

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Välipiirin mitoitus kaukolämpöreaktorin ja
kaukolämpöverkon välille

Dimensioning intermediate circuit between heat reactor
and district heating network

Työn tarkastaja: Juhani Vihavainen

Työn ohjaaja: Juhani Vihavainen

Lappeenranta 14.5.2020

Roope Lipiäinen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Roope Lipiäinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Juhani Vihavainen

Kandidaatintyö 2019

37 sivua, 11 kuvaa ja 7 taulukkoa

Hakusanat: LUTHER, lämmönvaihdin

Ydinreaktoreita käytetään paljon sähköntuotantoon, mutta ei oikeastaan lämmöntuotantoon. Lämmöntuotannossa olisi suuri potentiaali vähentää fossiilisia polttoaineita korvaamalla vanhoja laitoksia ydinreaktoreilla.

Pienet modulaariset reaktorit (SMR) soveltuisivat hyvin pelkästään lämmöntuotantoon. Tällöin voitaisiin käyttää pienempiä lämpötiloja ja paineita, jolloin laitoksista saadaan halvempia ja turvallisempia.

Tämän työn tavoitteena on tehdä esimerkkimitoitus välipiirille, joka siirtää lämpöä LUT Heat Experimental reaktorin (LUTHER) ja kaukolämpöverkon välillä. Välipiirin mitoitukseen kuuluu kaksi lämmönvaihdinta ja pumppu. Välipiiri toimii yhtenä leviämissestänä.

Lämmönvaihdin tyypiksi valikoitui vaippa ja putkilämmönvaihdin, koska ne ovat yleisesti käytettyjä teollisuudessa ja soveltuvia suurille tilavuusvirroille.

Työssä ei ole huomioitu välipiirin kustannuksia tai tarkemmin valmistettavuutta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	7
2 Modulaariset ydinreaktorit	8
2.1 NuScale Power Module	8
2.2 LUTHER LUT Heat Experimental Reactor	9
3 Kaukolämpö Suomessa	12
4 Välipiirin komponenttien mitoitus	14
4.1 Yhtälöt	15
4.1.1 Massavirta	15
4.1.2 Lämmönsiirtopinta-ala	16
4.1.3 Lämmönsiirtimen geometria	18
4.1.4 Putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin	22
4.1.5 Vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokerroin	23
4.1.6 Lämmönsiirtimen lämmönläpäisy-luku	26
4.1.7 Putkipuolen painehäviökorrelaatio	26
4.1.8 Vaippapuolen painehäviökorrelaatio	27
4.2 Reaktorin jäähdytteen ja välipiirin välinen lämmönvaihdin	27
4.3 Välipiirin ja kaukolämpöverkon välinen lämmönvaihdin	31
4.4 Välipiirin pumppu	33
5 Tulosten tarkastelu	34
6 Turvallisuus	35
7 Yhteenveto	36
Lähdeluettelo	37

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	$[m^2]$
A_f	putkien välinen vapaa alue märkäpiirin sisällä	$[mm]$
C	lämpökapasiteettivirta	$[W/K]$
c_p	ominaislämpökapasiteetti	$[J/kgK]$
d	putken halkaisija	$[m]$
G	massan nopeus	$[kg/smm^2]$
h	lämmönsiirtokerroin	$[W/m^2K]$
k	lämmönjohtavuus	$[W/mK]$
P	märkäpiiri	$[mm]$
q	lämpöteho	$[W]$
q_m	massavirta	$[kg/s]$
R''_f	likaantumisvastus	$[m^2K/W]$
R_i	kuuman putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin	$[W/m^2K]$
R_o	vaippapuolen terminen resistanssi	$[K/W]$
$R_{t,cond}$	johtumismuotovastus	$[K/W]$
S	putkien keskipisteiden etäisyys	$[m]$
S_B	ohjauslevyjen välimatka toisistaan	$[m]$
S_{BC}	ohjauslevyjen leikkaus	$[m]$
T	lämpötila	$[K]$

U lämmönläpäisyyluku [W/m²K]

w virtauksen nopeus [m/s]

Kreikkalaiset aakkoset

ε tehokkuus

ζ kitkakerroin karkealle putkelle

ρ tiheys [kg/m³]

μ dynaaminen viskositeetti [Ns/m²]

Dimensiottomat luvut

BC ohjauslevyjen välimatkojen suhde vaippaputken sisähalkaisijaan

C_f kitkakerroin

C_r lämpökapasiteettivirtojen suhde

E NTU-laskennan apusuure

K painehäviön kerroin

n Prandtleyn laskennan vakio

N_B ohjauslevyjen määrä

NTU lämmönsiirtoyksiköiden lukumäärä

Nu Nusseltin luku

Pr Prandtleyn luku

Re Reynoldsin luku

Alaindeksit

<i>c</i>	kylmä fluidi
<i>e</i>	ekvivalentti
<i>f</i>	likakerros/likakerroksessa
<i>h</i>	kuuma fluidi
<i>i</i>	sisä
<i>max</i>	suurin arvo
<i>min</i>	pienin arvo
<i>shell</i>	vaippa/vaipassa
<i>tot</i>	kokonais
<i>o</i>	ulko
<i>p</i>	putki/putkessa
<i>putki</i>	putki/putkessa
<i>vaippa</i>	vaippa/vaipassa
<i>w</i>	seinä/seinässä

Lyhenteet

SMR	Small modular reactor
LUTHER	LUT Heat Experimental Reactor

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tehdä karkea mitoitus välipiirille, joka siirtää lämpöä LUT Heat Experimental -konseptireaktorin ja kaukolämpöverkon välillä. Välipiiriin kuuluu kaksi lämmönvaihdinta ja pumppu. Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston ydin-tekniikan yksikkö on tehnyt alustavia laskelmia reaktorille, mutta tarkempia tuloksia lasketaan edelleen. Tavoitteenani on tehdä alustavia esimerkkilaskelmia lämmönvaihtimille.

EU on päättänyt vähentää kasvihuonepäästöjä vähintään 40 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan parlamentti 2018.) Vuonna 2017 polttoaineiden polttamisesta, pois lukien liikenne, aiheutui 54 % kasvihuonepäästöistä EU:ssa. (Eurostat 2019.)

Ydinreaktoreilla lämmöntuotannossa olisi suuri potentiaali vähentää päästöjä, koska ne eivät tuota hiilidioksidia tuottaessaan energiaa.

