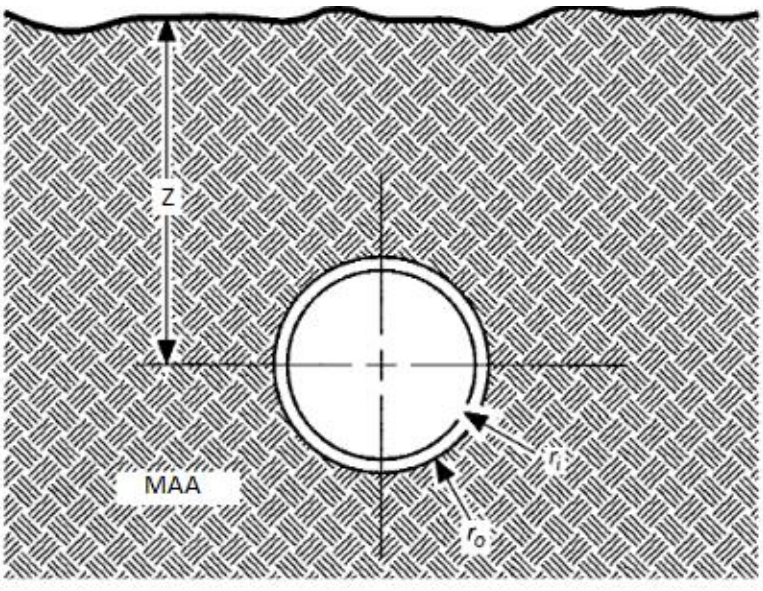
jossa

z putken keskikohdan hautaussyvyys [m],

k_{maa} maaperän lämmönjohtavuus [W/mK],

r_o putken ulkosäde [m],

r_i putken sisäsäde [m].



Kuva 13. Haudattu eristämätön putki. (Muokattu. ASHRAE, 2016, kappale 12.7.)

Tällöin kokonaisresistanssiksi saadaan yhdistämällä yhtälöt 26, 27 ja 28:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_{vesi}A} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L k_{putki}} + \frac{ln(2z/r_o)}{L2\pi k_{maa}} \tag{29}$$

Jossa h_{vesi} on veden konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K],

A lämmönsiirtopinta-ala [m^2],

L putken pituus [m],

k_{putki} putken lämmönjohtavuus [W/mK],

k_{maa} maaperän lämmönjohtavuus [W/mK],

Yhdistämällä yhtälöt 24 ja 29 saadaan kokonaislämmönsiirtokertoimen ja lämmönsiirtopinta-alan tulolle lauseke:

$$UA = \left[\frac{1}{h_{vesi}A} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L k_{putki}} + \frac{ln(2z/r_o)}{L2\pi k_{maa}}\right]^{-1} \tag{30}$$

4.5 Painehäviöt

Putken kitkakerroin voidaan ratkaista iteratiivisesti Colebrookin yhtälöstä:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon/d_{sisä}}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{31}$$

jossa, f kitkakerroin [-] ja

ε putken sisäpinnan karheus [m].

Kun putken kitkakerroin tunnetaan, voidaan suoran putken painehäviö laskea yhtälöllä:

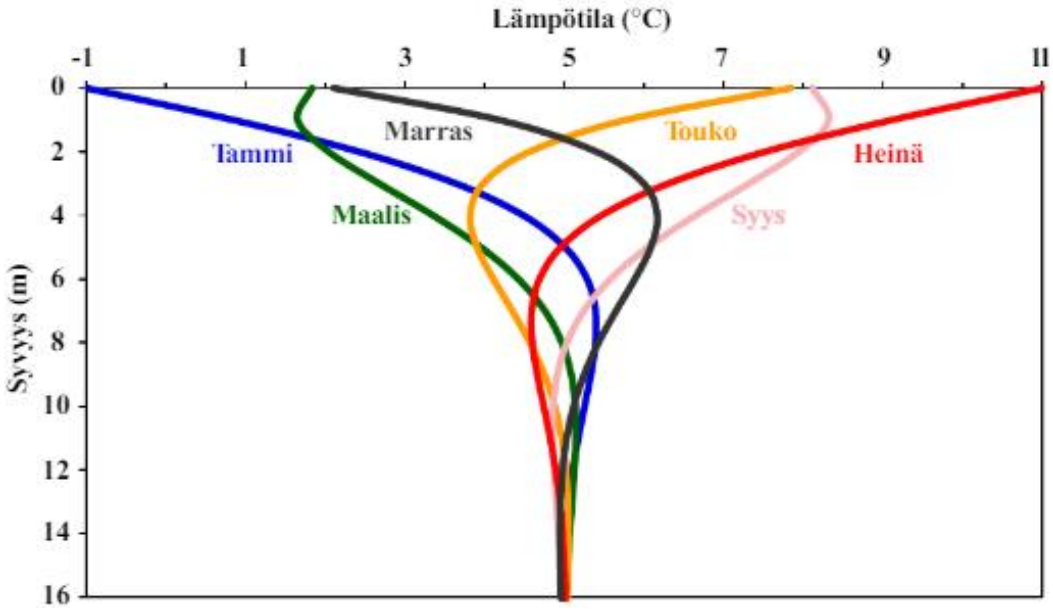
$$\Delta p_{häviö} = f\frac{L}{d_{sisä}}\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{32}$$

5 JÄLKILÄMMÖNPOISTOPUTKISTON MITOITUS

Jälkilämpöä voidaan poistaa reaktorista useilla eri menetelmillä ja tässä työssä tarkasteltava ratkaisu on vain yksi monista mahdollisista vaihtoehdoista. Jälkilämmönpoistopiiri suunnitellaan asennettavaksi maaperään vaakasuuntaisilla putkistoilla.

jälkilämmönpoistopiiri on käytännössä putkisto, joka asennetaan maa- tai kallioperään. Kun putkeen ohjataan kuumaa vettä, siirtyy lämpöä vedestä putken materiaalin läpi maaperään, jolloin putkessa olevan veden lämpötila laskee. Tämä jäähtynyt vesi ohjataan takaisin reaktorin välipiirin lämmönvaihtimelle, jonka jälkeen vesi tekee uuden kierroksen jäähdytyspiirissä.

