

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Energy Engineering

Lauri Pihlajamäki

DETERMINATION OF PERIODIC TESTS OF OL3 DIESEL ENGINE AIR COOLERS

Master's thesis

2020

89 pages, 30 figures, 7 tables, 1 appendices

Examiners: Professor, D.Sc. Juhani Hyvärinen
M.Sc. (Tech.) Aapo Taavitsainen

Keywords: Dieselmotor, heat transfer, heat exchanger, air cooler, nuclear power plant

The purpose of the Master's thesis is to determine the periodic test for the air coolers of the emergency diesel generators and station blackout diesel generators of the Olkiluoto 3 nuclear power plant. The subject was very topical because the periodic test has not yet been defined. The purpose of the periodic test is to determine the sufficient cooling capacity of the air coolers of the diesel generators of the nuclear power plant at the time of measurement. The purpose of the air coolers is to cool the cooling water flowing in the low temperature and high temperature circuits of diesel engines.

The purpose of the periodic test is to prevent fault situations and enable the necessary maintenance measures to maintain the cooling capacity of the air coolers. In this work, the measuring devices required for the periodic test, the quantities to be measured and their measuring points are determined. The acceptance criterion for the periodic test is the adequate cooling capacity of the air cooler. The general equations required for the calculation of the cooling capacity of an air cooler are presented and the calculation is performed using the NTU efficiency method.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:lle vuoden 2020 syyskuun ja joulukuun välisenä aikana. Haluan kiittää Teollisuuden Voima Oyj:tä erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta työstä. Haluaisin erityisesti kiittää Teollisuuden Voima Oyj:n sähkötekniikan pääinsinööriä Mikko Keipiä ja laitosturvallisuuden tiimiesimiestä Aapo Taavitsaista diplomityön aiheesta. Tämän lisäksi haluan kiittää diplomityöni mahdollistajaa sähkötekniikan yksiköpäällikköä Jari-Pekka Tauluvuorta ja muuta Teollisuuden Voima Oyj:n henkilökuntaa, jotka tukivat työn tekemistä.

Haluan kiittää Lappeenrannan teknilliseltä yliopistolta professori Juhani Hyväristä, jonka apu diplomityötä kohtaan oli korvaamaton.

Suurimmat kiitokset kuuluvat vaimolleni, pojalleni ja lapsenvahdeille, jotka mahdollistivat diplomityön teon erittäin pitkistä päivistä huolimatta. Kiitos tuesta ja kannustuksesta.

Turussa 10.12.2020

Lauri Pihlajamäki

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tavoite	10
1.2 Työn rakenne	10
2 TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ	12
2.1 Olkiluodon ydinvoimalaitokset	12
3 YDINVOIMALAITOKSEN VARAVOIMALÄHTEIDEN SUUNNITTELUPERUSTEET 15	
3.1 Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikka	15
3.2 Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminta	16
3.3 Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta	16
3.4 Turvallisuussuunnittelu	17
3.5 Turvallisuusluokat	20
3.6 Ydinvoimalaitoksen uhat	20
3.7 Ydinvoimalaitoksen varavoimalähteet	21
4 LÄMMÖNSIIRTO	24
4.1 Johtuminen	25
4.2 Konvektio	27
4.2.1 Dimensiottomat luvut	29
4.2.2 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	31
4.3 Lämmönvaihdin	32
4.3.1 Ilmajäähdytin	36
4.3.2 Sekoitettu ilmavirtaus	37
4.3.3 Sekoittamaton ilmavirtaus	40
4.4 NTU-tehokkuusmenetelmä	45
5 MÄÄRÄAIKAISKOKEET	48
5.1 Hätädieselgeneraattorin jäähdytysjärjestelmä	49
5.1.1 LT-piiri	50
5.1.2 HT-piiri	51
5.1.3 EDG-ilmajäähdyttimien toimintaperiaate ja rakenne	52

5.2	<i>SBO-dieselgeneraattorin jäähdytysjärjestelmä</i>	54
5.2.1	<i>LT-piiri</i>	56
5.2.2	<i>HT-piiri</i>	56
5.2.3	<i>SBO-ilmajäähdyttimen toiminta ja rakenne</i>	57
6	MITTAUSJÄRJESTELYT	58
6.1	<i>Mittalaitteet ja mitattavat suuret</i>	58
6.2	<i>Mittapisteet</i>	60
6.3	<i>Mittaustulos ja sen epävarmuus</i>	62
7	JÄÄHDYTYSTEHDON LASKENTA	67
7.1	<i>Ilman aineominaisuuksien laskenta</i>	67
7.2	<i>LT-piirin jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin</i>	69
7.3	<i>LT-piirin ilman lämmönsiirtokerroin</i>	71
7.4	<i>LT-piirin lämmönsiirron kokonaiskerroin</i>	72
7.5	<i>LT-piirin lämmönsiirtoteho</i>	73
7.6	<i>HT-piirin jäähdytystehon laskenta</i>	75
7.7	<i>Hyväksyntäkriteeri ilmajäähdyttimille</i>	77
7.8	<i>Kehitysehdotukset</i>	80
8	YHTEENVETO	82
	LÄHDELUETTELO	84
LIITE 1:	<i>Kays ja Londonin kuvaajat jatkuvaripaisesta lämmönvaihtimesta</i>	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor
EDG	Emergency Diesel Generator
EYT	Ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu
HT	High Temperature
LT	Low Temperature
NTU	Siirtoyksiköiden lukumäärä
PRA	Probabilistic risk assessment
PRW	Pressurized Water Reactor
RH	Relative Humidity
SBO	Station Black Out
STUK	Säteilyturvakeskus
TVO	Teollisuuden Voima
YVL	Ydinturvallisuusohje

Symbolit

A	Pinta-ala	m^2
C	Lämpökapasiteetti	W/K
c_p	Ominaislämpökapasiteetti	$J/kg \cdot K$
D	Halkaisija	m
f	Kitkakerroin	
G	Massanopeus	$kg/s \cdot m^2$
h	Lämmönsiirtokerroin	$W/m^2 \cdot K$
j	Colburin kerroin	
k	Lämmönjohtavuus	$W/m \cdot K$
L	Pituus	m
M_{da}	Moolimassa 0,028964	kg/mol
\dot{m}	Massavirta	kg/s
N	Putkien määrä	
NTU	Siirtoyksiköiden lukumäärä	
N_f	Ripojen määrä pituusyksikköä kohden	
N_t	Putkirivien määrä	
Nu	Nusseltin luku	
p	Ilmanpaine	bar
p_{da}	Kuivan ilman osapaine	bar

P_l	Putkien pituussuuntainen etäisyys	m
Pr	Prandtin luku	
P_t	Putkien poikittainen etäisyys	m
P_v	Vesihöyryn osapaine	
q	Lämpöteho	W
q_v	Tilavuusvirtaus	m ³ /h
q_x''	Lämpövuoto	W/m ²
R	Kaasuvakio 8,31441	J/mol·K
s	Ripojen etäisyys	m
Re	Reynoldsin luku	
T	Lämpötila	°C/K
t_f	Rivan paksuus	m
U	Lämmönsiirron kokonaiskerroin	W/m ² ·K
v	Nopeus	m/s
x	Ilman kosteuspitoisuus	

Kreikkalaiset

ε	Tehokkuus	
ρ	Tiheys	kg/m ³
ρ_{da}	Kuivan ilman tiheys	kg/m ³
μ	Dynaaminen viskositeetti	Pa·s

Alaindeksit

c	Kylmä
co	Vastavirtaus
cr	Ristivirtaus
h	Kuuma
i	Sisäinen
o	Ulkoinen
r	Suhde

1 JOHDANTO

Normaalitilanteissa ydinvoimalaitos tuottaa itse tarvitsemansa sähkön päägeneraattorillaan tai sähkö syötetään ulkoisesta sähköverkosta. Ydinlaitoksilla sattuvien häiriö- ja onnettomuustilanteiden varalle, laitoksen on varauduttava siihen, ettei kyseisistä järjestelmistä kyetä syöttämään sähköä turvallisuudesta huolehtiville järjestelmille. Ydinlaitoksilla on tästä johtuen varmennettava sähköenergian jatkuva saatavuus luotettavilla ja kapasiteetiltaan riittäväillä hätädieselgeneraattoreilla (Emergency Diesel Generator).

Hätädieselgeneraattorit (EDG) käsittävät varavoimakoneen, generaattorin ja muut laitteet sekä järjestelmät ja rakenteet, joita tarvitaan ydinlaitoksen varavoiman tuotannossa. Olkiluodon ydinvoimalaitoksissa varavoimalähteet ovat dieselgeneraattoreita ja koneet ovat vesi ja/tai ilmajäähdytteisiä. Olkiluoto 3 -laitosyksikössä on yhteensä kuusi hätädieselgeneraattoria, joiden tarkoituksena on turvata jatkuva sähkönsyöttö. Näistä generaattoreista neljä ovat EDG-koneita ja kaksi muuta ovat SBO-koneita (Station black out). Laitosyksikön hätädieselgeneraattorit ovat ilmajäähdytteisiä.

Hätädieselgeneraattoreiden jäähdytys tapahtuu korkea lämpötilan (HT) ja matalan lämpötilan (LT) piirien kautta, jotka kulkevat moottorin eri osien kautta ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimelle. HT- ja LT-piirit ovat suljettua piirejä, joissa kulkee vesiglykoliseos. Piirit ovat hätädieselgeneraattorikohtaisia. Jokaisen EDG-koneen HT- ja LT-piireissä on kolme ilmalämmönvaihdinta, joiden sisällä virtaa moottorista tuleva jäähdytysneste. Normaalisissa tilanteissa moottorin jäähdytysvettä jäähdytetään 12 puhaltimella. SBO-koneissa on puolestaan vain yksi ilmalämmönvaihdin, jonka läpi kulkee HT- ja LT-piiri. SBO-dieselmoottoreissa tuleva jäähdytysneste jäähdytetään normaalisti viidellä puhaltimella.

Ydinvoimalaitosten suunnittelu perustuu niin kutsuttuihin suunnitteluperusteisiin. Suunnitteluperusteet ovat tilanteita tai olosuhteita, joista ydinvoimalaitoksen on selvittävä määritellyillä hyväksyntäkriteereillä. Ydinvoimalaitoksen laitteiden ja järjestelmien toimintakuntoa testataan säännöllisesti määräaikaistesteillä. Nämä kokeet on suunniteltu siten, että niillä pystytään osoittamaan laitteiden ja järjestelmien toiminta niille ennalta määritetyissä tilanteissa eli osoittamaan suunnitteluperusteen toteutuminen.

Tämän diplomityön tarkoituksena on laatia määräaikaistestiohjeet hätädieselgeneraattoreiden (EDG ja SBO) ilmajäähdytykselle. Määräaikaistestiohjeen tarkoituksena on esittää se,

kuinka ilmajäädyttimen riittävä jäähdytysteho voidaan varmentaa. Tässä työssä esitellään mitä suureita ilmajäädyttimen lämmönvaihtimesta on mitattava ja millaisilla laskentameto-
deilla jäähdytysteho voidaan todentaa vallitsevissa olosuhteissa. Saadut tulokset ovat erit-
täin tärkeitä ja ajankohtaisia, koska tällä hetkellä hätädieselgeneraattoreiden ilmajäädytti-
mien lämmönvaihtimille ei ole määritelty lämmönsiirron osalta määräaikaikaiskoikeita.

1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena on tarkastella hätädieselgeneraattoreiden suunnitteluperusteita hyödyn-
täen ydinturvallisuusohjeita ja laitoksen suunnitteluperusteita sekä määrittää hätädiesel-
generaattoreiden ilmajäädytykselle määräaikaikaiskoehjeet. Määräaikaikaiskoikeet on laadit-
tava Olkiluoto 3 -laitosyksikön hätädieselgeneraattoreiden (EDG) ja station black out -die-
seleiden (SBO) ilmajäädytykselle, ja niillä voidaan osoittaa dieselgeneraattorien riittävä
jäähtyminen. Dieselgeneraattoreiden jäähdytyksen suunnitteluperusteessa jäähdytysjärjes-
telmään oletetaan tietyt likaantumis- ja vikaotukset sekä korkea ulkoilman lämpötila. Tä-
män suunnittelun avulla pystytään varmistamaan riittävä jäähtyminen myös mahdollisissa
ääriolosuhteissa.

1.2 Työn rakenne

Diplomityön toimeksiantajana toimiva Teollisuuden Voima Oyj ja aihealueeseen liittyvä Ol-
kiluoto 3 -ydinvoimalaitosta esitellään luvussa 2. Työn teoreettinen viitekehys rakentuu lu-
kujen 3 - 4 välille. Luvussa 3 kerrotaan yleisesti ydinvoimalaitoksen varavoimalähteiden
suunnitteluun liittyvistä turvallisuusohjeista. Luvussa 4 kuvataan lämmönsiirron perusteita
ja niihin liittyviä yleisiä matemaattisia yhtälöitä. Tässä kappaleessa syvennytään tarkemmin
lämmönsiirtokertoimen laskentaan ja siihen vaikuttaviin tekijöihin sekä erilaisiin virtausmuo-
toihin. Lämmönsiirtokertoimen laskennassa tarvitaan myös tunnettuja dimensiottomia lu-
kuja, jotka esitellään samassa kappaleessa. Kappaleen lopussa käydään läpi lämmönvaiht-
timen toimintaperiaatetta ja syvennytään tarkemmin ilmajäädyttimen toimintaan. Viimei-
sessä osiossa selvitetään, kuinka lämmönvaihtimen tehokkuus voidaan laskea, kun tie-
dossa ovat vain lämmönvaihtimen sisään menevien väliaineiden lämpötilat.

Työn keskeisimpään osa-alueeseen kuuluu EDG- ja SBO- hätädieselgeneraattoreiden
jäähdytysjärjestelmän kuvaukset, jotka esitellään luvussa 5. Tämän kappaleen tarkoituk-
sena on avata lukijalle, kuinka Olkiluoto 3 -voimalaitoksen hätädieselgeneraattoreiden ja

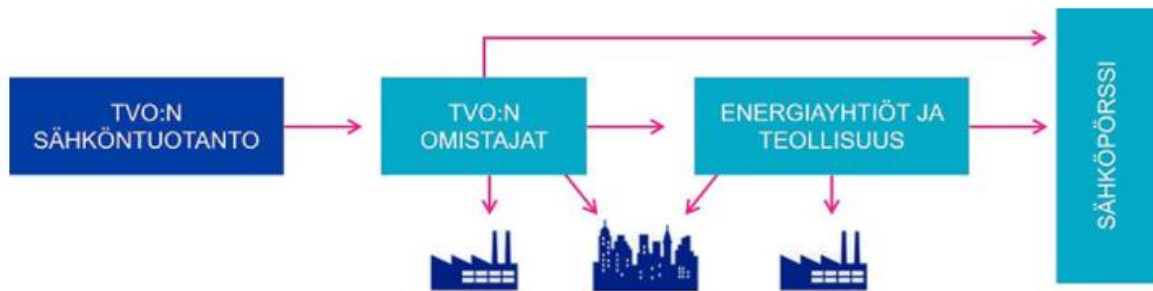
SBO-dieselgeneraattoreiden jäähdytysjärjestelmät toimivat. Kappaleessa perehdytään molempien dieselgeneraattorien matalan (LT) ja korkean (HT) lämpötilapiirin toimintaan. Lisäksi kappaleessa kerrotaan dieselgeneraattoreiden ilmajäähdyttimien toimintaperiaatteista ja niiden rakenteista. Tämän kappaleen ydinajatuksena on tuoda ilmi määräaikaisko-keiden tärkeys.

Määräaikaiskokeen tarkoituksena on todentaa ilmajäähdyttimien riittävä jäähdytysteho. Jotta riittävä jäähdytysteho saataisiin laskettua, on määräaikaiskokeessa tehtävä erilaisia mittauksia. Luvussa 6 esitellään määräaikaiskokeissa tarvittavia mittalaitteita sekä mitattavia suureita. Luvussa esitetään myös mittapisteet, joista tarvittavat suureet voidaan mitata. Luvun lopussa käsitetään mittausepävarmuuteen liittyviä tekijöitä.

Luvussa 7 havainnollistetaan määräaikaiskokeissa tarvittavia laskentayhtälöitä ja niiden laskentaa. Tämän kappaleen tarkoituksena on avata lukijalla, kuinka mittauksessa saatuja tuloksia hyödynnetään jäähdytystehon laskennassa. Jäähdytystehon laskennassa käytetään teoriaosuudessa esiin tulleita yhtälöitä. Laskenta esitetään kahdella eri lähestymistavalla ja ne avataan vaihe vaiheelta. Jäähdytystehon laskennasta saatuja tuloksia verrataan toisiinsa ja näin saadaan varmistettua riittävä jäähdytysteho. Kappaleen lopussa perehdytään ilmajäähdyttimien määräaikaisko-keiden hyväksymiskriteereihin sekä esitellään kehitysideoita tuleville mittauksille. Yhteenveto, luvussa 8, keskittyy tutkimuksen keskeisimpien tulosten kuvaamiseen.