2 MODULAARISET YDINREAKTORIT

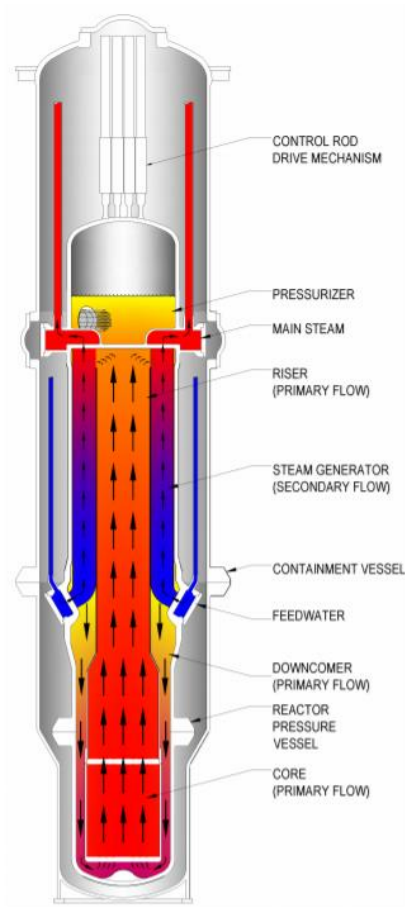
Energiantuotantoon on kehitetty pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR), joiden koko ja teho on pienempi kuin yleisesti käytössä olevat ydinreaktorit. SMR reaktorien sähköteho on noin 300 MW tai pienempi. SMR reaktorit on suunniteltu niin, että ne soveltuisivat sarjatuotantoon. Voimalaitoksen tehoa saa lisäämällä SMR reaktorien määrää. SMR reaktorilla voitaisiin taata energiantuotanto syrjäisillä alueilla. (World Nuclear Association 2019.)

Suomessa on useita satoja alle 100 MW kaukolämpötehoa tuottavia laitoksia. (Energiateollisuus 2019.) Pienen kokoluokan reaktoreille olisi paljon käyttöä Suomessa. Pieniä lämpölaitoksia voitaisiin korvata modulaarisilla reaktoreilla. (Tulkki et al. 2017.)

2.1 NuScale Power Module

Reaktori on pieni modulaarinen painevesireaktori. Moduuli koostuu reaktoriytimestä ja kahdesta kierreputkihöyrystimestä paineastian ja suojarakennuksen sisällä. Reaktori toimii luonnonkierrolla, jonka takia ei tarvita jäähdytin puppuja. Sekundääripuolella esilämmitetty syöttövesi höyrystyy ja ohjataan turbiinille tuottamaan sähköä.

Reaktori on turvallisuutta yksinkertainen rakenne ja luonnonkierto. Koko moduuli on pienikokoinen ja ylimääräisiä putkia ei tarvitse viedä reaktorin paineastian ulkopuolelle. Kuvassa 1 nähdään komponenttien sijoittelu moduuliin. Ytimen aktiivisuus on pienempi vähäisen polttoaineen määrän takia. (NuScale Power 2018.)

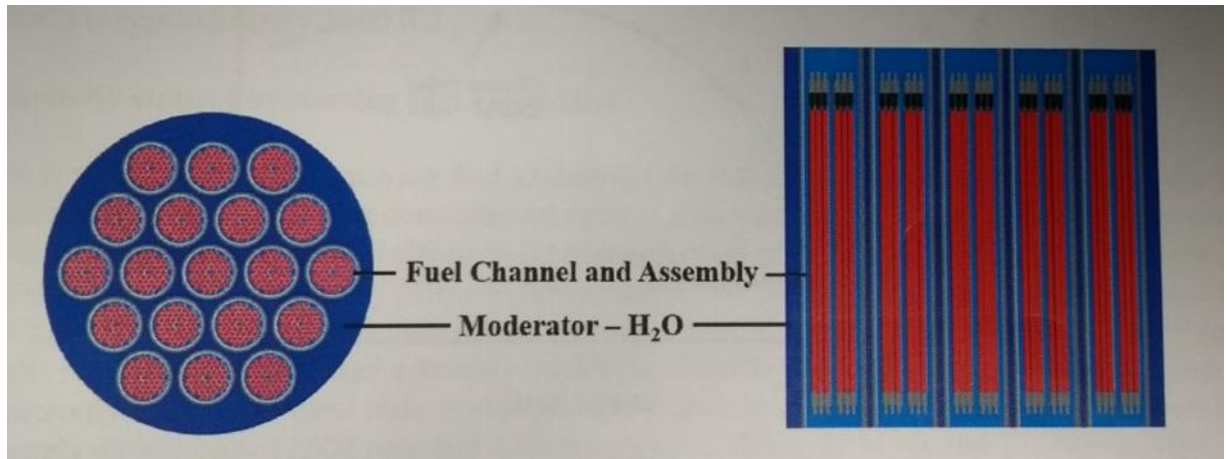


Kuva 1. NuScale Power Modulen rakenne. (Ingersol 2014.)

2.2 LUTHER LUT Heat Experimental Reactor

Tarkoituksena saada valmistettua halpa reaktori käyttäen kaupallisesti saatavia reaktorien osia. Matalat lämpötilat mahdollistavat huomattavasti halvemmat valmistuskustannukset. Pienemmän paineen voidaan hyödyntää painekanavaputkia tyypillisen paineastian sijaan. Polttoainenippuihin on rakennettu mekanismi, jolla nippu saadaan nostettua kokonaan pois kuten säätösauvat tavallisessa ydinreaktorissa. Tämä mahdollistaa palaman optimoinnin, sammutusmekanismin ja reaktiivisuuden hallintaa.

Kolme eri kokoluokkaa koereaktori 2 MW ja kaupallisiksi suunnitellut 24 MW ja 120 MW reaktorit. Reaktorit tuottavat lämpöä, joka siirretään kaukolämpöverkkoon välipiirin kautta mahdollistaen pääsyn yksittäiseen polttoaine-elementtiin esim. polttoaineaurion aikana. Kuvassa 2 esitetään polttoainenippujen asettelu reaktorissa. (Truong et al. 2020.)



Kuva 2. Polttoaine nippujen asettelu reaktorissa. (Truong et al. 2020.)

Taulukossa 1 huomataan hyvin suuret paine- ja lämpötilaerot LUTHER- ja NuScale-reaktoreiden välillä. Tämä on suuri etu LUTHER:lle valmistettavuuden ja komponenttien keston kannalta.

Taulukko 1. Modulaaristen reaktorien lukuarvoja. (Truong et al. 2020, NuScale Power 2018.)

Nimi	LUTHER		NuScale	
Lämpöteho [MW]	2	24	120	160
Aktiivinen ytimen korkeus [m]	0,48	1,05	1,82	2
Ytimen halkaisija [m]	0,48	1,05	1,82	1,51
Lämpötila sisääntulossa [°C]	150	150	150	258
Lämpötila ulostulossa [°C]	180	180	180	314
Paine [MPa]	1,25	1,25	1,25	12,8
Jäähdytteen massavirta [kg/s]	30	360	1802	586

3 KAUKOLÄMPÖ SUOMESSA

Kaukolämpö tuotetaan keskitetysti tuotantolaitoksissa. Lämpö siirretään kaukolämpöputkiverkon avulla tuotantolaitoksista asiakkaille. Siirtoaineena toimii yleensä vesi. Suomessa käytetään kaksiputkijärjestelmää eli menoputkessa kulkee lämmin vesi ja paluuputkessa kylmä vesi.