Jäähdytyspiiri täytyy asentaa niin syvälle maaperään, että vältytään mahdollisen jäätymisen aiheuttamilta ongelmilta. Maaperän pintakerroksen lämpötilaan vaikuttaa ulkolämpötila, Kuvasta 14 voidaan havaita, että jo metrin syvyydessä voidaan saavuttaa roudattomat olosuhteet. Maan pintakerroksen maa-ainekset ja rakenteet vaikuttavat huomattavasti lämmön johtumiseen maaperässä. Lisäksi kallioperän etäisyys ja mahdollinen pohjavesi on otettava huomioon asennussyvyyttä määritettäessä. Käytännössä maaperän lämpötekniset ominaisuudet on mitattava ja varmistettava työmaalla, jotta asennussyvyys saadaan selville. Lopullisessa asennussyvyyden määrittelyssä on otettava huomioon myös mahdolliset muut turvallisuuteen vaikuttavat seikat, kuten maanjäristykset ja tulvat. Tässä työssä putken asennussyvyydeksi on valittu yksi metri.



Kuva 14. Maaperän pintakerroksen lämpötila syvyyden funktiona (Leppäharju, 2008.)

5.1 Mitoitusteho

Polttoaineen jäähdytyksen varmistamiseksi jälkilämmönpoistopiiri on mitoitettava poistettavan jälkilämpötehon mukaan. Jos reaktorin lämpöteho on 2 MW on poistettava maksimijälkilämpöteho tällöin 7 % lämpötehosta eli 140 kW. Taulukossa 1. On 2, 24 ja 120 MW lämpöteholla toimivien reaktorien maksimijälkilämpötehot.

Taulukko 1. Jälkilämpötehot.

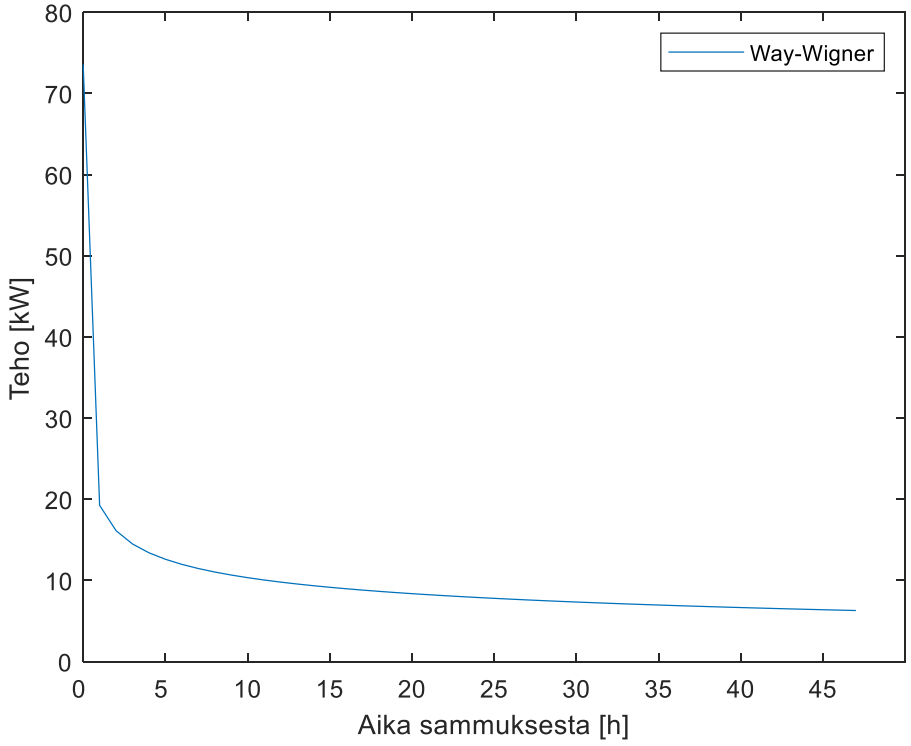
MW	7 %	7 %
2	0,14	140
24	1,68	1680
120	8,4	8400

Jälkilämpötehoa voidaan arvioida Way-Wignerin (W-W) jälkilämpötehon yhtälöllä:

$$P_{WW} = 0.0657 P_0 [t^{-0.2} - (t+T)^{-0.2}] \quad (32)$$

W-W on voimassa aikavälillä $10s < t$.

Yhtälössä P_0 on reaktorin lämpöteho ja T on aika, jonka reaktori on ollut käynnissä teholla P_0. Pieni t kuvaa aikaa, mikä on kulunut reaktorin sammutuksesta. Todellisuudessa jälkilämpötehon käyttäytyminen vaihtelee eri reaktorityyppien välillä ja tämä tarkastelu antaa vain suurusluokan, missä alustavia laskuja voidaan tehdä.



Kuva 15. Way-Wignerin yhtälön jälkilämpöteho P_{WW} ajan t suhteen. Missä T = 120d [s].

Kuvasta 15 voidaan havaita, että jälkilämpöteho laskee eksponentiaalisesti, jolloin myös jäähdytysputkiston kuormitus pienenee erittäin nopeasti.