2 TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ

Teollisuuden Voima Oyj (TVO) on vuonna 1969 perustettu listaamaton julkinen osakeyhtiö. TVO on tuottanut sähköä jo 40 vuotta omistajilleen omakustannehintaan. TVO omistusosuudet jakautuvat EPV Energia Oy, Fortum Power Heat Oy, Loiste Holding Oy, Kemira Oyj, Oy Mankala Ab ja Pohjolan Voima Oyj kesken. TVO:n tavoitteena ei ole tuottaa voittoa eikä jakaa osinkoa. Kustannukset veloitetaan osakkailta omistuksen mukaisen suhteen perusteella sähkön hinnasta ja näin tilikauden tulos on lähtökohtaisesti nolla. Kuvassa 1 esitellään TVO:n omakustannusperiaate. (TVO 2020a).



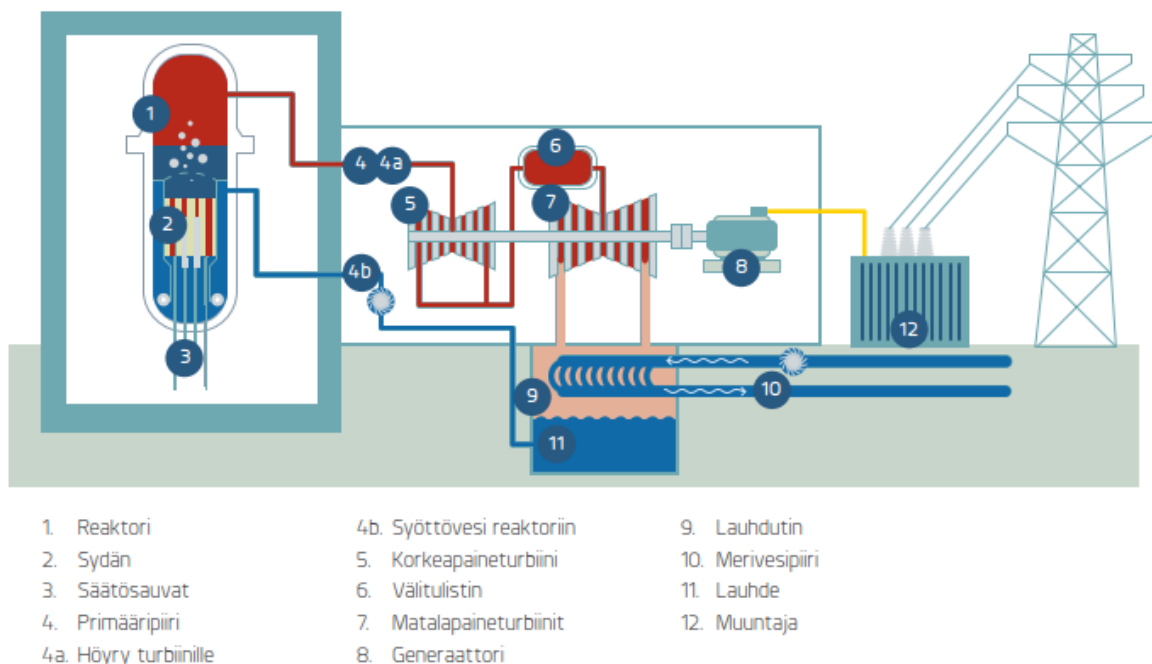
Kuva 1. Teollisuuden Voiman omakustannusperiaate (TVO 2020b).

TVO omistaa ja käyttää kahta ydinvoimalaitosta, Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2). Lisäksi yhtiö rakentaa kolmatta ydinvoimalaitosta Olkiluoto 3 (OL3) Eurajoen Olkiluotoon. TVO:n Olkiluodon voimalaitokset tuottavat tällä hetkellä noin kuudenneksen suomalaisten käyttämästä sähköstä. Tuotettu sähkö toimitetaan suomalaiselle teollisuudelle ja energia-yhtiöille. (TVO 2020a)

2.1 Olkiluodon ydinvoimalaitokset

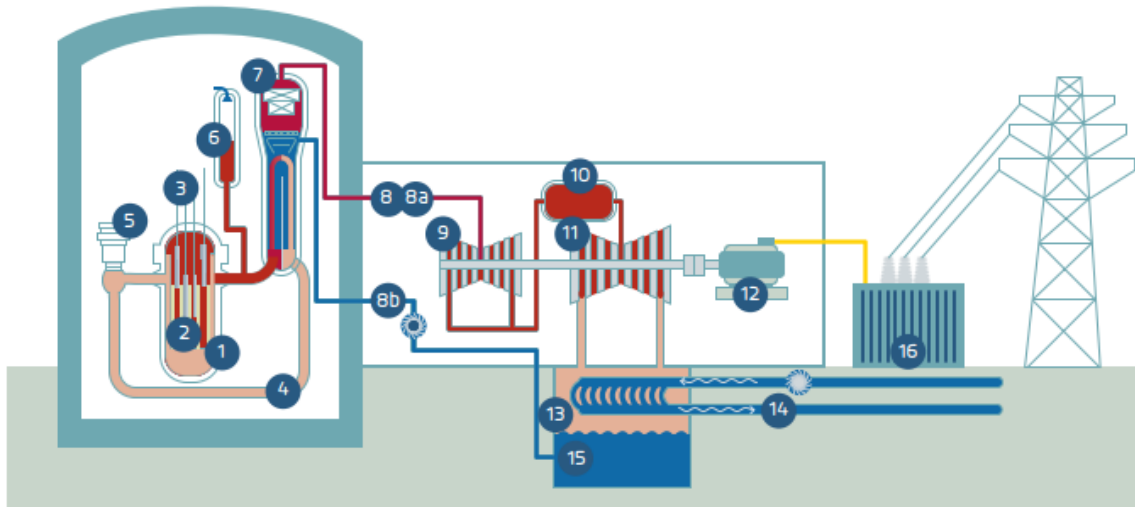
Vuonna 1979 ruotsalaisen AB Asea Atomin toimittama OL1 ydinvoimalaitos aloitti kaupallisen käytön. Muutama vuosi myöhemmin, 1982 OL2 aloitti kaupallisen käytön. Asea Atom toimitti OL1 avaimet käteen -periaatteella ja OL2 laitoksen rakennustöistä vastasi TVO. Teollisuuden voiman ydinvoimalaitokset OL1 ja OL2 ovat lähes identtisiä ja ne on varustettu kiehutusvesireaktorilla. OL1 ja OL2 laitoksen nettosähköteho on 880 megawattia (MW). OL3 on puolestaan varustettu painevesireaktorilla ja laitoksen arvioitu nettosähköteho on 1600 megawattia. Laitosten ero perustuu höyryn muodostukseen. (TVO 2012b).

Olkiluoto 1 ja 2 ydinvoimalaitosten toiminnat perustuvat kiehutusvesireaktoriin (BWR Boiling Water Reactor). Kiehutusvesireaktorissa vettä kierrätetään reaktorisydämen polttoaineni-
puissa olevien polttoainesauvojen välissä, jolloin vesi kuumenee ja höyrystyy. Reaktorista
syntynyt höyry johdetaan korkeapaineturbiiniin kautta matalapaineturbiinille. Turbiinit pyörit-
tävät samalle akselilinjalle kytkettyä generaattoria, joka tuottaa sähköä valtakunnanverk-
koon. OL1 ja OL2 ydinvoimalaitosten toimintaperiaate on näkyvässä kuvassa 2. (TVO
2012b).



Kuva 2. OL1 ja OL2 kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate (TVO 2012b).

Olkiluoto 3 ydinvoimalaitoksen toiminta perustuu painevesireaktoriin (PWR, Pressurized Water Reactor). Painevesireaktorissa vesi pidetään kiehumattomana korkean paineen avulla. Höyry tuotetaan höyrystimessä, jossa kuuma vesi kiehauttaa putkiston toisella puolella olevan erillisen kiertopiirin (sekundääripiirin) veden höyryksi. Höyry johdetaan tämän jälkeen turbiineille, jotka pyörittävät sähkögeneraattoria tuottaakseen sähköä valtakunnanverkkoon. Kuvasta 3 nähdään Olkiluoto 3 PWR-toimintaperiaate. (TVO 2012b).



- | | | |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1. Reaktori | 7. Höyrystin | 11. Matalapaineturbiinit |
| 2. Sydän | 8. Sekundääripiiri | 12. Generaattori |
| 3. Säätosauvat | 8a. Höry turbiinille | 13. Lauhdutin |
| 4. Primääripiiri (veden kierto) | 8b. Syöttövesi höyrystimille | 14. Merivesipiiri |
| 5. Pääkiertopumppu | 9. Korkeapaineturbiini | 15. Lauhde |
| 6. Paineistin | 10. Välitulistin | 16. Muuntaja |

Kuva 3. OL3 painevesilaitoksen toimintaperiaate (TVO 2012b).

3 YDINVOIMALAITOKSEN VARAVOIMALÄHTEIDEN SUUNNITTELUPERUSTEET

Ydinvoimalaitoksessa on häiriö- ja onnettomuustilanteiden varalta turvallisuusjärjestelmiä. Turvallisuusjärjestelmien suorituskyvyn arvioinnin mittarina käytetään suunnittelun perustana olevia onnettomuuksia ja häiriötilanteita. Näistä tilanteista ydinvoimalaitoksen tulee selviytyä turvallisuusjärjestelmiensä tilannekohtaisilla hyväksyntäkriteereillä. Normaalisissa tilanteissa ydinvoimalaitos tuottaa tarvitsemansa sähköenergian omilla päägeneraattoreilla tai se syötetään ulkoisesta sähkösiirtoverkosta.

Sellaisia tilanteita varten, joissa nämä molemmat energianlähteet menetettäisiin, ydinvoimalaitoksessa on hätädieselgeneraattoreita varmentamassa riittävän sähköenergian saannin. Olkiluoto 3 hätädieselgeneraattoreiden turvallisuusvaatimuksissa on noudatettu Säteilyturvakeskuksen (STUK) ydinturvallisuusohjeita (YVL) ja ydinenergialain (990/1987) määräyksiä. Suunnittelussa on huomioitu ydinvoimalaitoksen hätädieselgeneraattoreihin (EDG) liittyvät ydinturvallisuusohjeet. Seuraavissa kappaleissa kuvataan Säteilyturvakeskuksen ydinturvallisuusohjeista seuraavia osioita; ydinvoimalaitoksen sijaintipaikka, sen käyttötöiminta, riskianalyysi ja riskienhallinta, turvallisuussuunnittelu, laitteiden luokittelu, varautuminen uhkiin sekä varavoimalähteet.

3.1 Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikka

Ydinturvallisuusohje A.2 käsittelee ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaa. Sijaintipaikan valinnassa on otettava huomioon laitoksen ympäristöön kohdistuvat ulkoiset uhat, ympäristön olosuhteet, elinkeinotoiminta ja väestö. Hätädieselgeneraattorin sijaintiin vaikuttaa merkittävästi seuraava STUK:in määräys Y/1/2018 14§:

”Ydinlaitoksen suunnittelussa on otettava huomioon ulkoiset tapahtumat, jotka voivat uhata turvallisuutta. Järjestelmät, rakenteet ja laitteet sekä kulkuyhteydet on suunniteltava, sijoitettava ja suojattava siten, että mahdollisiksi arvioitujen ulkoisten tapahtumien vaikutukset ydinlaitoksen turvallisuuteen ovat vähäisiä. Järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden toimintakyky on osoitettava niiden suunnitteluperusteena olevissa laitoksen ulkoisissa ympäristöolosuhteissa. Ulkoisina tapahtumina on otettava huomioon harvinaiset sääolosuhteet, seismiset ilmiöt, laitoksen ympäristössä tapahtuvien onnettomuuksien vaikutukset ja muut ympäristöstä tai ihmisen toiminnasta johtuvat tekijät. Suunnittelussa on otettava huomioon

myös lainvastaiset ja muut ydinturvallisuutta vaarantavat luvattomat toimet sekä suuren liikennelentokoneen törmäys.” STUK Y/1/2018 14§.

Edellä mainitun määräyksen mukaan hätädieselgeneraattoreiden suunnittelun perusteissa on otettava huomioon erilaiset sääolosuhteet ja seismiset ilmiöt. Olkiluodon sääolosuhteet vaihtelevat vuodenajasta riippuen ja suunnittelussa on otettava huomioon myös ääriolosuhteet.

3.2 Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminta

Ydinturvallisuusohje A.6 käsittelee ydinvoimalaitoksen käyttötoimintaa ja siihen liittyviä toimintoja ja menettelytapoja. Tässä ohjeessa annetaan vaatimuksia käyttötoimintaa ohjaavalle ohjeistolle, turvallisuusteknisille käyttöehdoille sekä onnettomuus- ja häiriötilanteisiin. Ohjeistuksen mukaan ydinvoimalaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden käyttökuntoisuutta on valvottava ja todennettava suunnitelmallisesti. (YVL A.6).

Käyttötoimintaa ohjaava menettely käsittää ydinvoimalaitoksen määräaikaiskokeet. Laitoksella on oltava määräaikaiskoeohjelma, jolla varmistetaan laitoksen turvallisuuteen liittyvien rakenteiden, järjestelmien ja laitteiden luotettava toiminta ja kunto. Määräaikaiskokeessa on tuotava ilmi kokeen tarkoitus, edellytykset kokeen suorittamiselle, suoritusohjeet kokeiden tekemiseksi, hyväksymiskriteerit sekä tulosten käsittely ja hyväksyminen. Määräaikaiskoeohjelmaa ja koeohjeita on tarvittaessa uudistettava ja täydennettävä. Jotta määräaikaiskokeet olisivat hyväksyttäviä, on niiden tekijän arvioitava koetulosten hyväksyttävyys. Kokeen tekijä ei voi kuitenkaan toimia tulosten hyväksyjänä ja turvallisuusyksikön asiantuntijan täytyy osallistua tulosten arviointeihin. (YVL A.6).

3.3 Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta

Ydinturvallisuusohje A.7 käsittelee ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteista riskianalyysiä ja riskien hallintaa. Säteilyturvakeskuksen määräyksessä ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta sanotaan ”*Ydinlaitoksen turvallisuutta ja sen turvallisuusjärjestelmien teknisiä ratkaisuja on arvioitava ja perusteltava analyttisesti ja tarvittaessa kokeellisesti*”. STUK Y/1/2018 3§.

Vaatimuksessa olevalla analyyttisellä menetelmällä tarkoitetaan ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteista riskianalyysiä (PRA – Probabilistic risk assessment). Ydinturvallisuuden liittyvien riskien hallinnan perustan muodostavat PRA-riskianalyysi sekä tukea antavat kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset erillistarkastukset. Kvalitatiivisella tarkastuksella tarkastetaan ovatko data, menetelmät sekä tulokset perusteltu ja hyväksyttävissä. Lisäksi tarkastuksessa varmistetaan erilaisten tapahtumien, toimintojen ja järjestelmien mallintamista. Kvantitatiivisessa tarkastuksessa tarkastetaan numeerisia tuloksia, onnettomuusketjujen laskeamista ja näihin liittyviä epävarmuusanalyyseja. Riskien hallinta kattaa ydinvoimalaitoksen suunnittelu-, rakentamis-, käyttöönotto-, käyttö- ja käytöstä- poistovaiheet, ja jokaista vaihetta on johdettava riskitietoisesti. (YVL A.7).