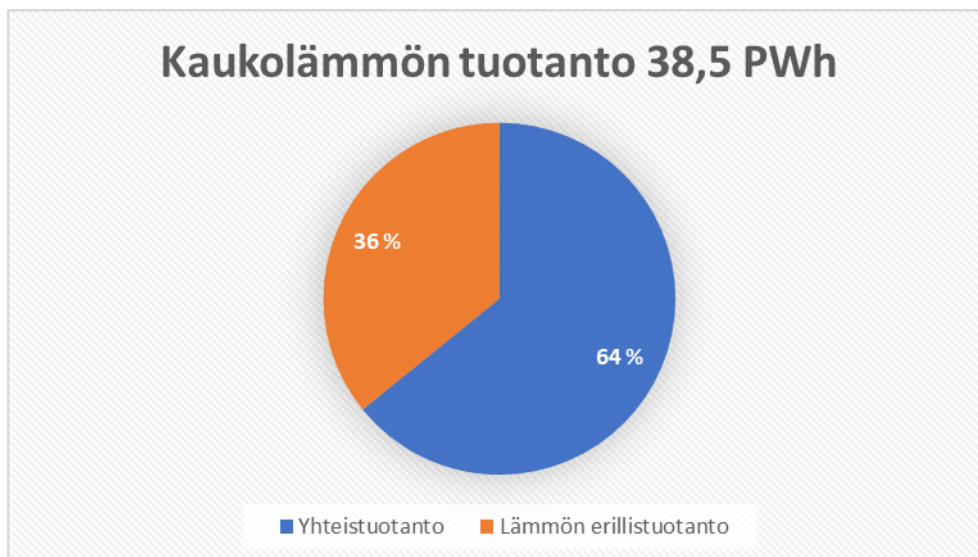
Kaukolämmitys on tehokkainta suurissa asukaskeskitymissä lyhyillä siirtomatkoilla, jolloin lämpöhäviöiden määrä on pienempi.

Keskitetty lämmöntuotanto mahdollistaa päästöjen vähentämisen, hukkalämmön hyödyntämisen ja uudet lämmöntuotantomuodot, kuten modulaarisen ydinreaktorin. (Koskelainen et al. 2006.)

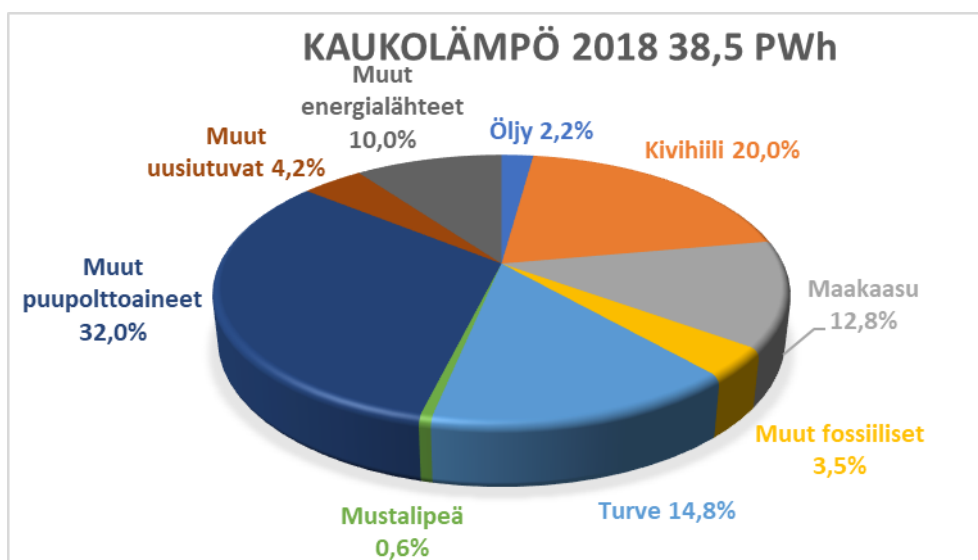
Kaukolämpöverkossa kiertävän veden lämpötilaa muutetaan lämmitystarpeen mukaan. Lämmitystarve määräytyy ulkolämpötilan vaikutuksesta. Kesän lämpimimpinä aikoina kaukolämpöä tarvitaan vain käyttöveden lämmittämiseen. Lämpimämpinä aikoina kaukolämpöverkon siirtoaineen lämpötila on 70 °C ja kylmimpinä 115 °C. (Huhtinen et al. 2008.) Suomessa kaukolämpöverkon maksimi lämpötila on 120 °C. (Koskelainen et al. 2006.) Kaukolämpöverkko on mitoitettu siten, että paluuvesi on lämpimimmillään 45 °C. (Huhtinen et al. 2008.)

Kaukolämpö tuotetaan joko lämpökeskuksissa tai yhteistuotannossa. Lämpökeskukset tuottavat vain lämpöä. Yhteistuotannossa tuotetaan lämpöä ja sähköä. Polttoaineen kemiallinen energia siirretään kattilassa höyryyn, joka pyörittää turbiinia. Turbiinin jälkeen loppu lämpö siirretään lämmönvaihtimien avulla kaukolämpöveeten. (Koskelainen et al. 2006.)

Suomessa yli puolet kaukolämmöstä tuotetaan sähkö ja lämmön yhteistuotannossa. (Kuva 3.) Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet esitetty kuvassa 4. Kaukolämmön tuotantoon käytetään paljon fossiilisia polttoaineita, kuten kivihiiiltä ja turvetta. Ydinvoimalla olisi potentiaalia vähentää paljon hiilidioksidipäästöjä Suomessa.



Kuva 3. Kaukolämmöntuotanto 2018. (Tilastokeskus 2019.)



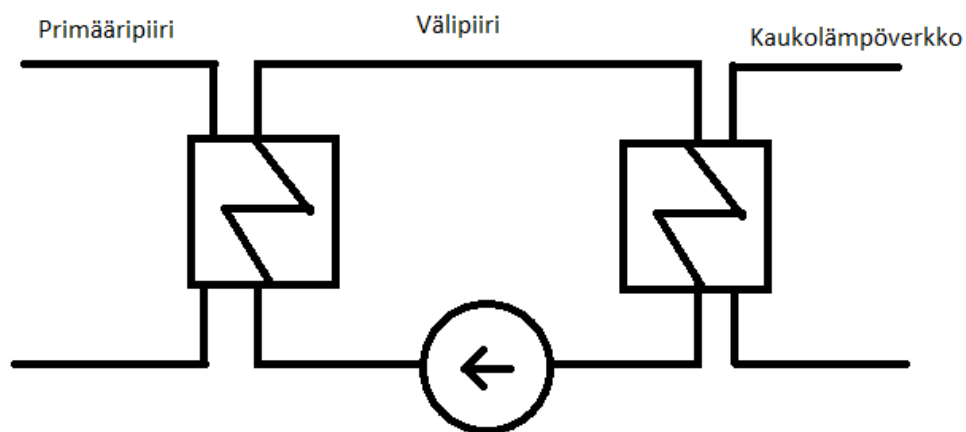
Kuva 4. Kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet vuonna 2018. (Tilastokeskus 2019.)