5.2 Oletukset ja materiaalit

Lämmönsiirtoputken mitoitustehoksi $Q_{mitoitus}$ on valittu 140 kW, joka vastaa 2 MW teholla toimivan reaktorin maksimijälkilämpötehoa. Jäähdytteen sisääntulolämpötilaksi $T_{sisään}$ on valittu 90 °C Virtauksen paine on 1 bar. Maan lämpötila T_{maa} on 15 °C. Jäähdytteen aineominaisuudet ovat paineen ja lämpötilan funktioita, jotka on arvioitu Xsteam-funktioiden avulla virtauksen keskimääräisessä lämpötilassa T_m. Jäähdytysputkeksi on valittu sileä, paksuudeltaan 3 mm oleva putki. Alkuarvot ja laskennassa materiaalit on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Alkuarvot ja materiaalit

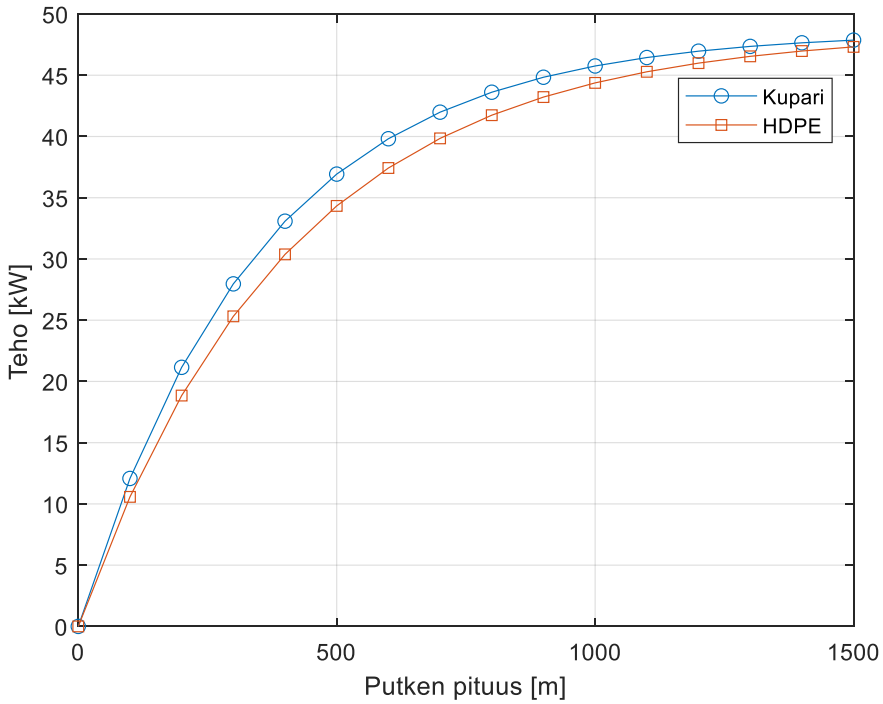
Suure	Lukuarvo	Yksikkö
Q	2	MW
Q_j	82	kW
$T_{sisään}$	90	°C
T_{maa}	15	°C
b	3	mm
ϵ	0,00015	-
λ_{Cu}	401	W/mK
k_{HDPE}	0,47	W/mK
k_{maa}	1.5	W/mK
p	1	bar

6 TULOSTEN TARKASTELU

Putken jäähdytystehoon vaikuttaa pääasiassa jäähdytteen lämpötila, maaperän lämpötila, putken pituus, sekä putken halkaisija. Tässä kappaleessa on tarkasteltu eri parametrien vaikutusta jäähdytystehoon, kun muut arvot on vakioitu.

6.1 Putkimateriaalin ja maaperän vaikutus

Maaperän ominaisuudet vaihtelevat paljon kosteuden ja koostumuksen mukaan. Tässä työssä lämmönjohtavuutena on käytetty k_{maa} = 1.5 W/mK (Indra & Clarke, 2010 s.2.) Putki on ohut ja sen terminen resistanssi suhteessa maaperän termiseen resistanssiin on hyvin pieni materiaalista riippumatta. Kuvassa 16 on verrattu HDPE- ja kupariputken jäähdytystehoa toisiinsa.



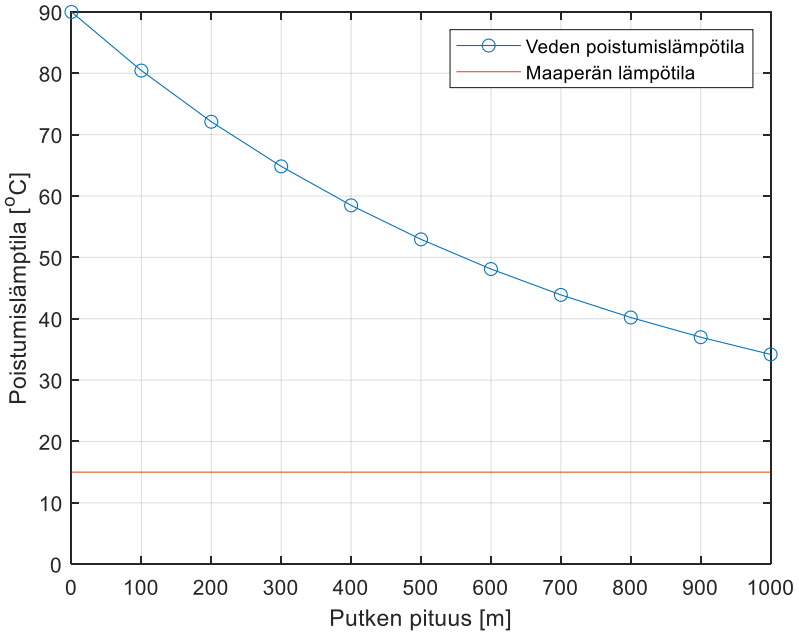
Kuva 16. HDPE- ja kupariputken lämmönsiirron vertailu. Virtausnopeus 0.5 m/s. Sisähalkaisija 2 cm.

Vaikka kuparin lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin HPDE-muovilla, on erot jäähdytystehossa pienet. Tämä käyttäytyminen johtuu maaperän alhaisesta lämmönjohtavuudesta, joka on kohtalaisen lähellä HDPE:n lämmönjohtavuutta, joka

vaihtelee 0,35–0,49 W/mK välillä (Polymer database, 2020). Jos maaperän lämmönjohtavuutta parannetaan esimerkiksi käyttämällä maakerroksia, jotka johtavat paremmin lämpöä, saadaan kupariputken parempi lämmönjohtokyky paremmin hyödynnettyä. Maaperän lämmönsiirtoon vaikuttaa myös kosteus, jota on vaikea arvioida ilman tarkkaa tietoa maaperän ominaisuuksista, HDPE-putket ovat edullisia, mutta tällaisen putkijärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon maksimi käyttölämpötilat sillä muovin lujuusominaisuudet ovat vahvasti lämpötilaan sidottuja. Tästä syystä mitoitus on suoritettu kupariputkille.