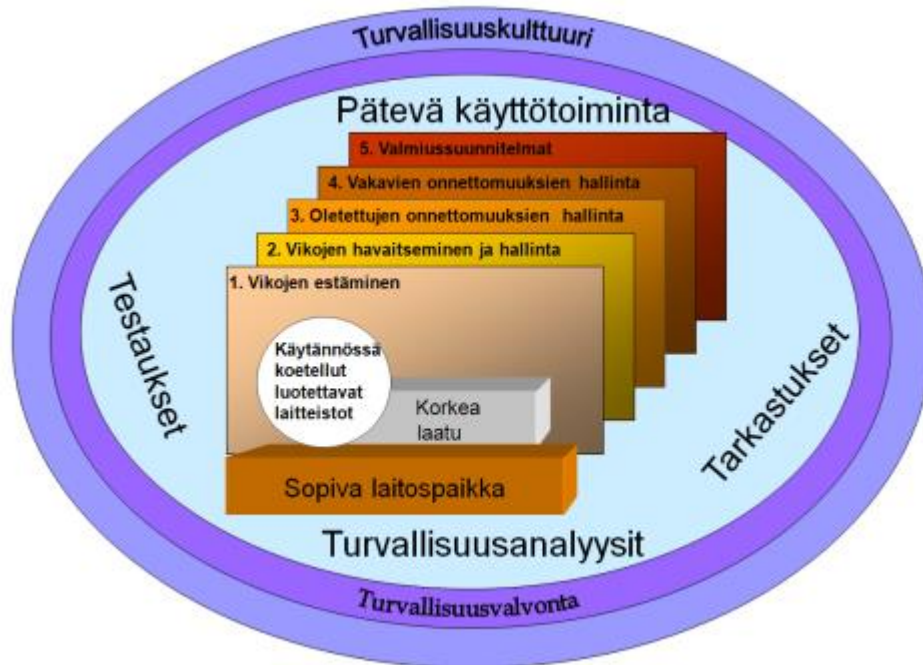
PRA:ssa on analysoitava alkutapahtumina laitoksen sisäiset viat, häiriöt ja inhimilliset virheet, ulkoisen sähköverkon menetykset, tulipalot, tulvat, raskaat nostot, poikkeukselliset sääolosuhteet, seismiset ilmiöt ja muut ympäristöstä johtuvat tekijät, sekä ihmisen toiminnasta johtuvat ulkoiset tekijät. PRA:ta on käytettävä turvallisuusteknisten käyttöehtojen arviointiin ja laadittaessa järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden määräaikaistarkastus-, koestus- ja ennakkohuolto-ohjelmia. Käytännössä PRA:lla voidaan tarkastella määräaikaistarkastus- ja ennakkohuolto-ohjelmien suoritusvälien pituuden merkitystä ydinvoimalaitoksen turvallisuudelle. (YVL A.7).

3.4 Turvallisuussuunnittelu

Ydinenergialain (990/1987) 7 f §:n mukaan turvallisuuden on oltava etusijalla ydinvoimalaitoksen rakentamisessa ja käytössä. Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelun tavoitteena on varmistaa, että ydin- ja säteilyturvallisuuden vaatimukset täyttyvät häiriö- ja onnettomuustilanteissa. Suunnittelussa on tavoitteena ydinvoimalaitoksen turvallinen, luotettava ja häiriötön toiminta erilaisten ja monikertaisten turvallisuusjärjestelmien avulla. Ydinturvallisuusohjeessa B.1 ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelulle esitetään vaatimuksia ja täsmennetään Säteilyturvakeskuksen määräyksessä esitettyjä suunnitteluvaatimuksia. Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnitteluun liittyvät vaatimukset perustuvat syvyysuuntaiseen puolustusperiaatteeseen. (Sandberg 2004).

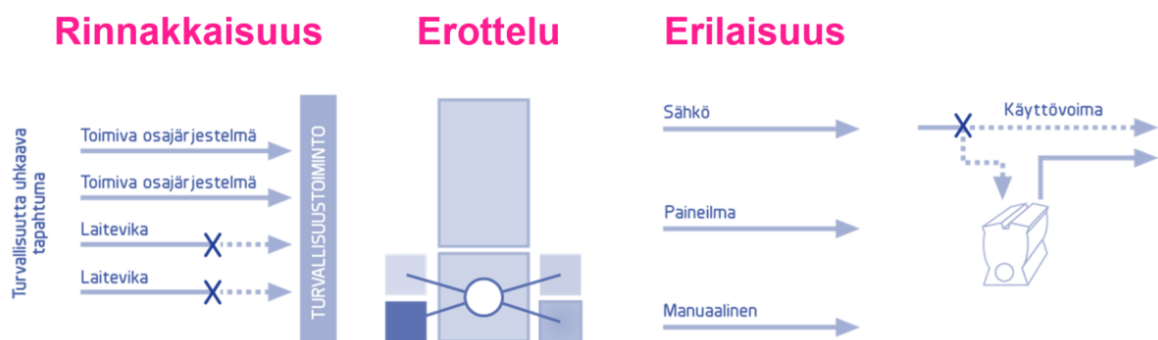
Syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen mukaan ydinvoimalaitoksen suunnittelu on toteutettava useilla peräkkäisillä, toisiaan varmentavilla rakenteilla ja järjestelmillä. Suunnittelun perusteena on estää reaktorisydämen laajat vauriot ja säteilyn haitallinen vaikutus. Puolustusperiaatteen mukainen suunnittelu perustuu viiteen peräkkäiseen puolustustasoon, jotka

on esitelty kuvassa 4. Puolustustasojen on oltava toisistaan niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista saavuttaa. (YVL B.1).



Kuva 4. Syvyyssuuntainen puolustusperiaate (Ahonen 2011).

Vikaantumistilanteita varten laitoksen turvallisuustoiminnoista vastaavat järjestelmät on toteutettava moninkertaisuusperiaatetta hyödyntäen. Moninkertaisuusperiaatteen eli redundanttisuuden tarkoituksena on se, että turvallisuustoiminta voidaan suorittaa, vaikka mikä tahansa osajärjestelmä olisi käyttökunnoton. Moninkertaisuusperiaatteessa hyödynnetään rinnakkaisuutta, erottelua ja erilaisuutta, jotka ovat nähtävissä kuvassa 5. (YVL B.1).



Kuva 5. Järjestelmien moninkertaisuusperiaate (TVO 2020c).

Eri puolustustasojen järjestelmät on erotettava toisistaan siten, ettei yhdellä tasolla sattuva vikaantuminen estä muiden puolustustasojen toimintoja. Puolustustasojen kaksi ensimmäistä tasoa ovat tarkoitettu ehkäisemään onnettomuuksia ja loput suojaamaan laitosta, käyttäjiä ja ympäristöä onnettomuuksien haitallisilta vaikutuksilta. Tasot voidaan jakaa vielä ennaltaehkäisevään, suojaavaan ja lieventävään tasoon. (YVL B.1).

Ensimmäisen eli ennaltaehkäisevän tason tarkoituksena on varmistaa, että ydinvoimalaitoksen käyttö on luotettavaa ja rajata poikkeamat laitoksen normaalista käyttötilasta. Tämän johdosta laitteiden suunnittelussa, valmistuksessa, asennuksessa ja huollossa sekä laitoksen käyttötoiminnassa käytetään korkeita laatuvaatimuksia. (Sandberg 2004).

Suojaavalla tasolla tarkoitetaan sitä, että laitoksen huolellisesta suunnittelusta ja käytöstä huolimatta tapahtuviin käyttöhäiriöihin varaudutaan erilaisin järjestelmin. Järjestelmien tarkoituksena on havaita häiriöt, estää häiriöiden kehittyminen onnettomuuksiksi ja saattaa ydinvoimalaitos tarvittaessa hallittuun tilaan. Suojaavasta tasosta voidaan käyttää myös nimitystä toinen taso. (Sandberg 2004).

Kolmannes eli lieventävän tason tavoitteena on lieventää onnettomuuksia, jotka ovat edenneet ensimmäisestä ja toisesta tasoista huolimatta. Lieventävän tason tärkeimpiä tehtäviä on tällöin varmistaa suojarakennuksen eheys ja rakennukseen liittyvien järjestelmien toiminta. Lieventävä taso jaetaan vielä 3a ja 3b tasoihin.

- a) Tavoitteena on hallita yksittäisistä alkutapahtumista ja niiden seurausvaikutuksista johtuvia oletettuja onnettomuuksia (luokka 1 ja luokka 2) radioaktiivisten aineiden leviämisen rajoittamiseksi.
- b) Tavoitteena on hallita oletettujen onnettomuuksien laajennuksia siten, että vakavat polttoaineauriot estetään. (Sandberg 2004).

Neljännän tason tarkoituksena on rajoittaa päästöjä vakavissa reaktorionnettomuuksissa. Ydinvoimalaitos on varustettava järjestelmillä, jotka varmistavat suojarakennuksen riittävän tiiviyyden. Vakavissa onnettomuustilanteissa päästöt eivät saa ylittyä asetetuista raja-arvoista. (YVL B.1)

Viidennellä tasolla on valmiustoiminta, jolla lievennetään seurauksia. Tason päämääränä on huolehtia väestöön kohdistuvan säteilyaltistuksen rajoittamisesta. (YVL B.1)

3.5 Turvallisuusluokat

Tässä kappaleessa esitellään keskeisempiä asioita ydinturvallisuusohjeen B.2 mukaisesta ydinlaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelusta. Säteilyturvakeskuksen määräyksen mukaan järjestelmät, rakenteet ja laitteet jaetaan niiden turvallisuusmerkityksen perusteella turvallisuusluokkiin 1, 2 ja 3 sekä EYT (ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu). Luokituksen on perustuttava ensisijaisesti deterministisiin menetelmiin, jota täydennetään PRA:lla ja asiantuntija-arviolla.

Järjestelmien turvallisuusluokittelun on perustuttava laitoksen turvallisuustoimintoihin ja niitä toteuttavien järjestelmien merkitykseen turvallisuustoimintojen luotettavuudelle huomioiden syvyysuuntaisen turvallisuuden. Laitteiden turvallisuusluokituksen on perustuttava turvallisuustoimintojen toteuttamiseksi, radioaktiivisten aineiden leviämisen estämiseksi tai säteilyturvallisuuden valvomiseksi laitteelta vaadittavalle toiminnalle sekä kestävyydelle, eheydelle ja tiiviydelle. (YVL B.2).

Esimerkiksi turvallisuusluokkaan 1 luokitellaan ydinreaktorin primääripiiri, rakenteet ja laitteet, joiden vaurioituminen voi aiheuttaa reaktorin eheyttä vaarantavan onnettomuuden. Turvallisuusluokkaan 2 kuuluvat puolestaan järjestelmät, laitteet ja rakenteet, joilla onnettomuustilanteissa ydinvoimalaitos saadaan hallittuun tilaan ja pidettyä siinä. Lisäksi turvallisuusluokkaan 2 kuuluvat tukijärjestelmät, joilla suojarakennuksen erityistoimintoja toteuttavat järjestelmät ja laitteet ovat onnettomuustilanteissa välttämättömiä. (YVL B.2).

Turvallisuusluokkien lisäksi ydinvoimalaitoksen järjestelmät, laitteet ja rakenteet on luokiteltava maanjäristystilanteita varten kestävyysvaatimusten perusteella S1, S2A ja S2B luokkaan. Lisää turvallisuus- ja maanjäristysluokituksen perusteista löytyy ydinturvallisuusohjeesta B.2. (YVL B.2).

3.6 Ydinvoimalaitoksen uhat

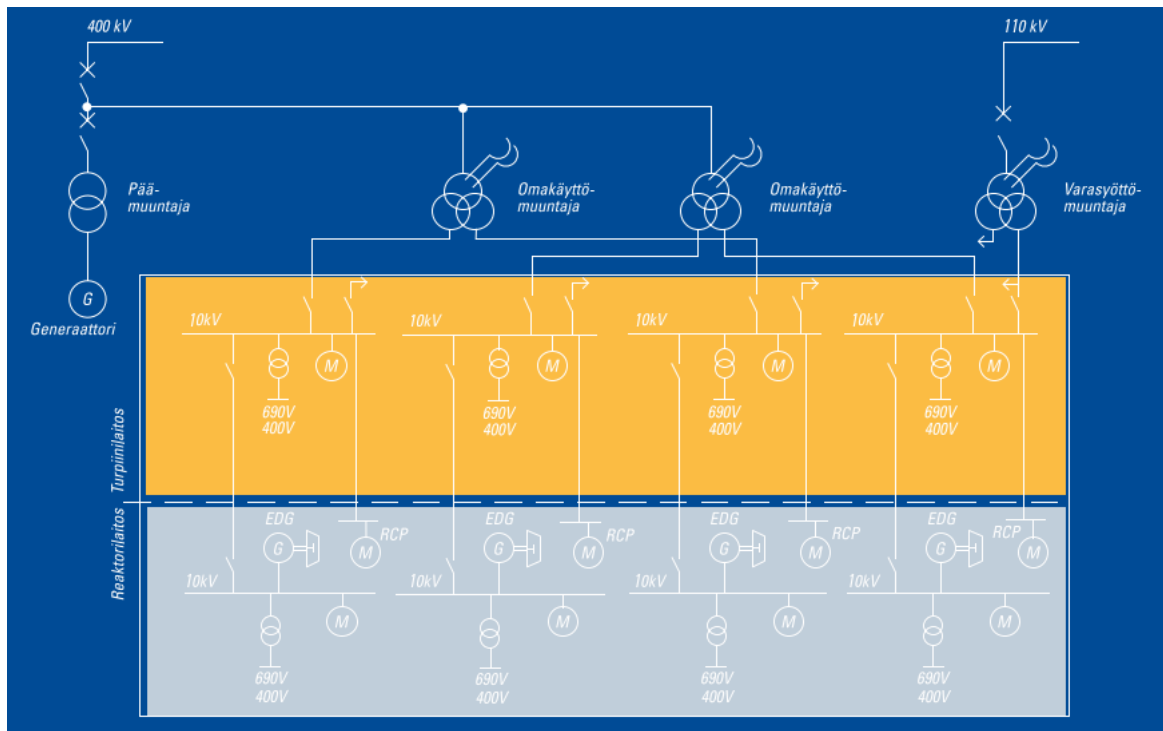
Säteilyturvakeskuksen määräyksessä ydinvoimalaitoksen suunnittelussa on otettava huomioon sisäiset ja ulkoiset tapahtumat, jotka voivat uhata turvallisuutta. Laitoksen sisäiseksi tapahtumiksi luokitellaan muun muassa tulipalot, tulvat, räjähdykset, sähkömagneettinen säteily, raskaiden esineiden putoamiset, erilaiset kalliosortumat ja muut sisäiset tapahtumat sekä ydinturvallisuutta vaarantavat lainvastaiset ja luvattomat toimet. Ulkoisina tapahtumina

voidaan pitää harvinaisia sääolosuhteita, seismisiä ilmiöitä, lentokoneen törmäystä ja lähi-alueen onnettomuuksien vaikutuksia sekä ympäristöstä tai ihmisisten toiminnasta johtuvia tekijöitä. Näitä erilaisia uhkia torjutaan ydinvoimalaitoksella tila- ja sijoitussuunnittelulla, moninkertaisuus-, erottelu- ja erilaisuusperiaatteiden soveltamisella, laitteiden ja rakenteiden lujusteknisellä mitoituksella ja laitteiden olosuhdekelpoisuuksilla. Ydinvoimalaitoksella sijoitussuunnittelua on toteutettava siten, etteivät rakennusten väliset tulipalot, tulvat ja muut uhat pääsisi leviämään rakennusten välillä. (YVL B.7).

3.7 Ydinvoimalaitoksen varavoimalähteet

STUKin määräyksen mukaan ”*ydinvoimalaitoksella on oltava häiriö- ja onnettomuustilanteiden varalta ulkoinen ja sisäinen sähkötehon syöttöjärjestelmä. Turvallisuustoiminnoissa tarvittava sähköteho on voitava syöttää kumpaa tahansa järjestelmää käyttämällä.*” STUK Y/1/2018 11§ 6. Suunnittelussa on otetta huomioon, että molempien syöttöjärjestelmien kapasiteetti riittää turvallisuustoimintojen toteuttamiseen (YVL B.1). Tässä kappaleessa tutustutaan ydinturvallisuusohjeen E.10 ydinvoimalaitoksen varavoimalähteiden tärkeimpiin ohjeisiin ja määräyksiin.

Normaalissa tilanteessa Olkiluodon ydinvoimalaitokset tuottavat omalla päägeneraattorilla tarvitsemansa sähköenergian. Laitoksilla sähkönsaanti on varmistettu moninkertaisesti. Päägeneraattorin ollessa pois käytöstä, tarvittava sähköenergia saadaan varajärjestelyin valtakunnan 400 kV:n tai 110 kV:n kantaverkosta. Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla on myös mahdollisuus syöttää sähköenergiaa laitokselta toiselle. Osa ydinvoimalaitoksen järjestelmistä on akkuvarmennettu, eivätkä häiriötilanteet vaaranna kyseisten laitteiden tai järjestelmien toimintaa. Lisäksi Olkiluodossa on myös kaasuturbiinivoimalaitos, joka toimii varavoimalaitoksena. Kaasuturbiinin avulla voidaan antaa sähköä laitosyksiköille kahden erillisen syöttöreitin kautta. Näiden varajärjestelyjen lisäksi sähkönsaanti on varmistettu myös erityisjärjestelyin. Erityisjärjestelyiden myötä sähkö saadaan joko Harjavallan vesivoimalaitokselta tai Paneliankosken Voiman 20 kV:n verkosta. Kuvasta 6 nähdään Olkiluoto 3 ydinvoimalaitoksen yksinkertaistettu pääkaavio. (TVO 2020c).