4 VÄLIPIIRIN KOMPONENTTIEN MITOITUS

Ydinreaktorin ja kaukolämpöverkon välille tarvitaan välipiiri mahdollisen polttoainevuodon takia. Ilman välipiiriä radioaktiiviset aineet voisivat päätyä suoraan kaukolämpöverkkoon ja sitä kautta mahdollisesti asutukseen.

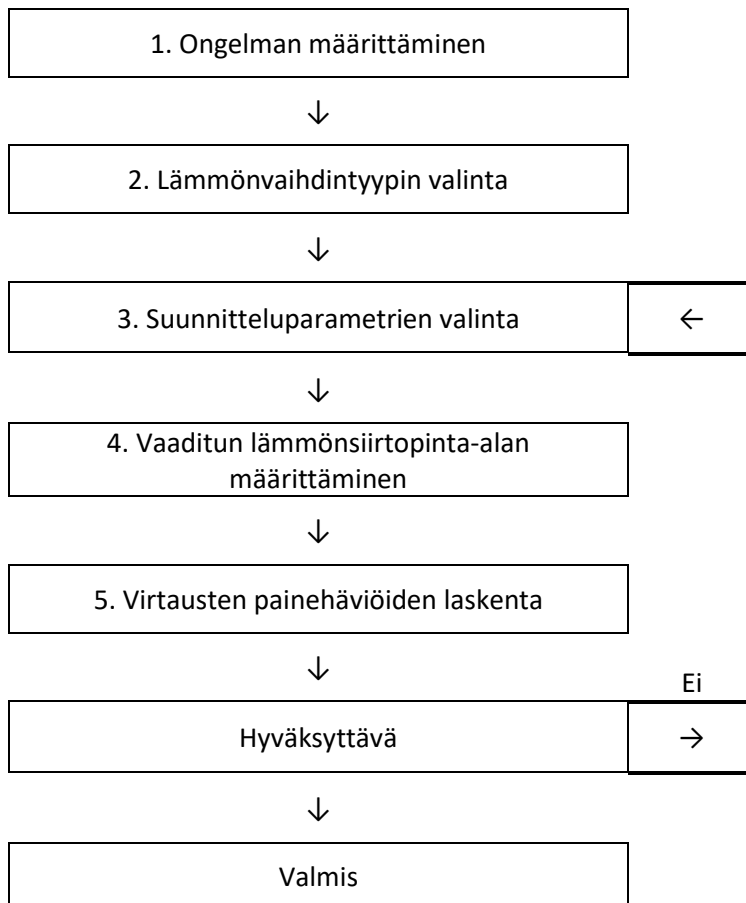
Lämmönvaihdin on komponentti, joka siirtää lämpöä yhdestä fluidista toiseen. (Incropera & DeWitt 1996.) Välipiiriin on valittava lämmönvaihdin, jossa fluidit on erotettu toisistaan kiinteällä seinällä, jolloin mahdolliset radioaktiiviset aineet eivät pääse leviämään välipiiriin.

Mitoitetaan välipiiri 24 MW LUTHER reaktorille. Kuvassa 5 periaatekuva välipiiristä. Välipiiriin kuuluu 2 lämmönvaihdinta ja pumppu.



Kuva 5. Välipiirin periaatekuva.

Lämmönvaihtimen mitoitus on iteratiivinen prosessi. Mitoituksen kulku etenee kuvan 6 mukaan. Tiettyjen alkuarvojen valinta johtaa tiettyyn tulokseen ja tulosta tarkastellaan ja sen perusteella muutetaan jotain alkuarvoa, jotta päästäisiin järkevään lopputulokseen.



Kuva 6. Suunnittelun vaiheet mukailleen. (Saari 2010.)

4.1 Yhtälöt

Mitoituksessa käytetyt yhtälöt ja korrelaatiot.

4.1.1 Massavirta

Massavirta saadaan seuraavasta yhtälöstä.

$$q_m = \frac{q}{c_p \Delta T} \quad (1)$$

, jossa

q = Lämpöteho [W]

q_m = Massavirta [kg/s]

c_p = Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

ΔT = Lämpötilaero [K]

4.1.2 Lämmönsiirtopinta-ala

Lämmönsiirrin mitoitetaan ϵ -NTU menetelmällä. Vaippa- ja putkilämmönvaihtimelle NTU-korrelaatio saadaan seuraavalla yhtälöllä. (Incropera & DeWitt 1996.)

$$NTU = -(1 + C_r^2)^{-\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{E-1}{E+1} \right) \quad (2)$$

, jossa

C_r = Ominaislämpökapasiteettivirtojen suhde

E = NTU-laskennan apusuure

Ominaislämpökapasiteettivirtojen suhde määritetään seuraavasti.

$$C_r = \frac{c_{min}}{c_{max}} \quad (3)$$

, jossa

C_{min} = pienin saatu lämpökapasiteettivirran arvo [W/K]

C_{max} = suurin saatu lämpökapasiteettivirran arvo [W/K]

Pienimmän ja suurimman lämpökapasiteettivirtojen arvot määräytyvät kaavojen 4-7 mukaan.

$$C_c < C_h : C_{min} = C_c \text{ ja } C_{max} = C_h \quad (4)$$

$$C_c > C_h : C_{min} = C_h \text{ ja } C_{max} = C_c \quad (5)$$

, jossa

Alaindeksit

c = kylmä

h = kuuma

$$C_h = c_{p,h} q_{m,h} \quad (6)$$

$$C_c = c_{p,c} q_{m,c} \quad (7)$$

Apusuure E saadaan seuraavasti.

$$E = \frac{\frac{2}{\varepsilon} - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (8)$$

, jossa

ε = tehokkuus

Tehokkuus ε saadaan seuraavasti.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (9)$$

, jossa

q_{max} = maksimilämpöteho [W]

Maksimilämpöteho q_{max} saadaan seuraavalla kaavalla.

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (10)$$

, jossa

$T_{h,i}$ = Kuuman fluidin sisääntulolämpötila [K]

$T_{c,i}$ = Kylmän fluidin sisääntulolämpötila [K]

Nyt saadaan lämmönsiirtopinta-ala A seuraavasti.

$$A = \frac{NTU C_{min}}{U} \quad (11)$$

, jossa

A = Lämmönsiirtopinta-ala [m²]

U = Lämmönläpäisyyluku [W/m²K]

4.1.3 Lämmönsiirtimen geometria

Lämmönsiirrintyyppi on vaippa- ja putkilämmönsiirrin. Lämmönsiirtimeen tulee kaksi putkivetoa ja yksi vaippaveto, jotka on esitetty kuvassa 7. Putket sijoitetaan vaipan sisälle mukailemaan ympyrämuotoa. Vaipan halkaisija voidaan karkeasti arvioida aritmeettisen summan avulla (kaava 12). Peruseriaate on siis, että ensimmäisellä putkirivillä on tietty määrä putkia ja joka rivillä putkien määrä lisääntyy yhtä paljon. Tämä havainnollistettu kuvassa 8.

$$S_n = n \frac{a_1 + a_n}{2} \quad (12)$$

, jossa

S_n = Putkien määrä

$a_1 = 3$, ensimmäinen putkirivi

$a_n = a_1 + d(n-1)$, n putkirivi

$d = 2$, putkien lisäys per rivi

n = rivien määrä

Sijoitetaan yhtälöön arvot ja ratkaistaan rivien määrä n seuraavalla kaavalla.