6.2 Putken pituuden vaikutus

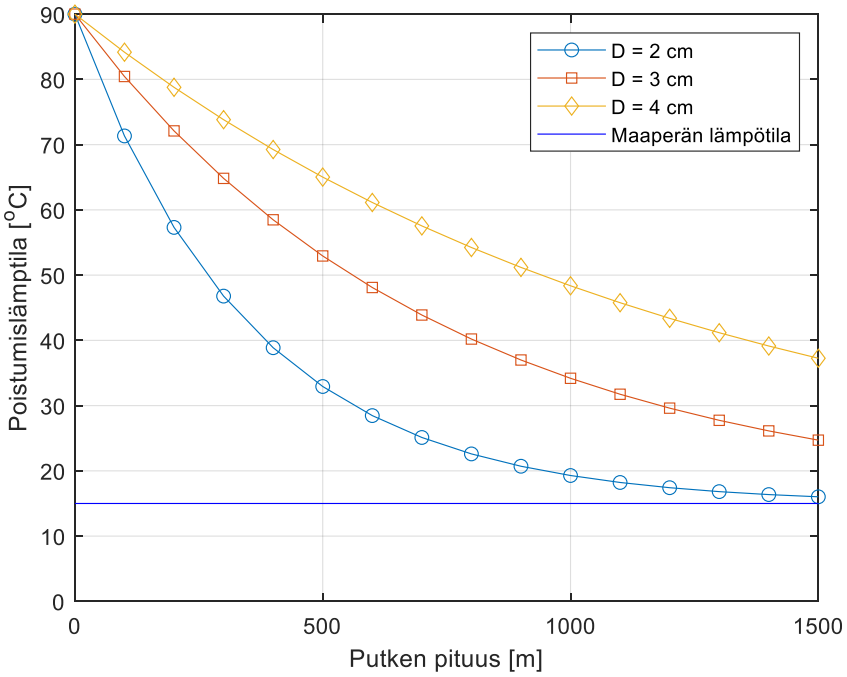
Putken jäähdytysteho kasvaa, kun putken pituus kasvaa. Tämä johtuu siitä, että putken pituuden kasvaessa putken lämmönsiirtopinta-ala kasvaa, jolloin virtaus on kontaktissa viileän putken kanssa pidemmän aikaa. Kuvasta 17 huomataan, että jos putken pituutta kasvatetaan huomattavasti, putken pituuden vaikutus häviää. Tämä johtuu siitä, että putken virtauksen lämpötila lähestyy maaperän lämpötilaa, jolloin lämmönsiirto virtauksen ja maaperän välillä on lähes olematonta.



Kuva 17. Putken poistumislämpötila pituuden funktiona. Virtausnopeus 0,5 m/s. Sisähalkaisija 3 cm. Lämpötilaprofiili on muodoltaan sama kuin höyristingeometrialla.

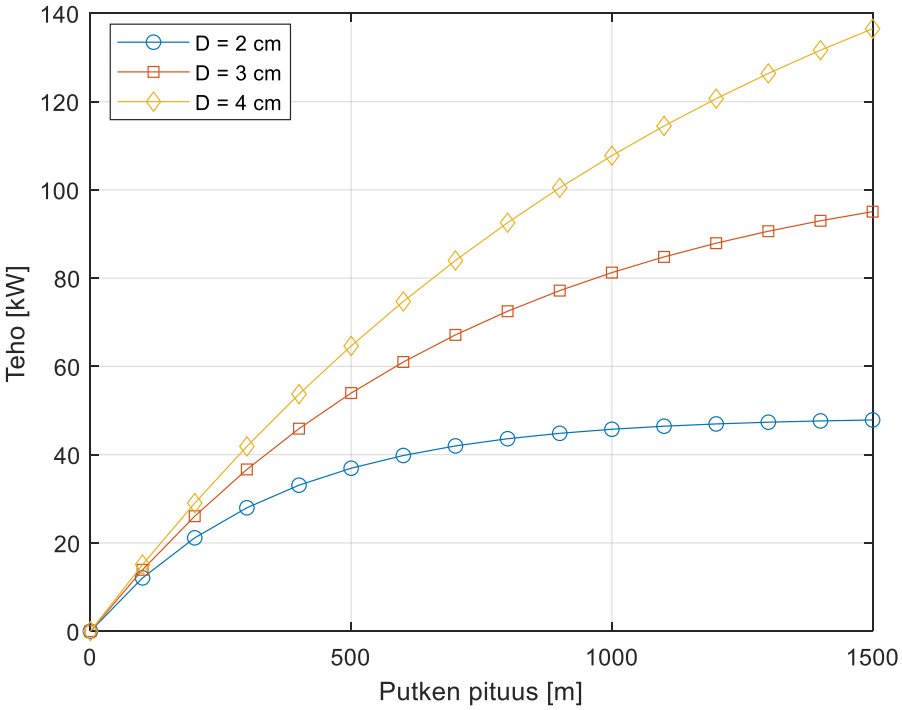
6.3 Putken halkaisijan vaikutus

Kun virtausnopeus pidetään vakiona ja muuttujaksi valitaan putken sisähalkaisija, huomataan, että virtauksen ulostulolämpötila kasvaa, kun putken halkaisija kasvaa. Tämä johtuu siitä, että virtauksen massavirta kasvaa enemmän suhteessa lämmönsiirtopinta-alaan. Tällöin virtauksen lämpötila laskee hitaammin. Kuvassa 18 on esitetty putken ulostulolämpötila pituuden funktiona.



Kuva 18. Putken halkaisijan vaikutus putken poistumislämpötilaan. Virtausnopeus 0,5 m/s.