Kuva 6. Olkiluoto 3 ydinvoimalaitoksen yksinkertaistettu pääkaavio. (TVO 2010).

Onnettomuustilanteita varten on kuitenkin varauduttava, ettei kyseisiltä lähteiltä saada sähköä. Tästä syystä sähköenergian jatkuva saatavuus ydinvoimalaitoksella on varmennettava luotettavilla ja kapasiteetiltaan riittäville hätädieselgeneraattoreilla. (YVL E.10) Ydinvoimalaitosten omat hätädieselgeneraattorit käynnistyvät automaattisesti sähkötehon menetyksestä. Automaattinen käynnistys tapahtuu joko alijännitteestä tai -taajuudesta. Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -voimalaitoksilta löytyvät yhteensä kahdeksan hätädieselgeneraattoria, kun taas Olkiluoto 3 -laitoksella näitä on neljä. Jokainen näistä neljästä hätägeneraattorista yläläpittää oman divisioonansa kuormia. Näistä neljästä generaattorista kaksi tarvitaan ydinvoimalaitoksen turvalliseen alasajoon. Lisäksi Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksella on vaihtosähkön täydellistä menetystä varten kaksi station black out -dieselgeneraattoria (SBO). (TVO 2020c).

Ulkoisen sähkötehon syöttöjärjestelmän varajärjestelmänä pidetään laitosalueen sisällä olevaa varatehon syöttöjärjestelmää. Sisäisen alueen varatehon syöttöjärjestelmän tarkoituksena on varmentaa turvallisuudelle tärkeiden vaihtosähkölaitteiden sähkönsyöttö. Onnettomuustilanteita varten varatehon syöttöjärjestelmälle on annettu omavaraisuusehto, jossa järjestelmän on kyettävä suorittamaan tehtävänsä vähintään 72 tunnin ajan. Aikaikuna jaetaan siten, että ensimmäisen 24 tunnin aikana järjestelmä ei tarvitse minkäänlaista

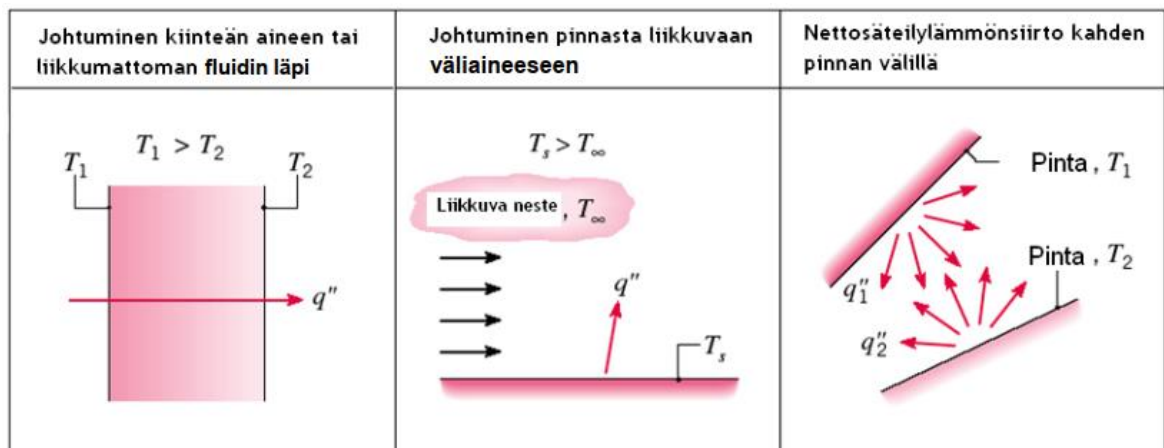
vesi-, polttoaine- tai muita materiaalitäydennyksiä. Seuraavien 48 tunnin aikana laitosalueella on valmiudet vesi-, polttoaine- ja muiden materiaalitäydennysten järjestämiseen. (YVL B.1).

Hätädieselgeneraattorin suunnittelussa on huomioitava ne vaatimukset, jotka ovat määritellyt suunnitteluperusteiksi laitoksen normaalissa käytössä, odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä ja oletetuissa onnettomuustilanteissa. Teknisinä vaatimuksena hätädieselgeneraattorin huipputehon on oltava vähintään 110 % määritellystä nimellistehosta, ja sitä on kyettävä ylikuormittamaan vähintään yhden tunnin ajan. (YVL E.10).

4 LÄMMÖNSIIRTO

Tässä kappaleessa tutustutaan lämmönsiirron perusteisiin ja niihin liittyviin yleisiin matemaattisiin yhtälöihin. Kappaleessa syvennytään tarkemmin lämmönsiirtokertoimen laskentaan ja siihen vaikuttaviin tekijöihin sekä erilaisiin virtausmuotoihin. Lämmönsiirtokertoimen laskennassa tarvitaan myös tunnettuja dimensiottomia lukuja, jotka esitellään tässä kappaleessa. Kappaleen lopussa käsitellään lämmönvaihtimen toimintaperiaatetta ja syvennytään tarkemmin ilmajäähdyttimen toimintaan. Viimeisessä osiossa selvitetään, miten lämmönvaihtimen tehokkuus voidaan laskea, kun selvillä on vain lämmönvaihtimen sisään tulevien väliaineiden lämpötilat.

Lämmönsiirto on lämpöenergian siirtymistä lämpötilaeron vaikutuksesta aineessa tai aineiden välillä. Termodynamiikan toisen lain mukaan, lämpö siirtyy aina korkeammasta matalampaan lämpötilaan. Eri lämpötiloiltaan olevien aineiden tai nesteiden välillä tapahtuu aina lämmönsiirtoa johtumalla, konvektiolla tai säteilyllä. Konvektio on mahdollinen vain kaasuissa ja nesteissä, kun taas lämpösäteily ei vaadi väliainetta edetäkseen. Lämmönjohtuminen sen sijaan vaatii väliaineen edetäkseen. Energiansiirtoa kiinteässä aineessa sanotaankin johtumiseksi. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään lämpötilansa perusteella. Näitä kolmea erilaista lämmönsiirtoa esitellään kuvassa 7. Seuraavissa kappaleissa esitellään eri lämmönsiirtomenetelmiä ja lämmönvaihtimen toimintaa. (Theodore et al. 2018).



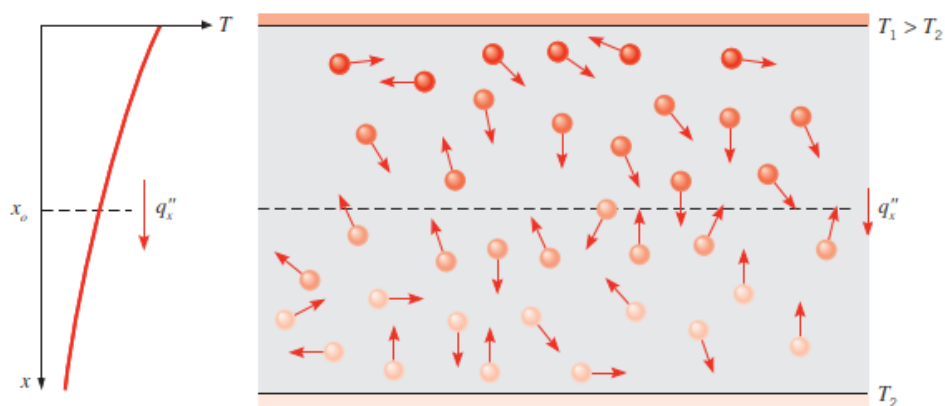
Kuva 7. Lämmönsiirto johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä (Hyppänen 2019).

4.1 Johtuminen

Energiaa siirtyy materiaalissa johtumalla aina, kun on olemassa lämpötilaeroja. Lämmönjohtuminen tapahtuu korkeammasta lämpötilasta matalampaan ja samalla sillä on pyrkimys tasoittaa kappaleiden välisiä lämpötilaeroja. Johtuminen eli konduktio voi tapahtua kiinteissä aineissa, nesteissä tai kaasuissa. (Andersson 1998).

Johtuminen on energian siirtymistä energisemmistä hiukkasista vähemmän energisiin hiukkasiin atomien ja molekyylien vuorovaikutuksen johdosta. Lämpötilan noustessa, molekyylien satunnainen liike voimistuu ja tämän myötä kineettinen energia molekyyllitasolla kasvaa. Naapurimolekyylien törmäykset aiheuttavat energiansiirron niiltä, joilla on suurempi kineettinen energia, niihin, joilla on pienempi kineettinen energia. Johtumisen mekanismi on erilainen kiinteässä aineessa kuin kaasuissa tai nesteissä. Tämä johtuu siitä, että molekyylien käyttäytyminen on erilainen aineen eri olomuodoissa. (Andersson 1998).

Kiinteässä aineessa molekyylit eivät pääse liikkumaan toistensa ohitse, vaan värähtelevät lämmön vaikutuksesta ja energia siirtyy värähtelyä aineen läpi. Aineessa olevat vapaat elektronit lähtevät lämmön johdosta liikkeelle ja törmäävät toisiin elektroneihin sekä ioneihin. Törmätessään ne luovuttavat osan liike-energiasta näille. Kaasuissa ja nesteissä johtuminen tapahtuu puolestaan niin, että molekyylit törmäävät ja diffuusiota syntyy satunnaisen liikkeen aikana. Diffuusiolla tarkoitetaan aineiden sekoittumista siten, että eri aineiden väkyydet pyritään tasoittumaan. Tilannetta voidaan kuvata siten, että lämpimät ja nopeat molekyylit törmäävät kylmiin ja hitaampiin molekyyliin luovuttaen osan liike-energiasta näille. Kuva 8 esittää lämmönjohtumisesta aiheutuvaa molekyylien liikettä. (Theodore et al. 2018).



Kuva 8. Lämmönjohtuminen saa aikaan molekyylien liikettä. (Theodore et al. 2018).

Lämpövirtauksen suunta kuumasta kylmempään on aina selvä yksiulotteisissa lämmönjohtamisongelmissa. Kuva 9 havainnollistaa tätä. Lämpövuolla kuvataan lämmönsiirtomäärää x -suunnassa pinta-alayksikköä kohti kohtisuorassa siirtosuuntaan nähden. Lämmönjohtavuus kuvaa, miten hyvin materiaali johtaa lämpöä ja kuinka riippuvainen se on lämpötilasta. Mitä pienempi lämmönjohtavuus on, sitä heikommin lämpö siirtyy johtumalla. Tämän myötä voimme noudattaa Fourierin lakia ja muodostaa yhtälön 1. (Holman 2010).

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

jossa

$$q_x'' = \text{Lämpövuoto} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

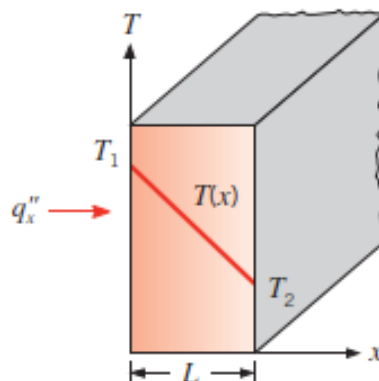
$$k = \text{Lämmönjohtavuus} \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

$$T_1 = \text{Kuumempi lämpötila [K]}$$

$$T_2 = \text{Kylmempi lämpötila [K]}$$

$$\Delta T = \text{Lämpötilaero kuuman ja kylmemmän pinnan välillä [K]}$$

$$L = \text{Paksuus lämpövirran suunnassa [m]}$$



Kuva 9. Yksiulotteinen lämmönsiirto johtumalla. (Theodore et al. 2018).

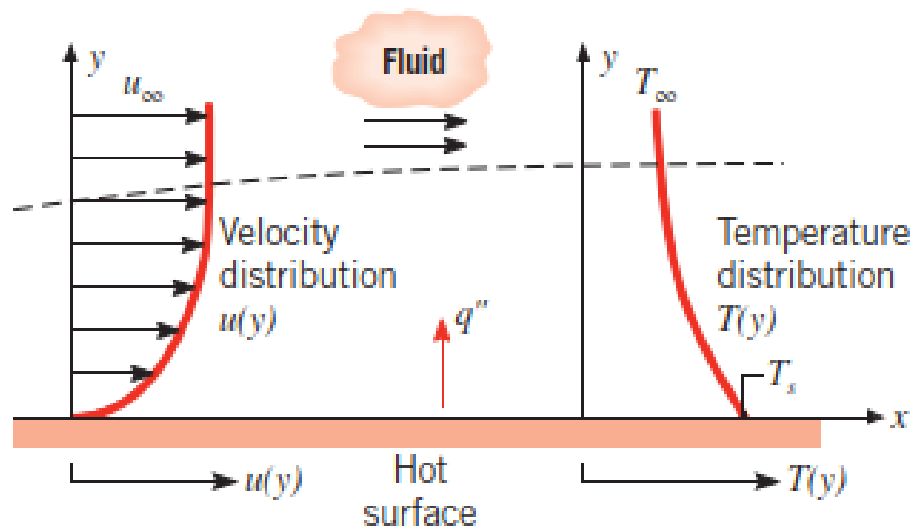
Lämmönjohtavuus riippuu aineen lämpötilasta, mutta usein kuitenkin lämpötilariippuvuus on melko pientä. Tästä johtuen voidaan tulevilla lämpötila-alueella käyttää keskimääräistä lämmönjohtavuusarvoa. (Hemilä et al. 1991).

4.2 Konvektio

Lämpötekniikassa nesteestä ja kaasusta käytetään yhteisnimitystä väliaine. Lämmönsiirtomekanismia kutsutaan konvektioksi, kun nesteen ja kiinteän pinnan lämpötilat ovat erilaiset ja näiden välinen lämmönsiirto tapahtuu väliaineen liikkeen seurauksena pintaan nähden. Konvektiivinen lämmönsiirto on prosessi, jossa lämpö siirtyy mekaanisesti liikkuvan väliaineen mukana kuumemmasta alueesta kylmempään. Konvektiolämmönsiirto tapahtuu kahdella mekanismilla. Ensimmäinen mekanismi on diffuusio tai johtuminen, jossa molekyylien liike on satunnaista. Toinen mekanismi on advektio-, eli makroskooppinen väliaineen liike. Konvektiolla tarkoitetaan lämmönsiirtoa väliaineen makropartikkelien välityksellä. Johtumisessa on kyse puolestaan mikropartikkelien liikkeestä. (Theodore et al. 2018).

Konvektio jaetaan joko vapaaseen tai pakotettuun konvektioon. Lämmönsiirron sanotaan tapahtuvan vapaalla konvektiolla, kun väliaine on vapaassa tilassa. Vapaata konvektiota tapahtuu, kun kiinteä pinta on kontaktissa eri lämpötiloissa olevan väliaineen kanssa. Lähellä pintaa olevan väliaineen lämpötilan muuttuminen aiheuttaa tiheyserojen muuttumisen, ja painovoiman vaikutuksesta väliaine alkaa liikkua. Pakotetussa konvektiossa väliaineen liike johtuu ulkoisesta tekijästä esimerkiksi pumpusta, puhaltimesta tai tuulesta. Ulkoinen tekijä pakottaa väliaineen kulkeutumaan pintamateriaalin ylitse. (Holman 2018).

Hyvä esimerkki on selittää diffuusion ja advektion toimintaa on kuvata ilmiötä, kun väliaine on liikkeessä tasopinnan yläpuolella ja väliaine ja pinta ovat eri lämpötiloissa. Tämän vuorovaikutuksen dynamiikan vuoksi väliaineessa on alue, jossa nopeus vaihtelee nollasta siihen raja-arvoon asti, jolla väliaine liikkuu. Tämä alue väliaineessa tunnetaan nopeuden rajakerroksena. Lämpötilaeron vuoksi väliaineessa on myös alue, jossa sen lämpötila vaihtelee pinnan lämpötilasta, kunnes väliaine saavuttaa oikean raja-arvon. Tätä aluetta kutsutaan termiseksi rajakerrokseksi ja se esitetään kuvassa 10. (Theodore et al. 2018).



Kuva 10. Rajakerroksen kehitys konvektiolämmönsiirrossa. (Theodore et al. 2018).

Nopeuden rajakerroksen pisteessä, jossa nopeus on nolla, ainoa lämmönsiirtomekanismi on diffuusio. Väliaineen liikkeen lämmönsiirto tapahtuu, kun rajakerrokseen johdettu lämpö kulkee virrassa ja lopulta siirtyy kerroksen ulompaan osaan. Rajakerros kasvaa sitten x :n positiiviseen suunnan mukana. Konvektio tunnetaan Newtonin jäähdytylakina, joka saadaan laskettua yhtälöstä 2. (Theodore et al. 2018).