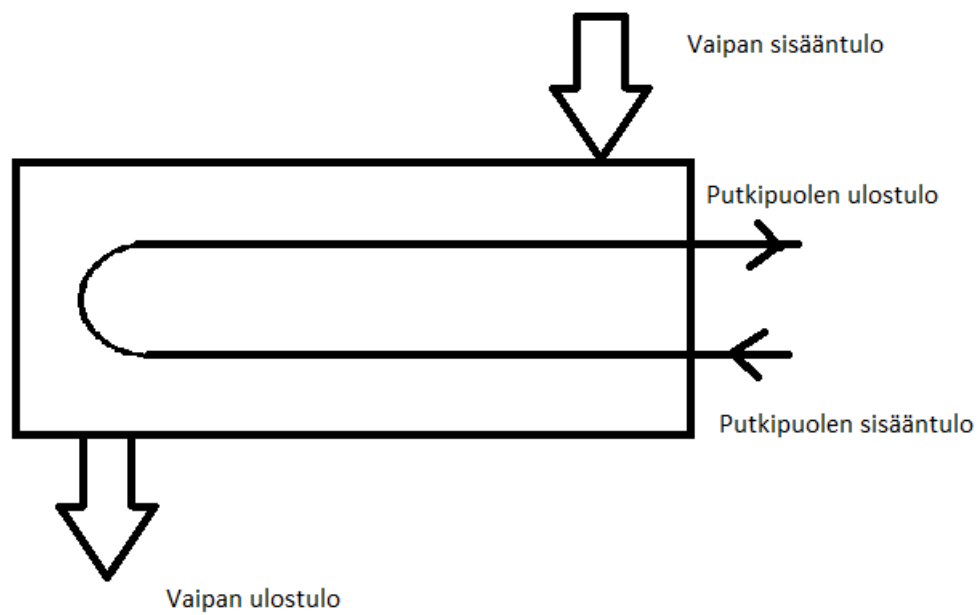
$$n = \frac{-2 + \sqrt{4 + 4S_n}}{2} \quad (13)$$

Vaippaputken halkaisija D saadaan seuraavalla kaavalla.

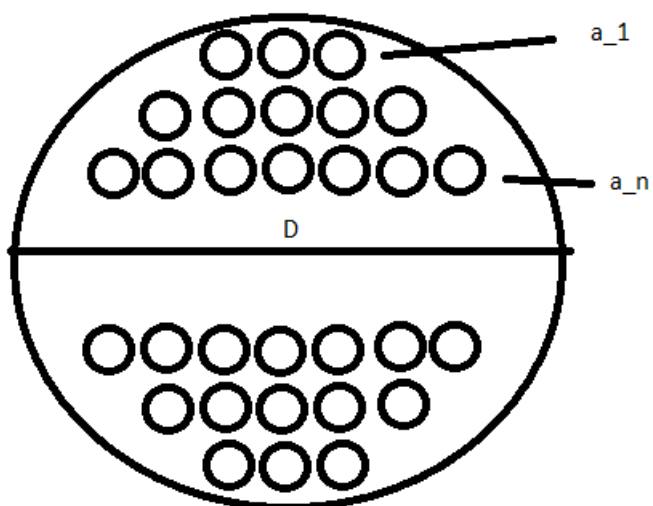
$$D = 2nS \quad (14)$$

, jossa $2n$ on pyöristetty ylöspäin lähimpään tasalukuun.

S = putkien keskipisteiden välinen etäisyys [m]



Kuva 7. Periaatekuva vaippa- ja putkilämmönvaihtimesta.



Kuva 8. Putkien asettelu vaipan sisälle. Kaavan 12 symbolit havainnollistettu.

Putkien määrä riippuu putken sisähalkaisijasta d_i ja pituudesta L , joiden valinta riippuu nesteen virtausnopeudesta ja painehäviöstä lämmönsiirtimessä.

Virtausnopeus w saadaan seuraavalla kaavalla.

$$w = \frac{q_m}{\rho \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^2} \quad (15)$$

, jossa

w = virtausnopeus [m/s]

ρ = tiheys [kg/m³]

d_i = putken sisähalkaisija [m]

Putkien määrä n saadaan seuraavasti.

$$n = \frac{L_{tot}}{L} \quad (16)$$

, jossa

L_{tot} = putkien yhteispituus [m]

L = yhden putken pituus [m]

Putkien yhteispituus L_{tot} saadaan seuraavasti.

$$L_{tot} = \frac{A}{\pi d_i} \quad (17)$$

4.1.4 Putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin

Konvektiolämmönsiirtokerroin tarvitaan lämmönsiirtimen lämmönläpäisyluvun U laskentaan. Selvitetään Reynoldsin luku Re_D seuraavan kaavan avulla.

$$Re_D = \frac{w_p d_p \rho_p}{\mu_p} \quad (18)$$

, jossa

Re_D = Reynoldsin luku

w_p = virtauksen nopeus putkessa [m/s]

d_i = putken sisähalkaisija [m]

ρ_p = putkivirtauksen fluidin tiheys [kg/m³]

μ_p = putkivirtauksen fluidin dynaaminen viskositeetti [Ns/m²]

Nusseltin luvun Nu_D korrelaatio sisäiselle turbulentsille virtaukselle saadaan seuraavalla kaavalla: (Incropera & DeWitt 1996.)

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{\frac{4}{5}} Pr^n \quad (19)$$

, jossa

Nu_D = Nusseltin luku

Pr = Prandtlin luku

$n = 0,4$, jos fluidia lämmitetään

$n = 0,3$, jos fluidia jäähdytetään

Nyt voidaan selvittää putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin h_i seuraavalla kaavalla.

$$h_i = \frac{Nu_d k_p}{d_i} \quad (20)$$

, jossa

h_i = putken sisäisen virtauksen lämmönsiirtokerroin [W/m²K]

k_p = fluidin lämmönjohtavuus keskilämpötilassa [W/mK]

4.1.5 Vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokerroin

Vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokerrointa h_o tarvitaan lämmönsiirtimen lämmönläpäisyluvun U selvittämiseen.