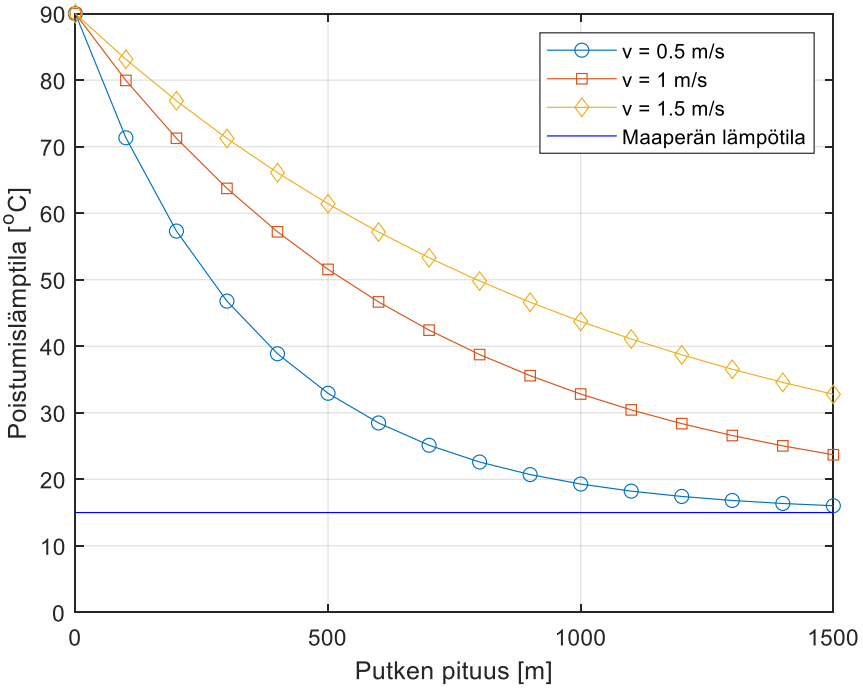
Koska virtauksen lämpötila laskee hitaammin, pysyy virtauksen ja putken välinen lämpötilaero korkeampana. Tämä lämpötilaero taas johtaa parempaan jäähdytystehoon, kuva 19. Erikokoisten putkien jäähdytystehoissa on siis suuria eroja varsinkin pidemmillä putkipituuksilla. Halkaisijaltaan pienten putkien lämpötilaero lähestyy nollaa jo lyhyillä putkipituuksilla, kun taas halkaisijaltaan suuri putki voidaan rakentaa varsin pitkäksi.



Kuva 19. Putken halkaisijan vaikutus jäähdytystehoon. Virtausnopeus 0,5 m/s.

6.4 Virtausnopeuden vaikutus

Jos putken halkaisija pidetään vakiona ja tarkastellaan putken virtausnopeuden vaikutusta putken ulostulolämpötilaan, havaitaan, että putken ulostulolämpötila kasvaa virtausnopeuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että virtausnopeuden ollessa suurempi, putkessa virtaava neste on kosketuksissa putken seinämän kanssa vähemmän aikaa, jolloin putkessa virtaavan nesteen lämpötila laskee hitaammin. Sisähalkaisijaksi on nyt valittu 2 cm kuvaajien piirtämistä varten.

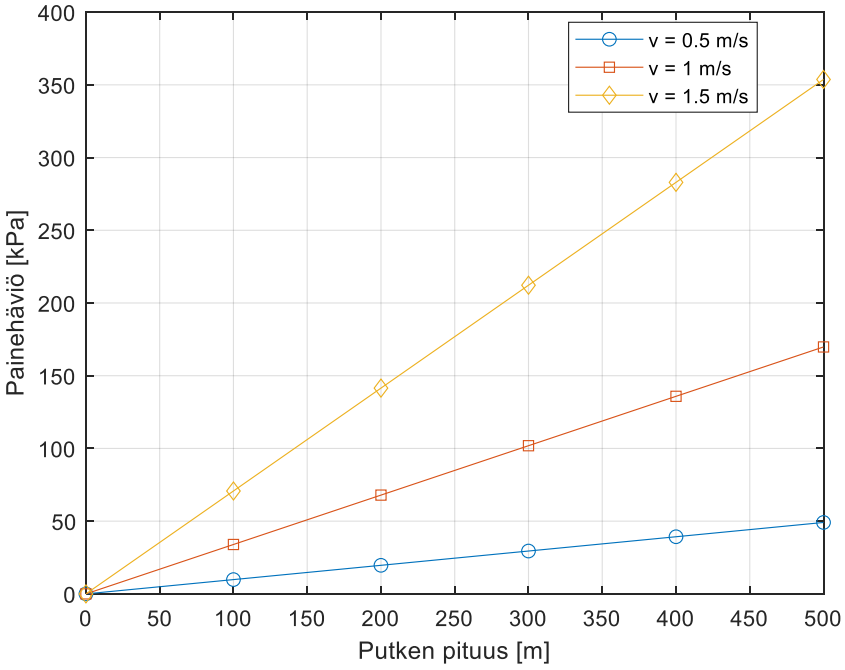


Kuva 20. Virtausnopeuden vaikutus putken poistumislämpötilaan. Putken sisähalkaisija 2 cm.

Vaikutus lämpötilaeroon on siis hyvin samankaltainen kuin putken halkaisijan tapauksessa. Korkeampi lämpötilaero johtaa parempaan jäähdytystehoon. Kuvista 19 ja 20 voidaankin todeta, että virtausnopeutta ja halkaisijaa kasvattamalla voidaan parantaa putken jäähdytystehoa, varsinkin pidemmillä putkipituuksilla.