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

jossa

q = Lämpöteho [W]

h = Lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$

A = Pinta – ala [m^2]

T_s = Tarkasteltavan pinnan lämpötila [K]

T_∞ = Ympäristön lämpötila [K]

Konvektiolämmönsiirtokerrointa on vaikea määrittää, koska siihen vaikuttavat väliaineen ominaisuus (tiheys, lämmönjohtavuus, dynaaminen viskositeetti ja ominaislämpö), pinnan ominaisuudet (geometria ja karheus), väliaineen virtaustila (laminaarinen vai turbulenttinen)

ja konvektiotapa (vapaa tai pakotettu). Useasta muuttujasta johtuen lämmönsiirtokertoimelle on kehitetty useampia teknisiä laskentakaavoja. Laskentakaavat eli korrelaatiokaavat on laadittu teoreettisesti tai kokeellisesti.

Korrelaatiokaavoilla on yhteistä se, että nämä ovat dimensiotomia suureita eli näillä ei ole yksikköä. Näitä kaavoja ovat Reynoldsin luku (hitsausvoimien ja viskoosien voimien suhdetta), Prandtin luku (liikemäärän ja lämmönsiirron diffuusion suhde nopeuden ja lämpötilan rajakerroksissa), Schmidtin luku (liikemäärän ja aineensiirron diffuusion suhde nopeuden ja konsentraation rajakerroksissa) sekä-, Nusseltin luku (kuvaava dimensiotonta lämpötilagradienttia kappaleen pinnalla). (Theodore et al. 2018).

4.2.1 Dimensiottomat luvut

Turbulenttisella virtauksella lämmönsiirto on laminaarista virtausta tehokkaampaa. Siirtyminen laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseen virtaukseen riippuu muun muassa pinnan geometriasta, karheudesta, virtausnopeudesta, pinnan lämpötilasta ja nestetyypistä. Osborn Reynolds huomasi 1880-luvulla tehtyjen kokeiden jälkeen, että virtausjärjestelmä riippuu pääasiassa inertiaivoimien suhteesta nesteen viskoosisiin voimiin. Tätä suhdetta kutsutaan Reynoldsin luvuksi ja se saadaan laskettua yhtälöstä 3. (Yunus et al. 2015).

$$Re = \frac{\rho v D_i}{\mu} \quad (3)$$

jossa

Re = Reynoldsin luku [–]

ρ = Väliaineen tiheys $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

v = Väliaineen virtausnopeus $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

D_i = Putken sisähalkaisija [m]

μ = Väliaineen dynaaminen viskositeetti [Pa · s]

Ludwig Prandtin otti käyttöön rajakerroskäsitteen vuonna 1904 ja hänen teoriansa mukaan luku kuvaa parhaiten nopeuden ja lämpörajakerroksen suhteellista paksuutta. Prandtin luvulla tarkoitetaan liikemäärän ja kinemaattisen viskositeetin suhdetta. Luku mittaa liikevoiman suhteellista tehokkuutta ja energiasiirtoa. Prandtin luku saadaan laskettua yhtälöstä 4. (Yunus et al. 2015).

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (4)$$

jossa

Pr = Prandtin luku [–]

k = Väliaineen lämmönjohtavuus $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$

c_p = Väliaineen ominaislämpökapasiteetti $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

μ = Väliaineen dynaaminen viskositeetti [Pa · s]

Nusseltin luku on nimetty Wilhelm Nusseltin mukaan. Nusselt antoi merkittävän panoksen konvektiivisen lämmönsiirron tutkimukseen 1900-luvun alkupuoliskolla, ja lukua pidetään konvektiolämmön siirtokertoimenä. Nusseltin luku edustaa lämmönsiirron tehostamista nestekerroksen läpi konvektion seurauksena suhteessa saman nestekerroksen johtamiseen. Mitä suurempi Nusseltin luku, sitä tehokkaampi konvektio on kyseessä. Nusseltin luku voidaan laskea yhtälön 5 mukaisesti. (Yunus et al. 2015).

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (5)$$

jossa

Nu = Nusseltin luku [–]

h = Väliaineen lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$

k = Väliaineen lämmönjohtavuus $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$

L_c = Ominaispituus [m]

4.2.2 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Konvektioon liittyvä oleellinen asia on se, onko virtaus laminaarinen vai turbulenttinen. Virtausta kutsutaan laminaariseksi silloin, kun Reynoldsin luku on pieni ja virtauksen virtaviivat ovat suoria ja ne esiintyvät pienillä nopeuksilla. Laminaarinen virtaus on puhdasta virtausta, jossa ei näy pyörteitä. Laminaarisessa virtauksessa konvektio noudattaa aina jotain muuta korrelaatiota kuin turbulenttisessa. Virtausta kutsutaan turbulenttiseksi, kun Reynoldsin luku ja virtauksen nopeus on suuri. Turbulenttisessa virtauksessa virtaviivat ovat pyörteisiä ja muodoltaan epämääräisiä, mutta niillä on kuitenkin tietty keskimääräinen nopeussuunta. (Yunus et al. 2015).

Virtaus muuttuu aina laminaarisesta turbulenttiseksi tietyllä Reynoldsin luvun arvolla tietyssä virtausgeometriassa. Putkivirtauksen osalta on todettu kokeellisesti, että Reynoldsin luvun ollessa alle 2300, virtaus on laminaarinen ja luvun ollessa yli 10 000, virtaus on turbulenttista. Näiden arvojen väliin jäävää aluetta kutsutaan niin sanotuksi siirtymävyöhykkeeksi. Siirtymävyöhykkeellä virtaus käyttäytyy usein siten, että se on hetkittäin laminaarinen ja hetkittäin turbulenttinen. (Yunus et al. 2015).

Laminaarisessa virtauksessa, jossa putken lämpötila on vakio, voidaan käyttää Nusseltin luvun arvoa 3.66. Turbulenttiselle virtaukselle on kehitetty useita korrelaatiokaavoja ja niistä tunnetuin korrelaatiokaava on Dittus-Boelterin yhtälö. Yhtälön virhemarginaaliksi on annettu 25 % ja tämän myötä tässä työssä hyödynnetään Gnielinskin korrelaatiokaavaa. Gnielinskin kaavan virhemarginaali on alle 10 %, mutta sen laskeminen on huomattavasti vaikeampaa. Gnielinskin yhtälöä voidaan hyödyntää, kun Prandtin luku on välillä 0,5 – 2000 ja Reynoldsin luku on välillä 3000 – 5 x 10⁶. Gnielinskin korrelaatiokaava on nähtävissä yhtälössä 6. (Theodore et al. 2018).

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)} \quad (6)$$

jossa

Nu = Nusseltin luku [–]

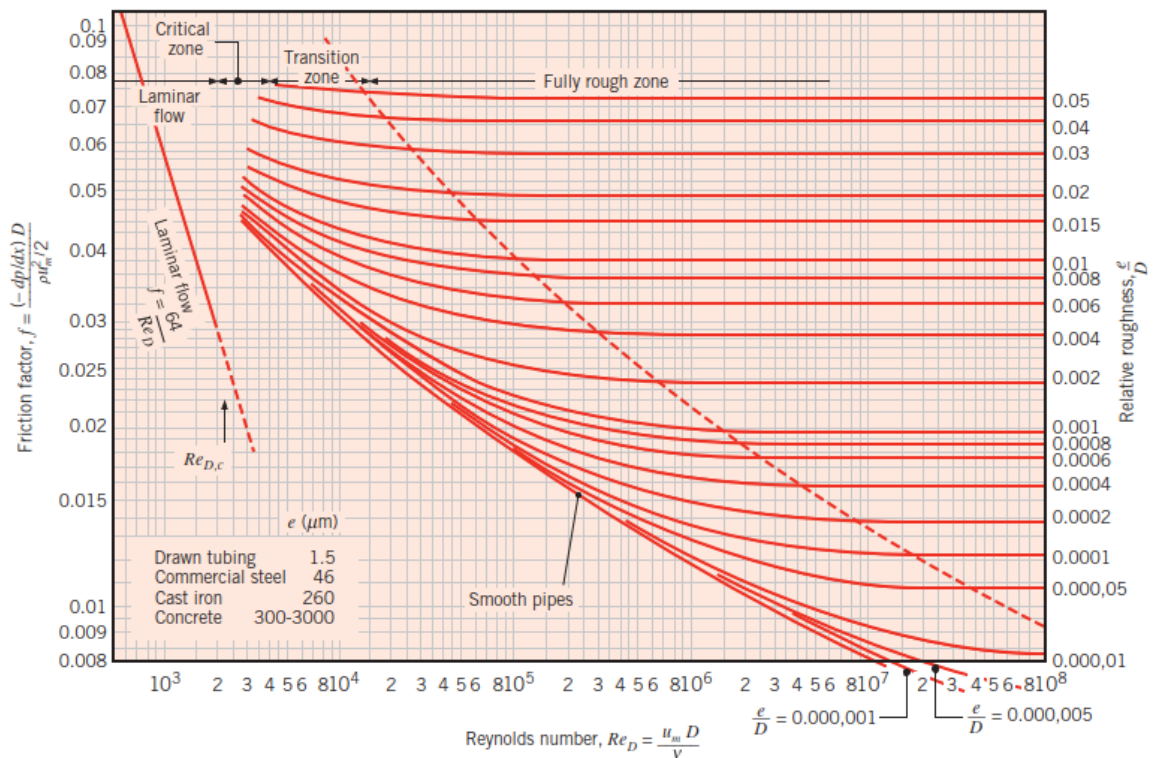
Pr = Prandtin luku [–]

Re = Reynoldsin luku [–]

$f = \text{Kitkakerroin} [-]$

Gnielinskin korrelaatiokaavassa oleva kitkakerroin voidaan määrittää Moodyn kuvaajasta, joka havainnollistetaan kuvassa 11, tai vaihtoehtoisesti laskea yhtälöstä 7 (Holman 2010).

$$f = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2} \quad (7)$$



Kuva 11. Moodyn kuvaaja kitkakertoimen määrittämiseen. (Theodore et al. 2018).

4.3 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin on laite, jota käytetään lämpöenergian siirtämiseen kahden tai useamman väliaineen välillä, kiinteän pinnan ja väliaineen välillä tai kiinteiden hiukkasten ja väliaineen välillä eri lämpötiloissa. Useimmissa lämmönvaihtimissa lämmönsiirto nesteiden välillä tapahtuu erotusseinän kautta tai seinään ja seinästä ohimenevällä tavalla. Monissa lämmönvaihtimissa väliaineet erotetaan lämmönsiirtopinnalla ja ihannetapauksessa väliaineet eivät sekoitu keskenään. Lämmönvaihtimet ovat yleisesti käytössä lämmityksessä, jäähdytys-, ilmastointi-, voimalaitos- ja kemiantehtaissa, petrokemian laitoksissa, öljynjalostamoissa, maakaasun jalostuksessa ja jäteveden käsittelyssä. (Thulukkanam 2013).

Lämmönvaihtimen lämpöteho voidaan laskea massavirran, väliaineen ominaislämpökapasiteetin ja väliaineen lämpötilan muutoksen tulona. Lämpötehon laskenta on esitetty yhtälössä 8.

$$q = \dot{m}c_p(T_i - T_o) \quad (8)$$

jossa

q = Lämpöteho [W]

\dot{m} = Väliaineen massavirta $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

c_p = Väliaineen ominaislämpökapasiteetti $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$

T_i = Sisään menevä väliaineen lämpötila [K]

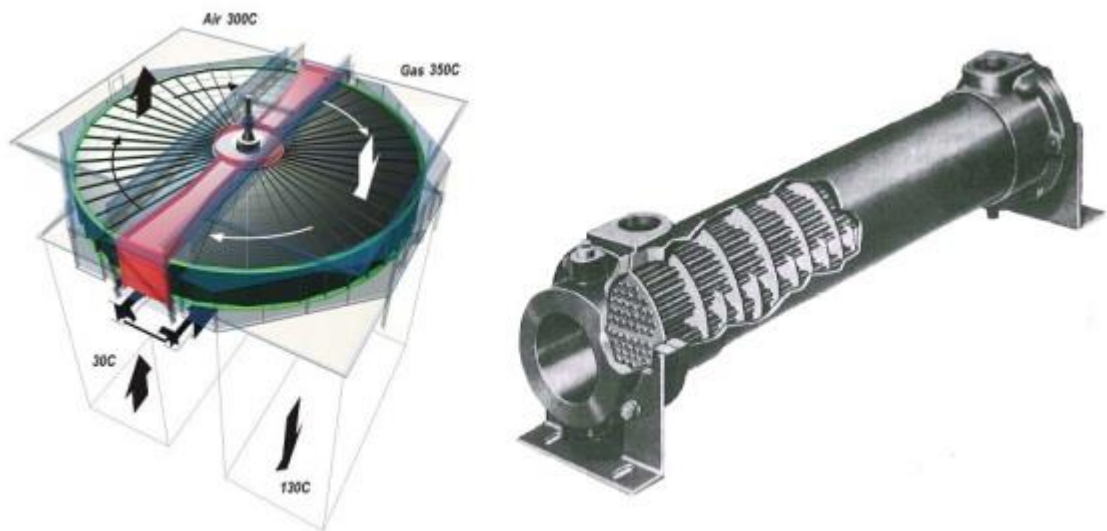
T_o = Ulos tuleva väliaineen lämpötila [K]

Lämmönvaihtimet luokitellaan yleensä virtauskytkennän ja rakennetyypin mukaan, mutta ne voidaan myös luokitella suuremmassa mittakaavassa rakenteen, siirtoprosessin, pinnan tiivistystaseiden, virtausjärjestelyjen, ohitusjärjestelyjen, prosessinesteiden vaiheen ja lämmönsiirtomekanismien mukaan. Teollisuudessa yli 90 % käytetyistä lämmönvaihtimista on kuori- ja putkilämmönvaihtimia. Pintalämmönvaihtimet voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan kahteen ryhmään rekuperaattoreihin ja regeneraattoreihin. (Thulukkanam 2013).

Rekuperatiivisessa lämmönsiirtimessä kahden väliaineen erottaa lämmönsiirtopinta, jossa ei yleensä ole liikkuvia osia. Rekuperaattoreissa kulkee jatkuvasti kaksi ainevirtaa ja lämpö siirtyy lämpötilaeron takia kuumasta kylmempään lämmönsiirtopinnan läpi. Rekuperatiiviset lämmönsiirtimet jaetaan virtaussuunnan mukaan risti-, vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimiin sekä näiden yhdistelmiin. Ristivirtalämmönsiirtimissä ainevirrat liikkuvat toistensa suhteen ristissä. Esimerkiksi Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen hätädieselgeneraattoreiden jäähdytyspiiriin ilmalämmönvaihtimet ovat ristivirtalämmönsiirtimiä. (Fagerholm 1986).

Vastavirtalämmönsiirtimissä ainevirrat liikkuvat vastakkaisiin suuntiin, mikä mahdollistaa kylmemmän ilman lämmittämisen yli kuumemman virran poistolämpötilan. Vastavirtalämmönsiirtimessä kahden väliaineen välinen lämpötilaero pysyy lähes vakiona, minkä johdosta se johtaa suurempaa lämmönsiirtoa kuin vastaavanlainen myötävirtalämmönsiirrin. Myötävirtalämmönsiirtimessä väliaineet liikkuvat samaan suuntaan, mikä johtaa siihen, että lämmönsiirtimen alussa lämpötilaero on suuri. Väliaineen liikkeessa myötävirtalämmönsiirtimessä niiden lämpötila lähestyy toisiaan asympotoottisesti, minkä johdosta kyseisiä lämmönsiirtimiä käytetään kohteissa, jossa halutaan rajoittaa, ettei väliaine pääse jäätymään tai kiehumaan. (Fagerholm 1986).

Regeneraattorisessa lämmönsiirtimessä lämmönsiirto tapahtuu lämmönsiirtomateriaalin lämpökapasiteetin avulla. Materiaali saatetaan kosketuksiin kuumien ja kylmien virtausten kanssa. Lämmönsiirtimessä väliaineet liikkuvat vuoron perään yleensä vastakkaisiin suuntiin, jolloin materiaaliin varastoidaan lämpöenergiaa kuumasta virtauksesta ja materiaali vapauttaa lämpöenergiaa kylmään virtaukseen. Regeneraattorin kustannukset ovat rekuperaattoria edullisemmat, mutta väliaineen välisten vuotojen välttäminen on hyvin hankalaa. Kuvasta 12 nähdään rekuperatiivinen ja regeneratiivinen lämmönsiirrin. (Fagerholm 1986).



Kuva 12. Regeneratiivinen lämmönsiirrin vasemmalla ja rekuperatiivinen lämmönsiirrin oikealla. (LUT 2018).