Reynoldsin luku Re vaippapuolelle saadaan seuraavalla kaavalla.

$$Re = \frac{D_e G}{\mu} \quad (21)$$

, jossa

D_e = ekvivalentti halkaisija [m]

G = massan nopeus [kg/sm²]

μ = dynaaminen viskositeetti keskilämpötilassa [Ns/m²]

Ekvivalentti halkaisija D_e saadaan seuraavasti.

$$D_e = \frac{4A_f}{P} \quad (22)$$

, jossa

A_f = putkien välinen vapaa alue märkäpiirin sisällä [m²]

P = märkäpiiri [m]

Putkien välinen vapaa alue märkäpiirissä A_f saadaan seuraavasti.

$$A_f = S^2 - \frac{\pi d_o^2}{4} \quad (23)$$

, jossa

d_o = pienen putken ulkohalkaisija [m]

Massan nopeus G saadaan seuraavasti.

$$G = \frac{q_m S}{D_{s,i} S_B (S - d_o)} \quad (24)$$

, jossa

q_m = vaippapuolen virtauksen massavirta [kg/s]

S_B = ohjauslevyjen välimatka toisistaan [m]

Ohjauslevyjen määrä N_B saadaan seuraavasti.

$$N_B = \frac{\left(\frac{l}{2}\right)}{S_B} \quad (25)$$

Nusseltin luku Nu vaippapuolelle saadaan seuraavalla korrelaatiolla. (Kern 1950.)

$$Nu = 0,36 Re^{0,55} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (26)$$

Nyt voidaan arvioida vaippapuolen Nusseltin luku seuraavalla kaavalla, koska ei tiedetä pienten putkien seinämien lämpötilaa. (Saari 2010.)

$$Nu = 0,36Re^{0,55}Pr^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

Nyt saadaan arvio vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokertoimelle.

$$h_1 = \frac{Nu k}{D_e} \quad (28)$$

, jossa

h_1 = arvio konvektiolämmönsiirtokertoimesta [W/m²K]

Oikean konvektiolämmönsiirtokertoimen määrittämiseen tarvitaan putken seinämän lämpötila, joka saadaan termisten resistanssien avulla.

Putken seinämän termien resistanssi saadaan seuraavasti.

$$R_w = \frac{d_o \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)}{2k_w A_o} \quad (29)$$

R_w = seinän termien resistanssi [K/W]

k_w = seinän lämmönjohtavuus [W/mK]

A_o = yksikköpinta-ala [m²]

Vaippapuolen konvektion termien resistanssi saadaan seuraavasti.

$$R_o = \frac{1}{A_o h_1} \quad (30)$$

R_o = vaippapuolen termien resistanssi [K/W]

Putkipuolen konvektion termien resistanssi saadaan seuraavasti.

$$R_i = \frac{1}{A_o \left(\frac{d_i}{d_o}\right) h_i} \quad (31)$$

R_i = kuuman putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m²K]

Terminen kokonaisvastus R_{tot} saadaan seuraavasti.

$$R_{tot} = R_i + R_w + R_o \quad (32)$$

Seinämän lämpötila saadaan seuraavasti.

$$T_s = T_c + \frac{R_o}{R_{tot}} (T_h - T_c) \quad (33)$$

T_s = putken seinämän lämpötila [K]

T_c = Kuuma keskimääräinen lämpötila [K]

T_h = Kylmä keskimääräinen lämpötila [K]

Nyt saadaan vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokerroin h_o viskositeettien suhteista.

$$h_o = h_1 \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (34)$$

4.1.6 Lämmönsiirtimen lämmönläpäisyyluku

Lämmönsiirtimen lämmönläpäisyyluku U saadaan seuraavasti.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_i'' + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_i}{d_o} R_o'' + \frac{d_i}{d_o h_o}} \quad (35)$$

4.1.7 Putkipuolen painehäviökorrelaatio

Putkipuolen painehäviö aiheutuu kitkasta. Karkea arvio putkipuolen painehäviöstä saadaan seuraavalla korrelaatiolla. (VDI heat atlas. 2010.)

$$\Delta p_p = \zeta \cdot \frac{\rho_p \cdot w_p^2}{2d_i} \cdot n_p \cdot L \quad (36)$$

, jossa

Δp_p = Putkipuolen painehäviö [Pa]

ζ = kitkakerroin karkealle putkelle

Karkean putken kitkakerroin saadaan seuraavalla korrelaatiolla. (*VDI heat atlas*. 2010.)

$$\zeta = 0,014 + 1,056 * Re_D^{-0,42} \quad (37)$$

4.1.8 Vaippapuolen painehäviökorrelaatio

Vaippapuolen painehäviö saadaan seuraavalla korrelaatiolla. (Kern 1950.)

$$\Delta p_{shell} = \frac{G^2}{2\rho_m} C_f \frac{D_s(N_B+1)}{D_e} \left(\frac{\mu_s}{\mu}\right)^{0,14} \quad (38)$$

, jossa

Δp_{shell} = vaippapuolen painehäviö [Pa]

ρ_m = tiheys vaippapuolen keskilämpötilassa [kg/m³]

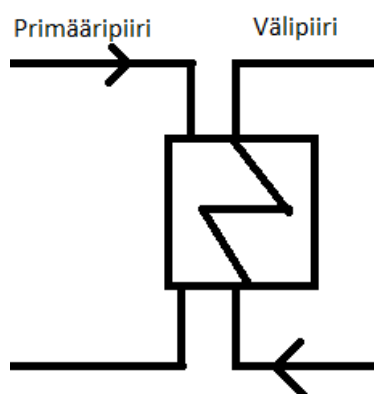
C_f = kitkakerroin $1,733Re^{-0,1891}$

N_B = ohjauslevyjen määrä

4.2 Reaktorin jäähdytteen ja välipiirin välinen lämmönvaihdin

1990-luvun lopussa yli 65 % teollisuuden käyttämistä lämmönvaihtimista oli vaippa- ja putkilämmönvaihtimia. Niiden rakentamisessa sekä suunnittelussa on noin sadan vuoden kokemus maailmalla. (Shah 2003.)

Valitaan lämmönvaihdin tyypiksi vaippa- ja putkilämmönvaihdin, koska se soveltuu suurelle tilavuusvirralle ja on yleinen lämmönvaihdin tyyppi. Fluidina toimii vesi molemmilla puolilla. Tilanteen tasekuva kuvassa 9.



Kuva 9. Reaktorin piirin ja välipiirin lämmönvaihtimen tasekuva.

Taulukossa 2 virtauksien lämpötilat. Primääripiirin lämpötilat ovat alkuarvoja ja oletetaan välipiirin lämpötilat.

Taulukko 2. Virtauksien lämpötilat.