6.5 Painehäviöt

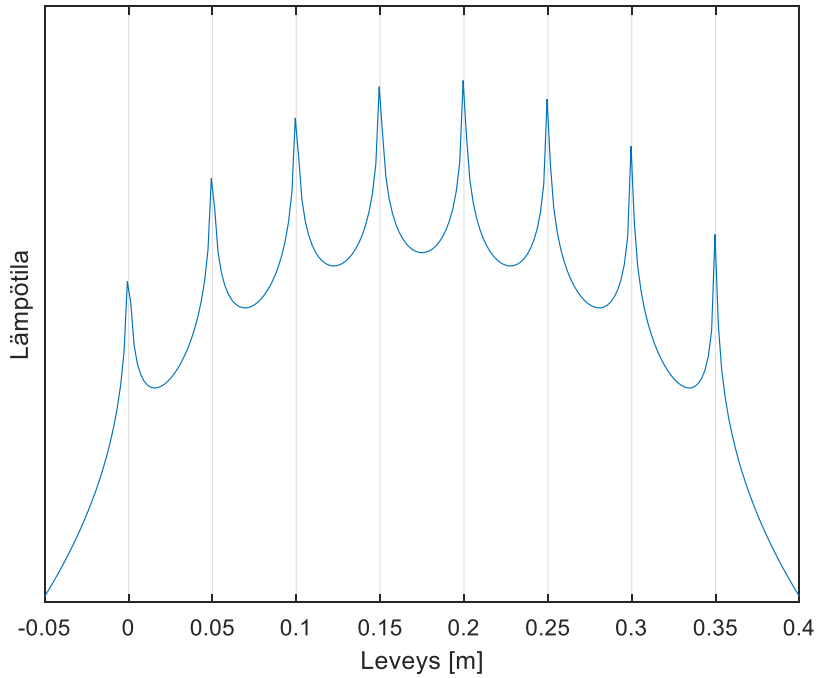
Putken virtausnopeutta ja pituutta ei voida kuitenkaan kasvattaa rajattomasti, sillä virtauksen painehäviöt kasvaisivat liian suuriksi. Suurin sallittu painehäviö riippuu loppujen lopuksi suunnittelijan prioriteeteista, mutta on järkevää mitoittaa putkijärjestelmä niin, että jäähdytystehon suhde painehäviöihin pysyy kohtuullisena. Suuret painehäviöt vaativat enemmän pumppaustehoa, joka johtaa suurempiin kokonaiskustannuksiin. Alla olevassa kuvaajassa on laskettu painehäviöt pituuden funktiona. Painehäviöt on laskettu kaavalla 32 ja putki on oletettu suoraksi.



Kuva 21. Suoran putken painehäviöt pituuden funktiona. Putken halkaisija 3 cm.

6.6 Putkien välisen etäisyyden vaikutus

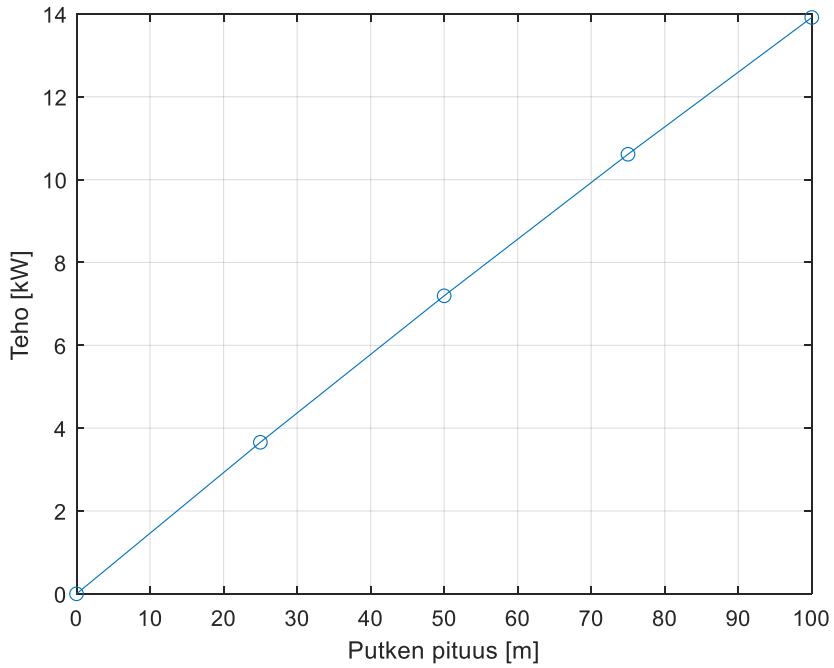
Useamman jäähdytysputken asentaminen rinnakkain vaikuttaa yksittäisen putken lämmönsiirtoon huomattavasti. Tässä työssä on laskettu vain yksittäisen putken lämmönsiirtoa ja oletuksena on riittävä etäisyys rinnakkaisiin putkiin. Jos putket asennetaan lähelle toisiaan, lähestyy lämmönsiirto levyn lämmönsiirtoa, jossa keskellä olevat putket ovat jäähdytysteholtaan huonoimpia. Rinnakkainen ratkaisu on kuitenkin tehokas sillä se vie huomattavasti vähemmän tilaa ja putkia voidaan asentaa paljon. Kuvassa 22. on (Claesson, & Dunand 1983, s. 41) esittämällä yhtälöllä muodostettu rinnakkaisten putkien aiheuttama maan lämpötilaprofiili metrin syvyydessä.