Lämmönsiirto lämmönvaihtimessa sisältää väliaineen ja seinämän välistä konvektiota sekä johtavuutta. Lämmönvaihtimen analysoinnissa hyödynnetään kokonaislämmönsiirtokerrointa U , joka määrittelee kaikkien näiden vaikutusta lämmönsiirtoon. Lämmönsiirron kokonaiskerroin pinta-alaa kohden UA on olennainen edellytys lämmönvaihtimen suunnittelulle

ja suorituskylaskelmille. Lämmönsiirron kokonaiskerroin voidaan laskea yhtälön 9 mukaisesti. (Thulukkanam 2013).

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_h A_h} + \frac{R''_{f,i}}{A_h} + R_w + \frac{1}{h_c A_c} \quad (9)$$

jossa

UA = Lämmönsiirron kokonaiskerroin pinta – alaa kohden $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

h_h = Putkessa virtaavan kuumen väliaineen lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

A_h = Kuuman puolen pinta – ala $[m^2]$

$R''_{f,i}$ = Putken sisäinen likaisuuskerroin $[-]$

R_w = Putken lämpövastus $\left[\frac{K}{W} \right]$

h_c = Kylmän väliaineen lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

A_c = Kylmän puolen pinta – ala $[m^2]$

Yhtälössä 9 oleva putken lämpövastus saadaan laskettua yhtälöstä 10.

$$R_w = \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi kNL} \quad (10)$$

jossa

D_o = Putken ulkohalkaisija $[m^2]$

D_i = Putken sisähalkaisija $[m^2]$

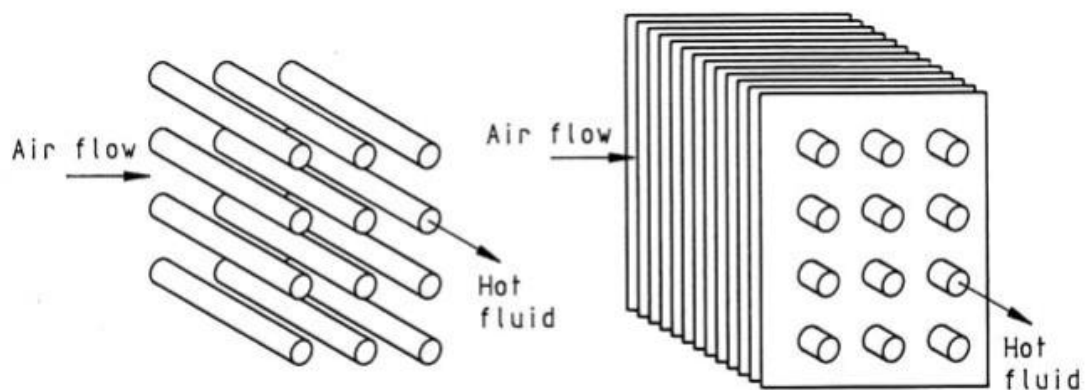
k = Putken materiaalin lämmönjohtavuus $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

N = Putkien määrä $[-]$

L = Putken pituus $[m]$

4.3.1 Ilmajäähdytin

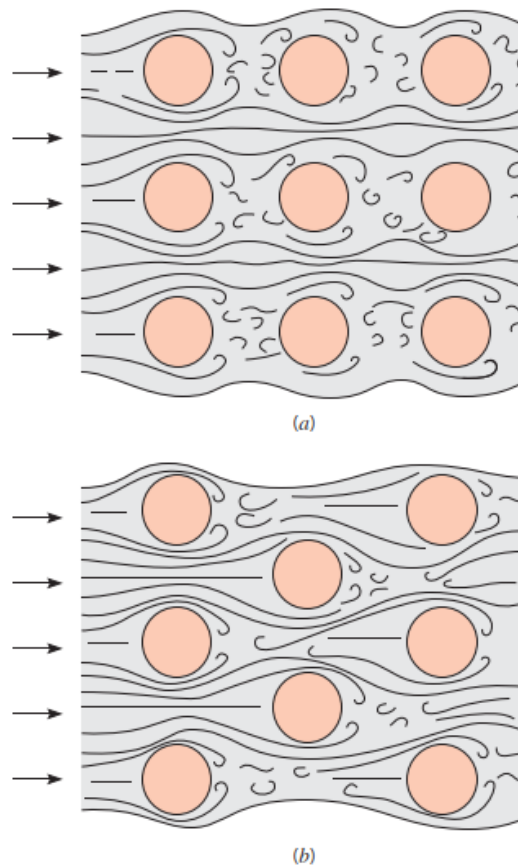
Ilmajäähdytyksessä lämmönvaihtimessa lämpö siirretään virtaavasta nesteestä jäähdytysilmavirran avulla. Yleisimmät ilmajäähdyttimet ovat ristivirtausjäähdyttimiä, jossa jäähdyttimen putken sisällä virtaa kuuma neste ja putkinipun ylitse kulkee viileä ilma. Jäähdytyskennossa olevien putkien määrä riippuu pitkälti tarvittavasta jäähdytystehosta. Putkissa virtaava neste on tässä tapauksessa sekoittamatonta ja putkien ylitse kulkeutuva ilma voidaan jakaa sekoitettuun tai sekoittamattomaan virtaukseen. Sekoitettussa ilmavirtauksessa ilma voi liikkua vapaasti putkinippujen ylitse, kun taas sekoittamattomassa ilmavirtauksessa virtaukset rajoittuvat omiin kanaviinsa. Ilmajäähdyttimien osalta lämmönsiirtokerroin on ilma- puolella pienempi kuin nestepuolella, mutta sitä voidaan parantaa asentamalla lamelleja. Lamellien myötä ilmavirtauksesta saadaan sekoittamaton. Kuvassa 13 on esitetty ristivirtauslämmönvaihdin. (Detlev et al. 2004).



Kuva 13. Ristivirtalämmönvaihdin, jossa vasemmalla näkyy sekoitettu ilmavirtaus ja oikealla sekoittamaton. (Detlev et al. 2004).

Laskettaessa ilmajäähdyttimen kokonaislämmönsiirtokerrointa, on ensimmäisenä selvitettävä ilmavirtauksen dimensiottomat luvut, jotka ovat Reynoldsin-, Pradtlin- ja Nusseltin luvut. Ilmajäähdyttimen ilmapuolen lämpövastukseen vaikuttavat tekijät ovat ilman aineominaisuudet, ilmavirtauksen nopeus, jäähdyttimen mitat ja virtauksen geometriat. Tärkeimpinä tekijöinä pidetään ilman nopeutta ja virtauksen geometriaa. (Theodore et al. 2018).

Kuva 14 havainnollistaa ilmajäädyttimen putkijärjestystä, josta voidaan nähdä ilmavirtauksen pyörteet. Ilmajäädyttimessä olevat putket ovat joko kohdistettuina riveihin tai porrastettu toisistaan. Putkien ollessa kohdistettuina toisiinsa, ilmavirtauksen konvektiokerroin paranee ilmavirtauksen sekoittuessa toisiinsa. Konvektiokerroin kasvaa suunnilleen viidenteen riviin asti, minkä jälkeen virtausolosuhteissa ja siten konvektiokertoimessa tapahtuu vain vähän muutoksia. Porrastetulle putkiryhmälle päävirtauksen reitti on mutkaisempi ja ristiin virtaavan nesteeseen sekoittuminen lisääntyy linjassa olevan putkijärjestelyn suhteen. Erityisesti pienille Reynoldsin luvuille suositellaan porrastetun järjestelyn mukaisempaa virtausta, sillä sen avulla saadaan tehostettua lämmönsiirtoa. (Theodore et al. 2018).



Kuva 14. Ristivirtauksen kuvaus putkipaketin ylitse (a) riveittäin (b) porrastetusti. (Theodore et al. 2018).

4.3.2 Sekoitettu ilmavirtaus

Ristivirtalämmönvaihdin, jossa putkien sisällä virtaa neste ja putkipaketin ylitse vapaassa tilassa virtaa ilma, sanotaan sekoitetuksi ilmavirtaukseksi. Sekoitettun ilmavirtauksen läm-

mönsiirtokertoimen laskennassa hyödynnetään lämmönsiirrontutkimuksista saatuja korrelaatiokaavoja. Kuvan 13 vasemmassa reunassa nähdään ristivirtauslämmönvaihdin sekoitetulla ilmavirtauksella. (Theodore et al. 2018).

Ilmajäähdyttimessä olevan putkipaketin ylitse kulkeutuvan ilman Nusseltin luku saadaan laskettua Zukauskasin yhtälöllä, joka on esitetty yhtälössä 11. Tätä yhtälöä käytetään silloin, kun putkirivien määrä on alle 20. Yli 20 putkirivien kohdalla yhtälöstä poistetaan korjauskerroin C_2 . Yhtälössä esiintyvät vakiot C_1 ja m ovat nähtävissä taulukosta 1 ja korjauskerroin C_2 on nähtävissä taulukossa 2. (Theodore et al. 2018).

$$Nu_D = C_2 C_1 Re_D^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (11)$$

jossa

Re_D = Reynoldsin luku [–]

Pr = Pradlin luku, ulos virtaavan väliaineen lämpötilan mukaan [–]

Pr_s = Prandlin luku, sisään virtaavan väliaineen lämpötilan mukaan [–]

C_1 = Vakio (Taulukko 1) [–]

C_2 = Korjauskerroin (Taulukko 2) [–]

m = Vakio (taulukko 1) [–]

Taulukko 1. Nusseltin-luvun yhtälön vakiot C_1 ja m . (Theodore et al. 2018).

Configuration	$Re_{D,max}$	C_1	m
Aligned	10–10 ²	0.80	0.40
Staggered	10–10 ²	0.90	0.40
Aligned	10 ² –10 ³ } Staggered	Approximate as a single (isolated) cylinder	0.63
Aligned	10 ³ –2 × 10 ⁵		
($S_T/S_L > 0.7$) ^a			
Staggered	10 ³ –2 × 10 ⁵	0.35(S_T/S_L) ^{1/5}	0.60
($S_T/S_L < 2$)			
Staggered	10 ³ –2 × 10 ⁵	0.40	0.60
($S_T/S_L > 2$)			
Aligned	2 × 10 ⁵ –2 × 10 ⁶	0.021	0.84
Staggered	2 × 10 ⁵ –2 × 10 ⁶	0.022	0.84

Taulukko 2. Nusseltin-luvun yhtälön korjauskerroin C_2 . Korjauskerrointa käytetään silloin, kun putkien rivimäärä on alle 20 ja Reynoldsin luku on yli 1000. (Theodore et al. 2018).

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Aligned	0.70	0.80	0.86	0.90	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
Staggered	0.64	0.76	0.84	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Yhtälössä 10 oleva Reynoldsin luku saadaan laskettua yhtälön 12 avulla. (Theodore et al. 2018).

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (12)$$

jossa

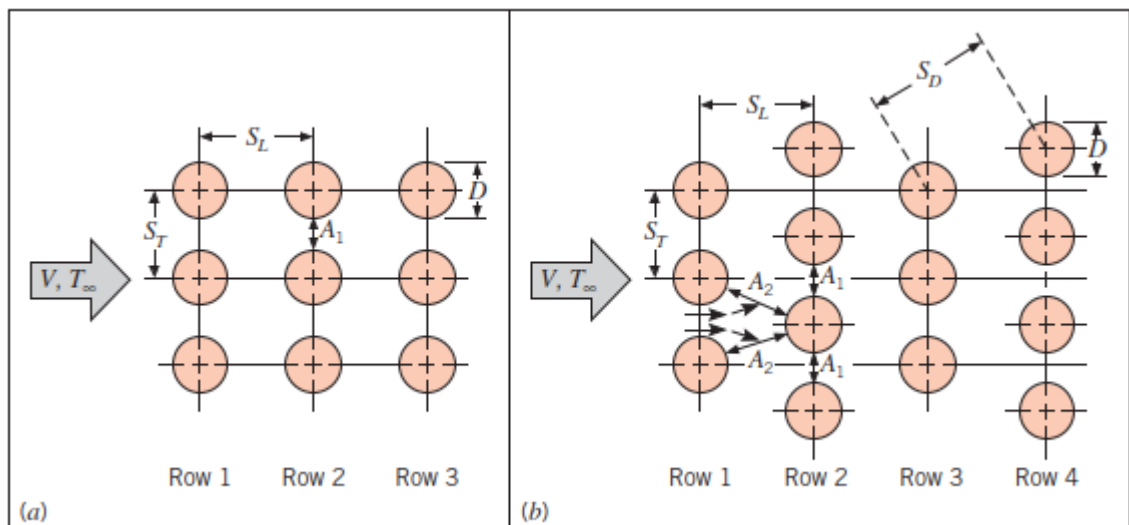
$$\rho = \text{Väliaineen tiheys} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_{max} = \text{Väliaineen maksimi nopeus} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D = \text{Putken halkaisija} [\text{m}]$$

$$\mu = \text{Väliaineen dynaaminen viskositeetti} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

Yhtälössä 12 oleva väliaineen maksinopeus saadaan ratkaistua kuvan 15 avulla ja hyödyntämällä yhtälöitä 13, 14 ja 15.



Kuva 15. Ristivirtauksen kuvaus putkipaketin ylitse (a) riveittäin (b) porrastetusti. (Theodore et al. 2018).

Väliaineen maksimivirtaus voi esiintyä kuvan 15 kohdissa A_1 tai A_2 ja tämä voidaan selvittää yhtälöstä 13.

$$2(S_D - D) < (S_T - D) \quad (13)$$

Jos yhtälössä oleva $S_T - D$ on suurempi, niin silloin maksimivirtaus esiintyy kohdassa A_2 ja se saadaan laskettua yhtälön 14 avulla. Jos taas $S_T - D$ on pienempi, niin silloin maksimivirtaus esiintyy kohdassa A_1 ja se saadaan laskettua yhtälön 15 avulla. (Theodore et al. 2018).

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} v \quad (14)$$

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} v \quad (15)$$

jossa

$$V_{\max} = \text{Väliaineen maksimi nopeus} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D = \text{Putken halkaisija [m]}$$

$$S_T = \text{Putken poikittainen etäisyys [m]}$$

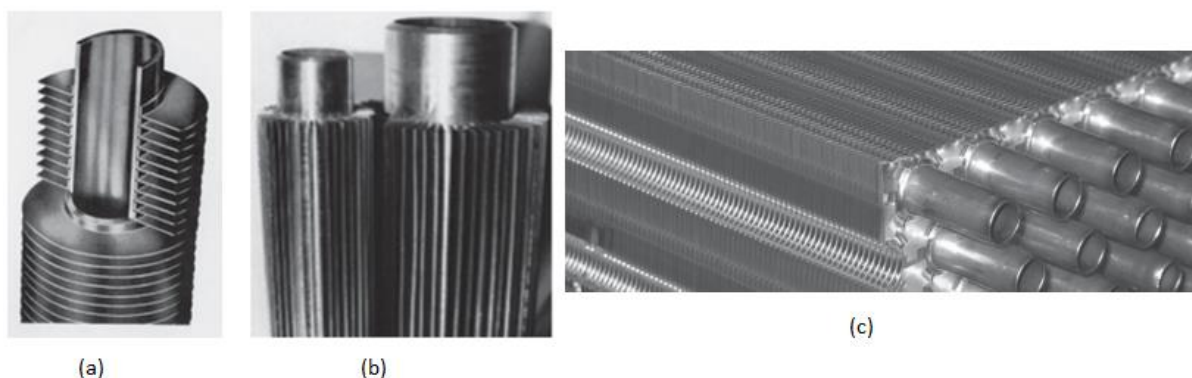
$$S_D = \text{Putken viisottainen etäisyys [m]}$$

$$v = \text{Väliaineen nopeus} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

4.3.3 Sekoittamaton ilmapvirtaus

Sekoittamattoman ilmapvirtauksen ilmajäähdyttimiä on käytössä useissa eri kohteissa. Tyyppisimmät kohteet ovat esimerkiksi auton jäähdytin, ilmastointilaitteet ja elektroniikan jäähdytys. Sekoittamattomassa ilmapvirtauksessa käytetään hyödyksi niin kutsuttuja eväitä eli ripoja. Ripojen tarkoituksena on kasvattaa ilmapuolen pinta-alaa ja täten kasvattaa konvektiolämmönsiirtokerrointa. Tämä johtuu siitä, että materiaalin pinnan ja kaasun välinen lämmönsiirtokerroin on hyvin pieni verrattuna materiaalin pinnan ja nesteeseen väliseen. Lämmönvaihtimissa olevat rivat voidaan jaotella kolmeen ryhmään kuvan 16 mukaan. (Thulukkanam et al. 2013).

- Yksittäisen putken omat rivat (a)
- Yksittäisen putken pitkittäiset rivat (b)
- Tasaiset tai jatkuvat rivat putkiryhmässä (c)



Kuva 16. Jäähdytysputkien eväiden/ribojen jaottelu. (Thulukkanam et al. 2013).