	Primääripiiri	Välipiiri
Sisääntulolämpötila [°C]	180	100
Ulostulolämpötila [°C]	150	130

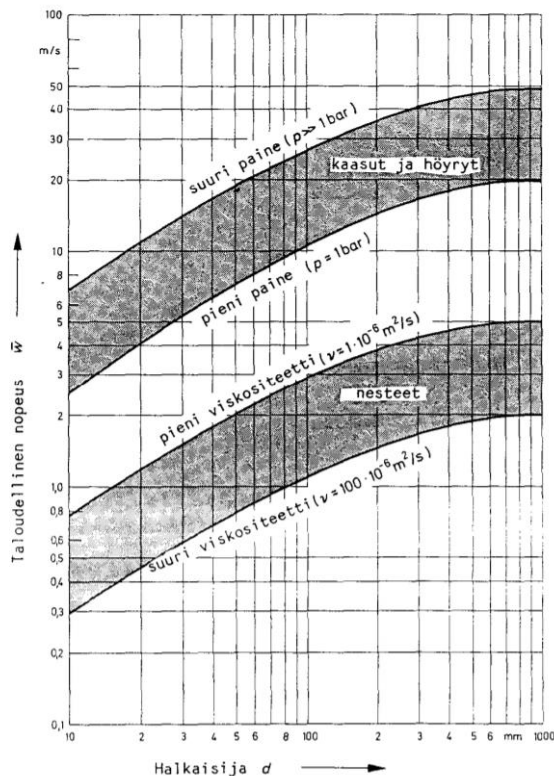
24 MW reaktorin massavirta saadaan yhtälöllä 1.

$$q_{m,h} = \frac{24 \cdot 10^6 W}{4355 \frac{J}{kgK} \cdot (180 - 150)C} = 183,7 \frac{kg}{s}$$

LUTHER toimii luonnonkierrolla eli ei ole pumppua kierrättämässä vettä reaktorin ja välipiirin lämmönvaihtimen välillä. Tiheyserot liikuttavat jäähdytettä. Jäähdyte lämpenee 30 °C kulkiessaan reaktorin läpi. Koska jäähdyte ei pääse höyrystymään, niin tiheyserot ovat hyvin pieniä, joten painehäviö lämmönvaihtimessa on minimoitava, jotta luonnonkierto toimii reaktorissa. (Huhtinen 1994.) Valitaan virtaukset siten, että välipiiri kulkee putkipuoolella ja primääripiiri vaippapuoolella.

Aloitetaan lämmönvaihtimen mitoitus arvaamalla kokonaislämmönläpäisyluvuksi U 1100 W/m²K, joka on tyypillinen arvo vesi-vesi-lämmönvaihtimelle. (Incropera & DeWitt 1996.) Selvitetään lämmönsiirtopinta-ala A kaavan 11 mukaan.

Valitaan geometria lämmönvaihtimelle. Aloitetaan valitsemalla putken halkaisija. Halkaisijan valinnassa on otettava huomioon taloudellinen virtausnopeus ja painehäviö sekä on käytettävä standardikokoja valmistettavuuden takia. Virtausnopeutta voidaan arvioida kuvasta 10, jossa haluttu arvo on lähellä suuren viskositeetin nesteen käyrää ja painehäviö putkessa saadaan yhtälöllä 36.



Kuva 10. Taloudellisia virtausnopeuksia putkivirtaukselle. (Larjola et al. 2013, 59.)

Lämmönvaihtimen lämmönläpäisyluvun laskentaan täytyy selvittää konvektiolämmönsiirtokerroimet molemmissa virtauksissa sekä johtumisvastus. Putkien materiaalivalinta ei merkittävästi vaikuta lämmönsiirtoon, joten valitaan materiaaliksi yleinen teräs, jonka lämmönjohtavuus on $k = 50 \text{ W/mK}$. (Incropera & DeWitt 1996.) Otetaan huomioon myös lämmönvaihtimen likaantuminen. Likaantumiskerroin on molemmille puolille $0,0002 \text{ m}^2\text{K/W}$. (Incropera & DeWitt 1996.)

Putkipuolen konvektiolämmönsiirtokerroin saadaan kaavalla 20 ja vaippapuolen konvektiolämmönsiirtokerroin saadaan kaavalla 34. Johtumisvastus saadaan kaavalla 29.

Nyt saadaan kokonaislämmönläpäisy-luku U kaavalla 35. Jos kokonaislämmönläpäisy-luku muuttuu merkittävästi, muutetaan putkien määrää ja lasketaan arvot uudelleen. Taulukoissa 3 ja 4 virtauksien tilat sekä lämmönvaihtimen lopulliset mitat.

Taulukko 3. Virtauksien arvot.

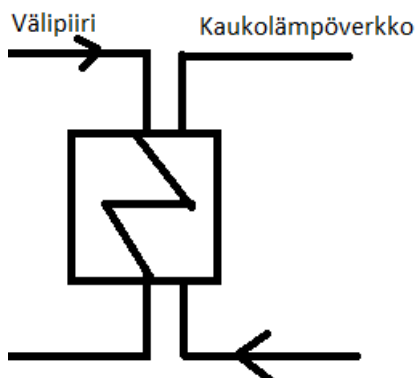
	Putki	Vaippa
Massavirta [kg/s]	189	184
Nopeus [m/s]	0,4	
Reynoldsin luku	62000	184000
Nusseltin luku	185	288
Konvektiolämmönsiirtokerroin h [W/m ² K]	3170	3980
Painehäviö [bar]	1,8	0,14

Taulukko 4 Lämmönvaihtimen mitat.

Kokonaislämmönläpäisyluku U [W/m ² K]	1020
Lämmönsiirtopinta-ala A [m ²]	502
Putken sisähalkaisija [mm]	40
Putken ulkohalkaisija [mm]	48,3
Putken pituus L [m]	10
Putkien määrä	400
Vaipan halkaisija D [m]	2,2
Vaipan pituus [m]	5
Ohjauslevyjen välimatka [mm]	660
Ohjauslevyjen määrä	7

4.3 Välipiirin ja kaukolämpöverkon välinen lämmönvaihdin

Valitaan välipiirin ja kaukolämpöverkon lämmönvaihdintyypiksi myös putki- ja vaippalämmönvaihdin. Mitoitus etenee samalla tavalla kuin osiossa 4.2. Tulokset taulukoissa 5,6 ja 7.



Kuva 11. Välipiirin ja kaukolämpöverkon välisen lämmönvaihtimen tasekuva.

Taulukko 5. Virtauksien lämpötilat.

	Välipiiri	Kaukolämpöverkko
Sisääntulolämpötila [°C]	130	45
Ulostulolämpötila [°C]	100	100

Taulukko 6. Virtauksien arvot.

	Putki	Vaippa
Massavirta [kg/s]	189	104
Nopeus [m/s]	0,2	
Reynoldsin luku	27000	31000
Nusseltin luku	196	144
Konvektiolämmönsiirtokerroin h [W/m ² K]	3370	2370
Painehäviö [bar]	5,4	0,08

Taulukko 7. Lämmönvaihtimen mitat.