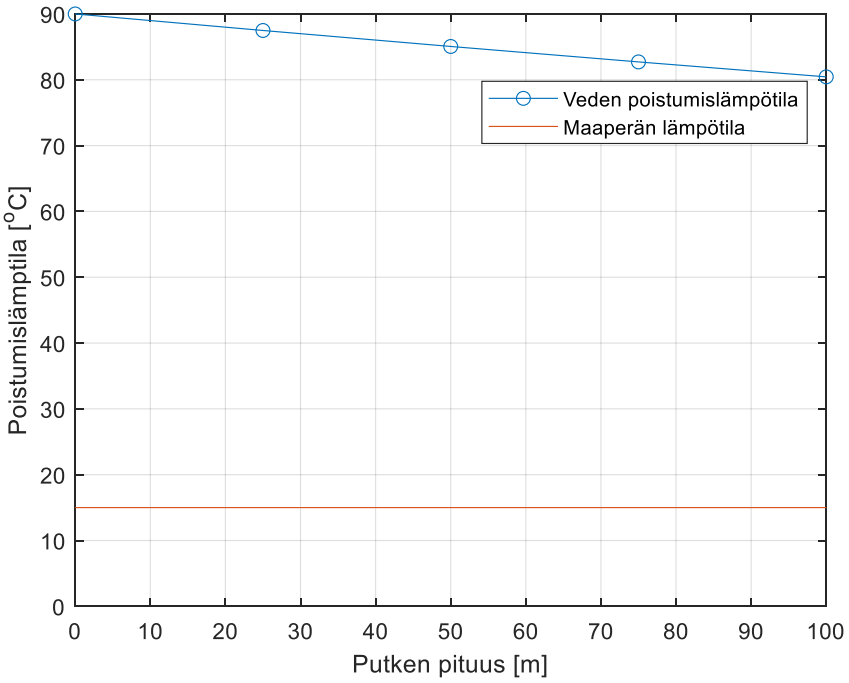
Kuva 22. Putkien välisen etäisyyden vaikutus ympäristön lämpötilaan.

6.7 Tulosten yhteenveto

Nyt jos yhden putken sallittu painehäviö on esimerkiksi noin. 10 kPa, virtausnopeus 0,5 m/s ja sisähalkaisija 3 cm. Tällöin yksittäisen putken pituudeksi tulisi 100 m. Alla olevassa kuvassa on esitetty tällaisen putken jäähdytysteho pituuden funktiona. Kuvasta 23 nähdään, että 100 metrin putkella saavutetaan noin 14 kW jäähdytysteho ja putken ulostulolämpötila olisi noin 80 ℃. Jälkilämpötehon poistamiseksi tarvittaisiin siis 10 rinnakkaista putkea 140 kW jäähdytystehon saavuttamiseksi. Tulokset on koottu taulukkoon 3.



Kuva 23. Yksittäisen putken jäähdytysteho teho putken pituuden funktiona. Virtausnopeus 0.5 m/s. Sisähalkaisija 3 cm.



Kuva 24. Veden poistumislämpötila putken pituuden funktiona. Virtausnopeus 0.5 m/s. Sisähalkaisija 3 cm.

Taulukko 3. Tulokset.

Suure	Lukuarvo	Yksikkö
v	0,5	m/s
q_m	0,34	kg/s
T_m	85	℃
ρ	968,6	kg/m3
cp	4,2	kJ/KgK
k_{vesi}	0,67	W/mK
μ	0,32	Pas
Re	4.36E+04	-
Pr	2,02	-
Nu	146,23	-
h	3.27E+03	W/m^2K
L	100	m
R_{kok}	0,005	K/W
f	0,02	-
Δp	8,9	kPa
Q_j	13,92	kW

Ratkaisussa on pyritty arvioimaan mitoitusteho tarpeeksi suureksi, jotta jäähdytyspiirin pituudeksi saataisiin konservatiivinen arvio. Tässä laskentamallissa on otettu huomioon vain yhden putken aiheuttama lämpöhäviö, eikä rinnakkaisten putkien vaikutusta ole huomioitu. Lisäksi maaperän lämpenemistä ei ole mallinnettu ja todellisuudessa maaperän lämpeneminen heikentäisi putkien lämmönsiirtoa jonkin verran. Maaperän 15 ℃ Lämpötila on todellista maaperänlämpötilaa korkeampi. Tällä valinnalla oli tarkoituksena kompensoida juuri maaperän lämpenemisen aiheuttamaa heikennystä lämmönsiirtoon.

Putkijärjestelmä voisi koostua myös useista halkaisijaltaan pienemmistä rinnakkaisista putkista, joilla on alhainen virtausnopeus. Tällöin kuitenkin lämmönsiirto rinnakkaisen järjestelmän ja maanpinnan välillä olisi lähempänä levyn lämmönsiirtoa kuin onton sylinterin, tämä tarkoittaa siis sitä, että tämän työn laskentamalli vaatisi konduktiivisen

lämmönsiirron muotokertoimen muuttamista antaakseen hyväksyttäviä tuloksia rinnakkaisen järjestelmän jäähdytystehosta. Tässä työssä on siis keskitytty vain yksittäisen putken lämmönsiirtoon, jolloin rinnakkaisten putkien välissä on oltava riittävästi tilaa.

Turvallisuusteknisestä näkökulmasta on putkia oltava enemmän, jotta mahdollisesti epäkunnossa, tai huollossa olevat putket eivät vaarantaisi jälkilämmönpoistoa reaktorista. Tallaisia putkijärjestelmiä voisi olla esimerkiksi 2, jolloin puolet putkista voisivat olla pois käytöstä ja jäähdytysteho olisi silti riittävä. Tarvittavien putkien lukumäärään vaikuttaa myös reaktorin ominaisuudet. Esimerkiksi iso reaktoriallas voi absorboida suuren määrän lämpöenergiaa, jolloin pienempikin jäähdytysjärjestelmä riittäisi jälkilämmön poistoon.

Kaikki edellä mainitut tekijät huomioiden on tässä työssä virtausnopeudeksi valittu 0,5 m/s, ja pituudeksi 100 metriä. Eri kokoiset järjestelmät ovat tietenkin mahdollisia ja tässä onkin kyse vain siitä, että kuinka monta putkea järjestelmään halutaan, sillä teho skaalautuu ylöspäin putkia lisäämällä. Alkuarvoilla ja oletuksilla lasketut tulokset esitettynä taulukossa 3. Valituilla alkuarvoilla ja oletuksilla putkia tarvittaisiin 10 kappaletta, jotta saavutettaisiin 80 kW jäähdytysteho.

7 YHTEENVETO

Isoista ydinvoimalaitoksista on tullut vaikeita ja investointikustannuksiltaan kalliita projekteja. Lisäksi kysyntä hiilidioksidineutraalille lämmölle on suurempaa kuin aikaisemmin. Nämä tekijät yhdessä ovat synnyttäneet kiinnostuksen SMR-konsepteihin, jotka eroavat tavallisista ydinvoimalaitoksista modulaarisen rakenteensa, sekä pienen lämpötehonsa osalta.