Kuvassa 16 olevia jatkuvan rivin geometrian tyyppisiä lämmönsiirtimiä käytetään yleisesti ilmastointilaitteissa ja erityisesti polttomoottorien ilmajäähdyttimissä sekä moottorien välijäähdyttimissä ahtoilman jäähdyttämiseen. (Thulukkanam et al. 2013).

Sekoittamattoman ilmajäähdyttimen ilmapuolen lämmönsiirtokertoimen laskeminen on hyvin monimutkaista. Lämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa suuresti ilmajäähdyttimen geometria ja sen laskemiseen tarvitaan huomattava määrä teknisiä tietoja lämmönvaihtimesta. Luotettavin arvo saadaan tekemällä ilmajäähdyttimelle laboratoriotestit. Laskentaa varten on vuosien saatossa kehitetty useampia korrelaatiokaavoja ja kuvaajia. (Thulukkanam et al. 2013).

Käytetyin ja tunnetuin ratkaisutapa on käyttää ”Kaysin ja Londonin” kuvaajaa. Kays ja London esittävät lämmönsiirtoteoriansa monille erilaisille pinnoille mitattomassa muodossa käyttäen Colburnin ehdottamaa menetelmää. Kaysin ja Londonin kuvaaja löytyy liitteestä 1. Nykyään ilman lämmönsiirtokerrointa on tutkittu enemmän ja siihen on saatavissa useampia erilaisia korrelaatiokaavoja. Tässä työssä hyödynnetään Garyn ja Webbin korrelaatiokaavaa, jolla saadaan ratkaistua Colburin kerroin j . (Thulukkanam et al. 2013).

Garyn ja Webbin korrelaatiokaava on nähtävissä yhtälöstä 16 ja sitä voidaan käyttää, kun putkipaketissa on vähintään neljä putkiriviä. Neljäs rivi stabiloi lämmönsiirtokertoimen, joten

j -kerroin on yli neljälle putkiriville sama, kuin nelirivisellä lämmönvaihtimella. Kun putkipaketissa on alle neljä putkiriviä, käytetään yhtälöä 17. (Thulukkanam et al. 2013).

$$j_4 = 0,14 Re_D^{-0,328} \left(\frac{P_t}{P_1}\right)^{-0,502} \left(\frac{s}{d_o}\right)^{0,0312} \quad (16)$$

$$\frac{j_N}{j_4} = 0,991 \left[2,24 Re_D^{-0,092} \left(\frac{N_t}{4}\right)^{-0,031} \right]^{-0,607(4-N_t)} \quad (17)$$

jossa

Re_D = Reynoldsin luku (putken ulkohaisija) [-]

P_t = Putkien poikittainen etäisyys [m]

P_1 = Putkien pituussuuntainen etäisyys [m]

s = Ripojen etäisyys [m]

d_o = Putken ulkohalkaisija [m]

N_t = Putkirivien määrä [-]

Ilmajäähdyttimessä virtaavan ilman lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua yhtälöstä 18.

$$h = j \frac{G c_p}{Pr^{\frac{2}{3}}} \quad (18)$$

jossa

j = Colburin kerroin [-]

h = Lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

G = Massanopeus $\left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$

c_p = Ominaislämpökapasiteetti $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$

Pr = Pradtlin luku [-]

Yhtälössä 18 oleva massanopeus saadaan laskettua yhtälöstä 19. (Thulukkanam et al. 2013).

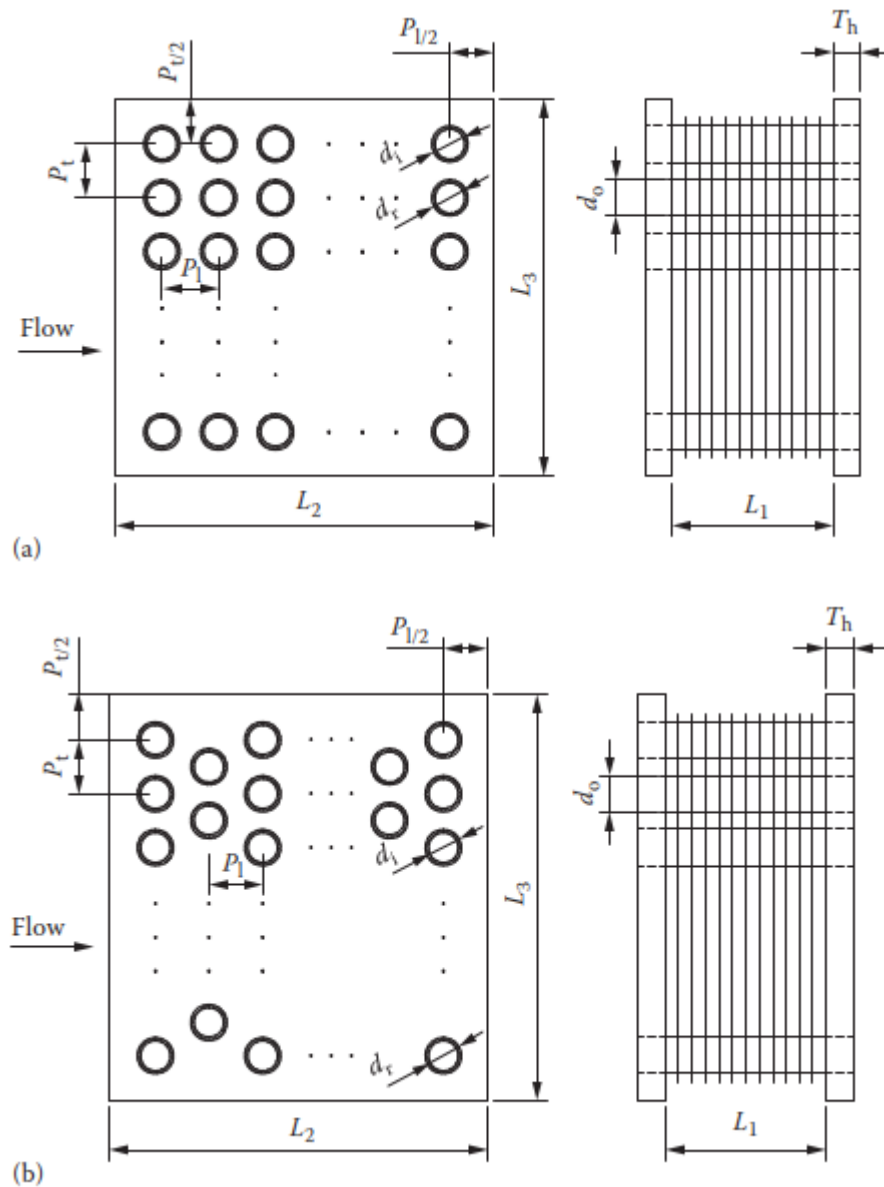
$$G = \frac{\dot{m}}{A_o} \quad (19)$$

jossa

\dot{m} = ilman massavirtaus $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$

A_o = Pienin vapaa virtausalue $[\text{m}^2]$

Pystyäkseen laskemaan yhtälössä 19 olevan pienimmän vapaan virtausalueen, on lämmönvaihtimesta selvitettävä ovatko putket riveittäin vain porrastetusti. Laskemista varten tilannetta voidaan havainnollistaa tarkemmin kuvan 17 mukaisesti. Kuvan perusteella voidaan selvittää tarkemmin ilman pienin vapaa virtausalue. Kuvassa 17 a putket ovat riveittäin ja ilman vapaa virtausalue voidaan laskea yhtälön 20 avulla. Kuvassa 17 b lämmönvaihtimen putket ovat porrastetusti ja ilman vapaa virtausalue voidaan laskea yhtälöstä 21. (Thulukkanam et al. 2013).



Kuva 17. Jatkuva ripainen putkilämmönvaihdin: (a) putket riveittäin ja (b) putket porrastetusti. (Thullukanam et al. 2013).

$$A_o = [(P_t - d_o)L_1 - (P_t - d_o)t_f N_f L_1] \left(\frac{L_3}{P_t}\right) \quad (20)$$

$$A_o = \left\{ \left(\frac{L_3}{P_t} - 1\right) z'' + [(P_t - d_o) - (P_t - d_o)t_f N_f] \right\} L_1 \quad (21)$$

jossa

P_t = Putkien etäisyys [m]

d_o = Pukten ulkohalkaisija [m]

L_1 = Lämmönvaihtimen pituus [m]

L_3 = Lämmönvaihtimen korkeus (Rivan korkeus) [m]

t_f = Rivan paksuus [m]

N_f = Ripojen määrä pituusyksikköä kohden [–]

Porrastetuissa putkipaketeissa pienin vapaa ilmavirtaus voi esiintyä, joko poikittaissuuntaisesti tai pitkittäissuuntaisesti. Yhtälössä 21 oleva z'' kuvaa tätä aluetta ja se valitaan seuraavan ehdon mukaisesti:

$$z'' = x'' \quad \text{jos } x'' < y''$$

$$z'' = y'' \quad \text{jos } y'' < x''$$

x'' voidaan laskea yhtälön 22 mukaisesti ja y'' yhtälön 23 mukaisesti.

$$x'' = (P_t - d_t) - (P_1 - d_t)t_f N_f, \quad (22)$$

$$y'' = \left[\left(\frac{P_t}{2} \right)^2 + (P_1)^2 \right]^{0,5} - d_t - (P_t - d_t)t_f N_f. \quad (23)$$

4.4 NTU-tehokkuusmenetelmä

Lämmönvaihtimen lämpötehokkuuden laskemiseksi on neljä erilaista suunnittelumenetelmää. Nämä ovat:

- ϵ -NTU menetelmä
- P-NTU menetelmä
- LMTD menetelmä
- Ψ -P menetelmä

Tässä työssä syvennytään tarkemmin NTU-menetelmään ja sitä hyödynnetään työn laskentatulosten käsittelyssä. NTU-tehokkuusmenetelmä on alun perin kehitetty vuonna 1942,

mutta sitä on kehitetty vuosien saatossa. Tällä hetkellä NTU-tehokkuusmenetelmän käyttämistä pidetään hyväksytyimpänä lämmönvaihtimen suunnittelu- ja analyysimenetelmänä. (Cabezas et al. 2015).

NTU-menetelmässä tehokkuudella ε on keskeinen rooli, vaikka sen käsite on suhteellisen yksinkertainen. Idea lämmönvaihtimen tehokkuudesta liittyy energiansäästöön, koska se määrittää todellisen lämmönsiirron ja maksimilämmönsiirron välisenä suhteena kuumille ja kylmille virtauksille annetuissa tulolämpötiloissa. Tehokkuus ε lämmönvaihtimen todellisen lämmönsiirron ja suurimman mahdollisen lämmönsiirron suhteena voidaan laskea yhtälöstä 24. (Thulukkanam et al. 2013).

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (24)$$

Yhtälön 24 mukaisesti tehokkuus on dimensioton arvo ja sen on oltava alueella $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Lämmönvaihtimen todellinen lämmönsiirtoteho saadaan laskettua, kun tiedetään ε tehokkuus ja väliaineen sisään tulevat lämpötilat T_h ja T_c . Lämmönsiirtoteho voidaan esittää yhtälön 25 mukaisesti. (Theodore et al. 2018).

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (25)$$

jossa

q = Lämpöteho [W]

ε = Tehokkuus [-]

C_{\min} = Pienempi väliaineen lämpövirta $\left[\frac{\text{W}}{\text{K}}\right]$

$T_{h,i}$ = Kuuman väliaineen sisään menevä lämpötila [K]

$T_{c,i}$ = Kylmän väliaineen sisään menevä lämpötila [K]

Siirtoyksiköiden lukumäärä (NTU) on dimensioton parametri, jota käytetään laajalti lämmönvaihtimen analyysiin ja se saadaan määritettyä yhtälön 26 avulla. (Theodore et al. 2018).

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{UA}{\dot{m}c_p} \quad (26)$$

jossa

$$U = \text{Lämmönsiirtokerroin} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

$$A = \text{Lämmönsiirto pinta – ala} [\text{m}^2]$$

$$C_{\min} = \text{Pienempi väliaineen lämpövirta} \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

$$\dot{m} = \text{Väliaineen massavirta} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$c_p = \text{Väliaineen lämpökapasiteetti} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Lämmönvaihtimen tehokkuussuhteen selvittämiseksi on johdettu useita yhtälöitä erilaisille lämmönvaihtimille. Yhtälöissä hyödynnetään NTU-tuloksen laskentaa ja lämpövirtojen suhdetta C_{\min} / C_{\max} . Erilaisten lämmönvaihtimien tehokkuussuhteiden yhtälöitä on nähtävissä taulukoista 3. (Theodore et al. 2018).

Taulukko 3. Erilaisia lämmönvaihtimien tehokkuussuhteiden yhtälöitä. (Theodore et al. 2018).

Flow Arrangement	Relation
Parallel flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Counterflow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (C_r = 1)$
Shell-and-tube	
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
Cross-flow (single pass)	
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r (NTU)^{0.78}] - 1 \} \right]$
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{-C_r [1 - \exp(-NTU)]\})$
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{1 - \exp[-C_r (NTU)]\})$
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

5 MÄÄRÄAIKAISKOKEET

Ydinturvallisuusohjeessa A.6 määritellään, että määräaikaisohjeessa on esiteltävä määräaikaiskokeen tarkoitus, edellytykset, suoritusohjeet, hyväksymiskriteerit sekä tulosten käsittely ja hyväksyntä. Tässä työssä tehtävän määräaikaiskokeen tarkoituksena on selvittää ydinvoimalaitoksen hätägeneraattoreiden ilmajäähdyttimen riittävä jäähdytysteho mittausajanhetkellä. Ilmajäähdyttimet ovat kriittisessä asemassa ja ne ovat turvallisuusluokiteltuja dieselmoottorien jäähdytyksen takia. Ilmajäähdyttimien tarkoituksena on jäähdyttää dieselmoottorien LT- ja HT -piirissä virtaavaa jäähdytysvettä. Moottorien jäähdytysvedellä on tärkeä tehtävä moottorien toiminnan kannalta. Jäähdytysnesteen maksimilämpötilat on pidettävä moottorivalmistajan antamissa sallituissa rajoissa.

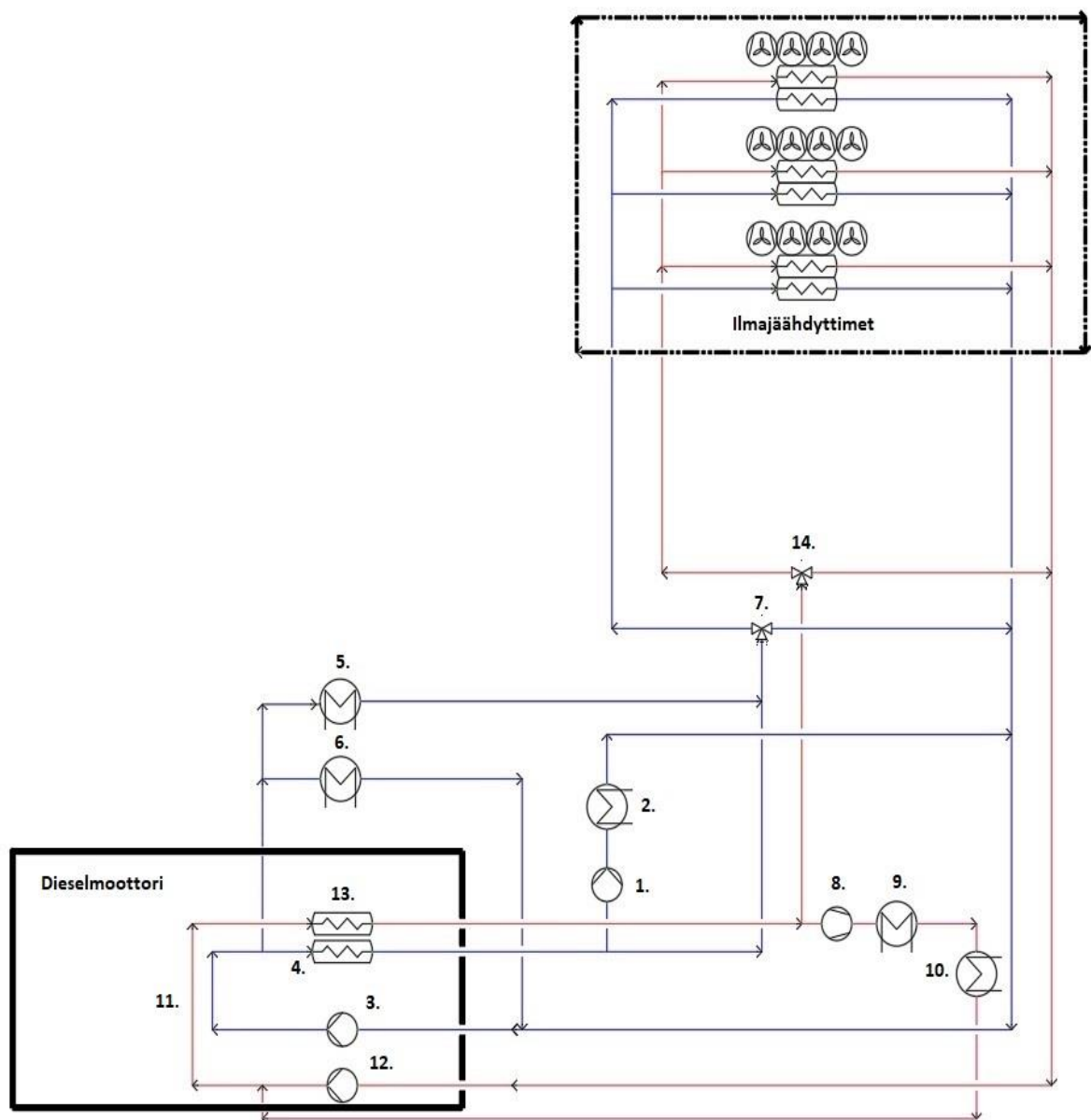
Määräaikaiskokeessa tehtävä koe on suoritettava hyväksyttävien tuloksin, jotta hätädiezelgeneraattorin ja SBO-dieselgeneraattorin ilmajäähdyttimen voidaan katsoa olevan käyttökunnossa. Ilmajäähdyttimen vikaantuessa tai jäähdyttimen likaantuessa ajan kuluessa jäähdytysteho heikkenee. Määräaikaiskokeen tarkoituksena on ennaltaehkäistä vikatilanteita ja mahdollistaa tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet ylläpitämään ilmajäähdyttimen jäähdytystehoa. Olkiluoto 3 -hätädiezelgeneraattoreiden ja SBO-dieselgeneraattoreiden ilmajäähdyttimien määräaikaiskokeet suoritetaan kerran vuodessa jäähdytyksen kannalta huonoimmassa mahdollisessa tilanteessa, jossa ilmanlämpötila on mahdollisimman korkea.