Kokonaislämmönläpäisyyluku U [W/m ² K]	920
Lämmönsiirtopinta-ala A [m ²]	1440
Putken sisähalkaisija [mm]	32
Putken ulkohalkaisija [mm]	42,4
Putken pituus L [m]	12,5
Putkien määrä	1147
Vaipan halkaisija D [m]	3
Vaipan pituus [m]	6,25
Ohjauslevyjen välimatka [mm]	600
Ohjauslevyjen määrä	10

4.4 Välipiirin pumppu

Välipiiriin on lisättävä pumppu lämmönvaihtimissa aiheutuvien painehäviöiden takia ja koska ei haluta, että välipiirin vesi alkaa kiehumaan, koska se huonontaisi lämmönsiirto-ominaisuuksia.

Välipiiri – kaukolämpöverkkolämmönvaihtimelta tuleva vesi on 100 °C. Pidetään paine pienimmillään 1,5 bar, jolloin vesi ei kiehu. Lämmönvaihtimista aiheutuvat painehäviöt ovat yhteensä 7,2 bar. Paine-ero pumpun yli on 5,7 bar. Lisätään 10% vara, joka voisi aiheutua putkistosta ja muista seikoista. Pumpun nostama paine täytyy olla noin 6,3 bar.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Lämmönvaihtimet saatiin mitoitettua. Painehäviöt ovat kohtalaisen hyvää luokkaa molemmissa lämmönvaihtimissa. Putkien asettelu vaipan sisälle on vain suuntaa antava. Vaippa- ja putkilämmönvaihtimesta tulee suurikokoinen. Kokonaislämmönläpäisyluvut ovat tyypillistä kokoluokkaa lämmönvaihtimille, joiden kiertoaineena on vesi. Mahdollisesti useampi pienempi lämmönvaihdin voisi olla parempi tähän tarkoitukseen. Ei löytynyt standardimallisia suuren kokoluokan lämmönvaihtimia, joihin voisi verrata tuloksia.

Tarkempaa tarkastelua varten laskentaohjelmia. Yksinkertaisetkin mallit voivat antaa hyvän kuvan mitoitettavista komponenteista.

6 TURVALLISUUS

Nykyiset turvallisuusvaatimukset ovat pääasiassa tehty suurille sähköä tuottaville vesijäähdytteisille reaktoreille. Pienten kaukolämpöä tuottavien reaktorien turvallisuusvaatimukset voivat poiketa huomattavasti suurien reaktorien vaatimuksista. Työ- ja elinkeinoministeriö suunnittelee ydinenergialain kokonaisuudistusta. (Ahonen et al. 2019.)

Välipiiri toimii yhtenä leviämisesteenä, jonka tarkoituksena on estää aktiivisten aineiden leviäminen. Välipiirissä olisi hyvä ottaa huomioon redundanssi, diversiteetti ja erottelu. Redundanssi eli rinnakkaisuusperiaate, joka tarkoittaa, että samaa tehtävää hoitaa useampi järjestelmä. Diversiteetti eli erilaisuusperiaate, joka tarkoittaa, että tehtävää hoitaa useampi erilainen järjestelmä. Erottelu tarkoittaa, että järjestelmät ovat fyysisesti sijoitettu erilleen toisistaan. (Hyvärinen 2019.)

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä karkea mitoitus LUTHER-reaktorin välipiirille. Välipiirin täytyi mitoittaa kaksi lämmönvaihdinta sekä pumppu. Tavoitteena oli tehdä esimerkkilaskelmat välipiirin komponenteille.

Lämmönvaihdin tyyppiä valikoitui vaippa- ja putkilämmönvaihdin soveltuvuuden, yleisyyden sekä valmistettavuuden takia.

Lämmönvaihtimet saatiin mitoitettua. Vaippa- ja putkilämmönvaihtimista tuli suuria kokoiset, mutta laskelmien mukaan toimivat. Lämmönvaihtimien kokonaislämmönläpäisyluvut ovat tyypillistä kokoluokkaa vesi-vesi-lämmönvaihtimelle. Yleisyydestä huolimatta suuren kokoluokan teollisista lämmönvaihtimista ei löydy tarkkoja tietoja, joita olisi voinut verrata omiin mitoituksiin. Pumppu mitoitettiin hyvin karkeasti, koska lämmönvaihtimista aiheutuvat painehäviöt vaikuttavat suuresti pumppuun. Tarkempia mitoituksia varten olisi suotavaa käyttää laskentaohjelmia.

LÄHDELUETTELO

VDI *heat atlas*. 2010. 2nd ed edn. Berlin: Springer.

AHONEN, E., HEINONEN, J., LAHTINEN, N., TUOMAINEN, M. and LÅNG, O., 2019. *Edellytyksen pienreaktorien turvalliselle käytölle*. STUK.

ENERGIATEOLLISUUS, 2019-last update, Kaukolämpötilasto 2018, taulukot.

Saatavissa:

<https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view>

[Viitattu 10.3.2020].

EUROOPAN PARLAMENTTI, 2018-last update, Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet. Saatavissa:

<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet> [Viitattu 16.3.2020].

EUROSTAT, 2019. *Greenhouse gas emission statistics - emission inventories*.

HUHTINEN, M., 1994. *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki: Painatuskeskus.

HUHTINEN, M., KORHONEN, R., PIMIÄ, T. and URPALAINEN, S., 2008. *Voimalaitostekniikka*. Helsinki: Opetushallitus.

HYVÄRINEN, J., 2019. *BH30A0001 Ydinenergian yleiskurssi*.

INCROPERA, F.P. and DEWITT, D.P., 1996. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed edn. New York: Wiley.

INGERSOL, D., 2014-last update, NuScale energy supply for oil recovery and refining applications. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-NuScale-power-module_fig1_289665894 [Viitattu 1.3.2020].

KERN, D., 1950. *Process Heat Transfer*. International Student Edition edn. Tokyo, Japan: McGraw-Hill Kogakusha Ltd.

KOSKELAINEN, L., SAARELA, R. and SIPILÄ, K., 2006. *Kaukolämmön käsikirja*. Helsinki: Energiateollisuus.

LARJOLA, J., AHTI, J. and PUNNONEN, P., 2013. *BH40A1400 & BH40A1450 VIRTASTEKNIikka I & II*.

NUSCALE POWER, 2018. *Chapter One. Introduction and General Description of the Plant. Part 2 - Tier 2. Revision 2.* .

SAARI, J., 2010. *Heat exchanger thermal design guide*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Lappeenranta.

SHAH, R., 2003. *FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN*.

TILASTOKESKUS, 1.11., 2019-last update, Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatu/2018/salatu_2018_2019-11-01_tau_001_fi.html [Viitattu 24.11.2019].

TRUONG, T., SUIKKANEN, H. and HYVÄRINEN, J., 2020. REACTOR CORE CONCEPTUAL DESIGN FOR A SCALABLE HEATING EXPERIMENTAL REACTOR, LUTHER, *PHYSOR 2020* 2020.

TULKKI, V., PURSIHEIMO, E. and LINDROOS, T., 2017. District heat with Small Modular Reactors (SMR).

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2019-last update, Small nuclear power reactors - World Nuclear Association. Saatavissa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> [Viitattu 20.11.2019].