Teoriassa pienet ydinvoimalaitokset voidaan rakentaa tehtaalla ja koota paikan päällä. Tällöin investointikustannukset olisivat merkittävästi alemmat kuin suurilla laitoksilla. Lisäksi kaukolämmöntuotantoon suunniteltu pienreaktori olisi mahdollista sijoittaa kohtalaisen lähelle asutusta, sillä pienreaktori on mahdollista rakentaa paljon nykyisiä laitoksia turvallisemmiksi.

Kaukolämpöreaktorin jälkilämmönpoistopiiri on mahdollista rakentaa niin, että jäähdytysputket asennetaan vaakasuoraan maaperään, jolloin vesi johdetaan reaktorin primääripiiristä, välipiirin kautta jäähdytyspiiriin. Ratkaisu on myös skaalautuva, sillä putkien määrää lisäämällä voidaan poistaa suurempi lämpöteho. Tällainen ratkaisu ei ole kuitenkaan passiivinen, joten pumppujen toiminta täytyy varmistaa kaikissa olosuhteissa. Lisäksi rinnakkaisia putkijärjestelmiä tulisi rakentaa vähintään 2, jolloin toinen putkisto toimii varajärjestelmänä häiriötilanteissa.

Tämän laskentamallin tarkoituksena oli määrittää karkeasti jäähdytysjärjestelmän dimensiot ja tarkempi laskenta vaatisi käytännössä, jonkin mallinnusohjelmiston käyttöä. Mallinnusohjelmistolla olisi mahdollista tarkastella koko järjestelmää reaktorin primääripiiristä, aina maaperän lämmönsiirtoon asti. Maaperän lämmönsiirrossa keskeistä on maaperän lämmönvarastoituminen ja putkien välisen vuorovaikutuksen analysointi.

Maaperään vaakasuoraan asetettavat putket ovat hyvin yksinkertaisia ja tällaisen järjestelmän rakentamisen ja testaamisen voi olettaa olevan suoraviivaista ja kustannustehokasta. Lisäksi järjestelmän terminen vaste voidaan testata paikan päällä ja putkia voidaan lisätä tarpeen mukaan.

LÄHDELUETTELO

Leppäharju, N., 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro Gradu -tutkielma. Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Oulu.

Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N., Tuomainen, M. & Säteilyturvakeskus 2020, Edellytykset pienreaktorien turvalliselle käytölle. Saatavissa: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-309-451-2

Teollisuuden voima. 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2020]. Saatavissa: https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3/halkileikkaus.html

Teollisuuden voima. [Esite]. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. Saatavissa: https://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2(1).pdf

Kalli, H. (2010) Ydinreaktorien fysiikka osa 1. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Touran, N. [Verkkoaineisto]. Decay heat: Why you can't just turn off nuclear reactors. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa: https://whatisnuclear.com/decay-heat.html

Eurasto, T. Hyvärinen, J. Järvinen, M. Sandberg, J. & Sjöblom, K. Säteilyturvakeskus 2004. Ydinturvallisuus, kirjasarja osa 2. Ydinvoimatekniikan perusteita. ISBN951-712-507-0. Saatavilla: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf/74b3643c-419f-4381-89ff-423e406f98b1

International atomic energy agency, (IAEA), Vienna (2018). [Tekninen dokumentti]. Deployment Indicators for Small Modular Reactors, IAEA-TECDOC-1854. ISBN 978–92–0–105718–1. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1854web.pdf

Mäkelä, L. (2019). SMR (Small Modular Reactors)-selvitys. FinNuclear ry. Raportti ladattavissa: https://finnuclear.fi/smr/

NuScale Power, LLC. Kuva 5 NuScale moduuli. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.5. 2020]. Saatavissa: https://www.nuscalepower.com/technology/design-innovations.

Truong Thinh, Suikkanen Heikki, Hyvärinen Juhani. (2020). Reactor core conceptual design for a scalable heating experimental reactor, LUTHER. eISBN: 978-1-5272-6447-2. Saatavilla: https://www.physor2020.com/proceedings

INCROPERA, F. P., & DEWITT, D. P. (2002). Fundamentals of heat and mass transfer. New York, J. Wiley.

Vattenfall. 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.5.2020]. Saatavilla: https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/ydinvoima/

Hamdham, N. Indra. Clarke, G. Barry. 2010. Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils.

Polymer database. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.2.2021]. Saatavilla: https://www.polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/HDPE.html

Claesson, J & Dunand, A. 1983, Heat extraction from the ground by horizontal pipes: a mathematical analysis. BFR Documents, vol. D1:1983, vol. D1:1983, Byggforskningsrådet (BFR).

LIITTEET:

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids[a]

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)									
						k (W/m · K)/c_p (J/kg · K)									
		ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m^2/s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum															
Pure	933	2702	903	237	97.1	302 482	237 798	240 949	231 1033	218 1146					
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65 473	163 787	186 925	186 1042						
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2			174 —	185 —						
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990 203	301 1114	161 2191	126 2604	106 2823	90.8 3018	78.7 3227	3519		
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5 112	9.69 120	7.04 127							
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190 128	55.5 600	16.8 1463	10.6 1892	9.60 2160	9.85 2338				
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203 198	99.3 222	94.7 242							
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159 192	111 384	90.9 484	80.7 542	71.3 581	65.4 616	61.9 682	57.2 779	49.4 937	
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167 236	122 379	85.4 450	67.4 503	58.2 550	52.1 628	49.3 733	42.5 674		
Copper															
Pure	1358	8933	385	401	117	482 252	413 356	393 397	379 417	366 433	352 451	339 480			
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14		42 785	52 460	59 545						
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		41 —	65 —	74 —						
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95 360	137 395	149 425						
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17 237	19 362								
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232 190	96.8 290	43.2 337	27.3 348	19.8 357	17.4 375	17.4 395			