Seuraavissa kappaleissa esitellään Olkiluoto 3 -voimalaitoksen hätädiezelgeneraattoreiden ja SBO-dieselgeneraattoreiden ilmajäähdyttimien määräaikaiskokeiden tarkoitusta, edellytyksiä ja suoritusohjeita. Kappaleiden tarkoituksina on avata lukijalle, kuinka Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen hätädiezelgeneraattoreiden ja SBO-dieselgeneraattoreiden jäähdytysjärjestelmä toimii. Kappaleissa perehdytään molempien dieselgeneraattorien matalan (LT) ja korkean (HT) lämpötilapiirin toimintaan. Lisäksi teksteissä kerrotaan dieselgeneraattoreiden ilmajäähdyttimien toimintaperiaatteesta ja niiden rakenteesta

Tässä diplomityössä ei tehdä varsinaista määräaikaiskoetta, koska ulkoilman lämpötila ei ole määräaikaiskokeisiin otollinen. Työssä tehdään harjoitusmittaukset, joissa voidaan selvittää lämmönvaihtimen jäähdytysteho. Harjoitusmittausten osalta työssä selvitetään mittauspisteet ja mitattavat suuret. Toimeksiantaja voi jatkossa suorittaa mittaukset ja varmistua jäähdytystehon laskennasta hyödyntämällä kyseisiä mittauspisteitä.

5.1 Häädieselgeneraattorin jäähdytysjärjestelmä

Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen häädieselgeneraattoreiden (EDG) ja SBO-dieselgeneraattoreiden jäähdytysjärjestelmän suljetuissa piireissä kiertää vesiglykoliseos. Jäähdytyspiiriä kutsutaan makeavesijäähdytykseksi, joka jaetaan korkean (HT) ja matalan (LT) lämpötilapiireihin. LT- ja HT -piirissä on kolme radiaattoria eli ilmajäähdytintä ja 12 puhallinta. Jäähdytysjärjestelmien yksinkertaistettu PI-piirros on nähtävissä kuvassa 18. Kuvassa LT-piiri on piirretty sinisellä ja HT-piiri punaisella värillä ja niiden tärkeimmät laitteet ovat numeroitu.



Kuva 18. Häädieselgeneraattorin LT- ja HT-piirin virtauskaavio. Muokattu valmistajan virtauskaaviosta.

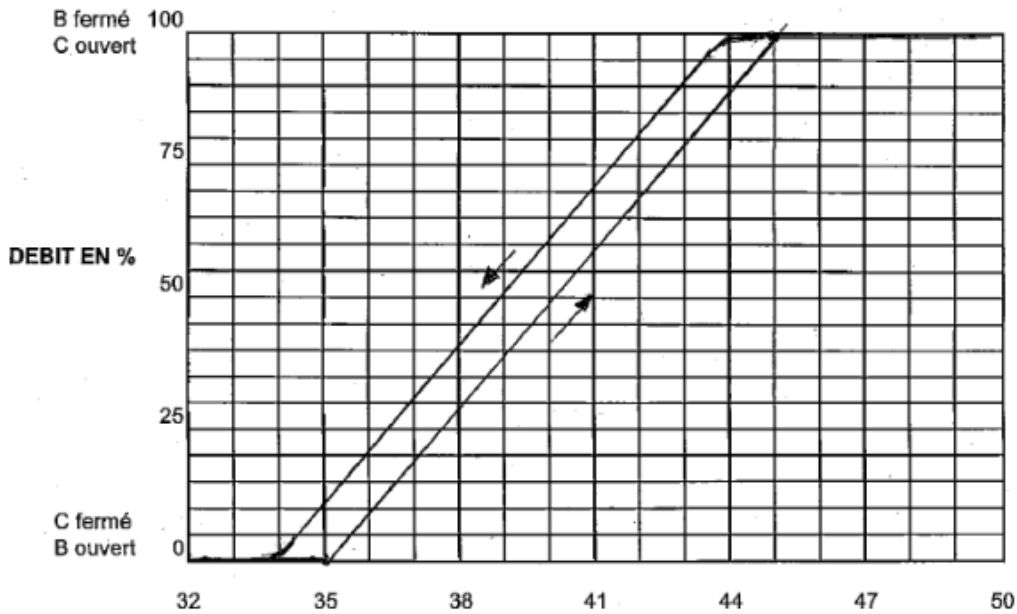
5.1.1 LT-piiri

Kuvasta 18 nähdään PI-kaavio LT-piirin makeavesijärjestelmän toimintaperiaatetta. Dieselmootoreissa on jatkuva makeavesikierto päällä, jolloin saadaan moottoria esilämmitettyä tai jäädytettyä. Moottorin ollessa valmiustilassa, automatiikka hoitaa koneen LT- ja HT-piirin esilämmityksen. Esilämmitysjärjestelmän tarkoituksena on pitää tasainen ja korkea lämpötila moottorissa tarpeettomien kuumen ja kylmän ilman supistuksien välttämiseksi. Tämän myötä moottori on aina käyttövalmis tilanteesta riippuen, ja samalla se minimoi kylmäkäynnistyskulumista. Esilämmitysjärjestelmä myös turvaa dieselmootorin käynnistymiskyvyn riittävän kylmässä ulkoilman lämpötilassa lämmittämällä moottorin palamisilmaa kahden lämmönvaihtimen läpi. Toinen lämmönvaihtimista on LT-piirissä ja toinen on HT-piirissä. (Areva 2019).

Esilämmitys käynnistyy, kun LT-piirissä kiertävän veden lämpötila on alle +40 °C astetta ja sammuu, kun veden lämpötila on saavuttanut +45 °C astetta. Esilämmityksen aikana LT-piirin esilämmityspumppu (1.) kierrättää veden esilämmityslämmönvaihtimien (2.) kautta, minkä jälkeen jäähdytysneste virtaa dieselmootorille. Moottorissa esilämmitetty vesi lämmittää moottorin lohkoa ja siirtyy voiteluöljynlämmönvaihtimelle, toisen tason ahtoilman lämmönvaihtimelle ja generaattorin laakerin jäähdytykselle. Kierrosta palaava vesi menee takaisin esilämmityspumpulle ja näin kierrosta saada suljettu piiri. Esilämmityspumppu sammuu, kun moottorin kierrosnopeus ylittää 300 rpm. (Areva 2019).

Moottorin käydessä, LT-piirin vesi saadaan kierrätettyä järjestelmässä koneen mekaanisen pumpun (3.) avulla. Tässä vaiheessa LT-piirin tarkoituksena on jäädyttää toisen tason ahtoilmaa (4.), jäädyttää voiteluöljyä (5.) ja jäädyttää generaattorin laakereita (6.). LT-piirin jäähdytysneste saadaan jäädytettyä, kun jäähdytysjärjestelmän kierrossa oleva mekaaninen termostaatti (7.) alkaa aueta. Termostaatti on kolmitieventtiili ja sen tarkoituksena on ohjata veden virtausta joko ilmajäädyttimille tai takaisin kiertoon. (Areva 2019).

Termostaatin toiminta-alue on kuvassa 19. Kuvasta nähdään, että termostaatti aukeaa jäähdytysnesteen ollessa +35 °C astetta ja on täysin auki lämpötilan ollessa +45 °C astetta. Termostaatin tarkoituksena on ohjata veden lämpötilaa siten, että se pitää jäähdytysnesteen lämpötilan tasaisesti +41 °C asteessa. (Areva 2010a).



Kuva 19. LT-piirin termostaatin toiminta-alue. (Areva 2010a).

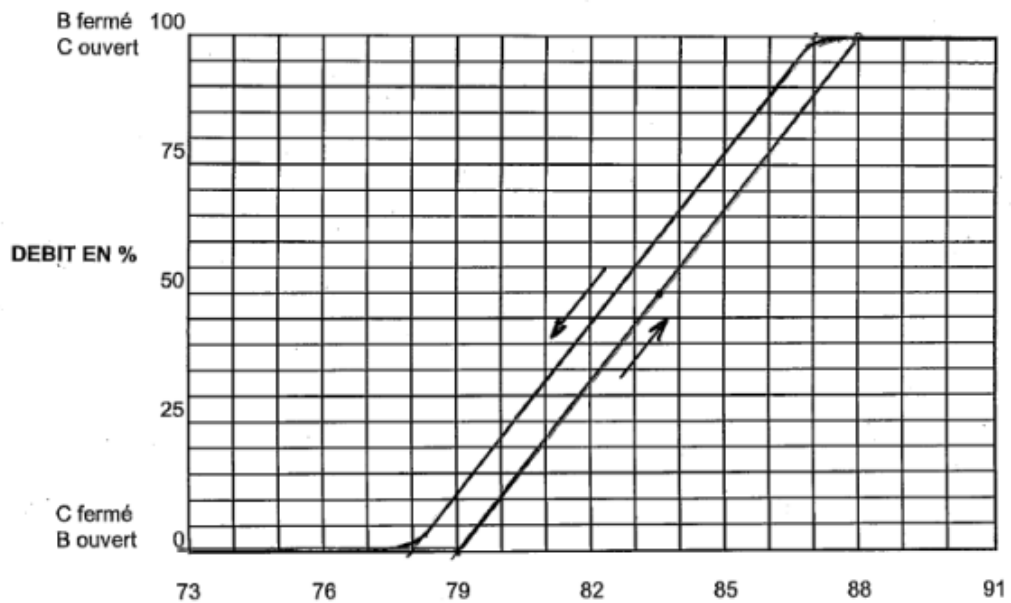
Termostaatin auetessa, moottorista virtaava jäähdytysneste kulkee kolmelle rinnakkaiselle ilmajäähdyttimelle. Ilmajäähdyttimen jälkeen jäähdytetty jäähdytysneste kulkeutuu takaisin moottorille ja tämän myötä jatkaa kiertoa mekaanisen pumpun avulla. Jäähdyttimen rakenteesta ja toiminnasta kerrotaan lisää kappaleessa 5.1.3.

5.1.2 HT-piiri

Kuvassa 18 HT-piiri on piirrettyä punaisella värillä, joka kuvaa jäähdytyspiirin virtauskaaviota. HT-piirissä esilämmitys käynnistyy, kun kiertävän jäähdytysnesteen lämpötila on alle +57 °C astetta ja sammuu, kun veden lämpötila on saavuttanut +60,5 °C astetta. Esilämmityksen aikana HT-piirin esilämmityspumppu (8.) kierrättää veden esilämmityslämmönvaihtimien (9.) kautta voiteluöljyn lämmönvaihtimelle (10.) ja siitä moottorille. Moottorissa esilämmitetty vesi lämmittää moottorin B-lohkoa (11.) ja kulkee ensimmäisen tason ahtoilman lämmönvaihtimelle. Lämmönvaihtimen jälkeen jäähdytysneste virtaa takaisin esilämmityspumpulle. Esilämmityspumppu sammuu, kun moottorin kierrosnopeus ylittää 300 rpm. (Areva 2019).

Moottorin käydessä, HT-piirin vesi saadaan kierrätettyä järjestelmässä koneen mekaanisen pumpun (12.) avulla. HT-piirin tarkoituksena on jäähdyttää ensimmäisen tason ahtoilmaa (13.) ja koko konetta. Moottorin käydessä, moottorin lämpötila alkaa nousta ja HT-piirin

jäähdytysneste on saatava jäähtymään. Moottorilta virtaava HT-piirin jäähdytysneste saadaan jäähdytettyä, kun piirissä oleva mekaaninen termostaatti (14.) alkaa aueta. Termostaatin toimita alue nähdään kuvasta 20. Kuvasta nähdään, että termostaatti aukeaa jäähdytysnesteen ollessa +79 °C astetta, ja se on täysin auki lämpötilan ollessa +88 °C astetta. Termostaatin tarkoituksena on ohjata veden lämpötilaa siten, että se pitää HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilan tasaisesti +85 °C asteessa. (Areva 2010a).



Kuva 20. HT-piirin termostaatin toiminta-alue. (Areva 2010a).

Termostaatin toimintaperiaate on sama, kuin LT-piirissä olevassa termostaatissa. Termostaatti ohjaa moottorilta tulevaa jäähdytysnesteen virtausta joko ilmajäähdyttimille tai jakaa sen takaisin kiertoon. Seuraavassa kappaleessa kerrotaan lisää ilmajäähdyttimen toimintaperiaatteesta ja rakenteesta.

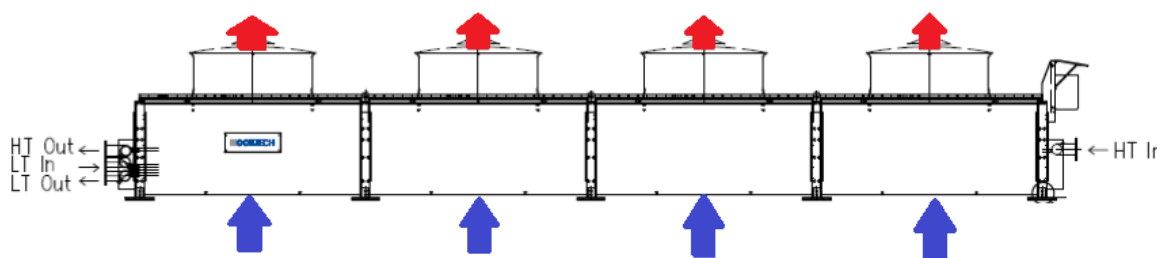
5.1.3 EDG-ilmajäähdyttimien toimintaperiaate ja rakenne

Ilmajäähdyttimien tarkoituksena on poistaa ylimääräistä lämpöenergiaa LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen kierrosta. Ilmajäähdyttimien suunnittelun perustana on se, että moottori jäähtyy huonoimmassa mahdollisessa tilanteessa. Huonoimmassa mahdollisessa suunnittelussa huomioidussa tilanteessa ulkoilman lämpötila on korkealla ja yksi 12 puhaltimesta ei ole käytössä. LT- ja HT-piirin ilmajäähdyttimet sijaitsevat hätädieselgeneraattorin rakennuksen ylimmässä kerrossa. Ilmajäähdyttimet imevät alakautta ilmaa rakennuksen ulko-

puolta. Lämmönvaihtimien lävitse imetty ilma kulkeutuu puhaltimien avulla takaisin lopulliseen lämpönieluun eli ilmakehään. Lämmönvaihtimille imettävä ilma ja ilmajäähdyttimiltä poistuva ilma eivät pääse sekoittumaan keskenään rakennuksen seinämän läheisyydessä. Tämän myötä ilmajäähdyttimiltä poistunut ilma ei pääse vaikuttamaan heikentävästi ilmajäähdyttimien jäähdytystehoon.

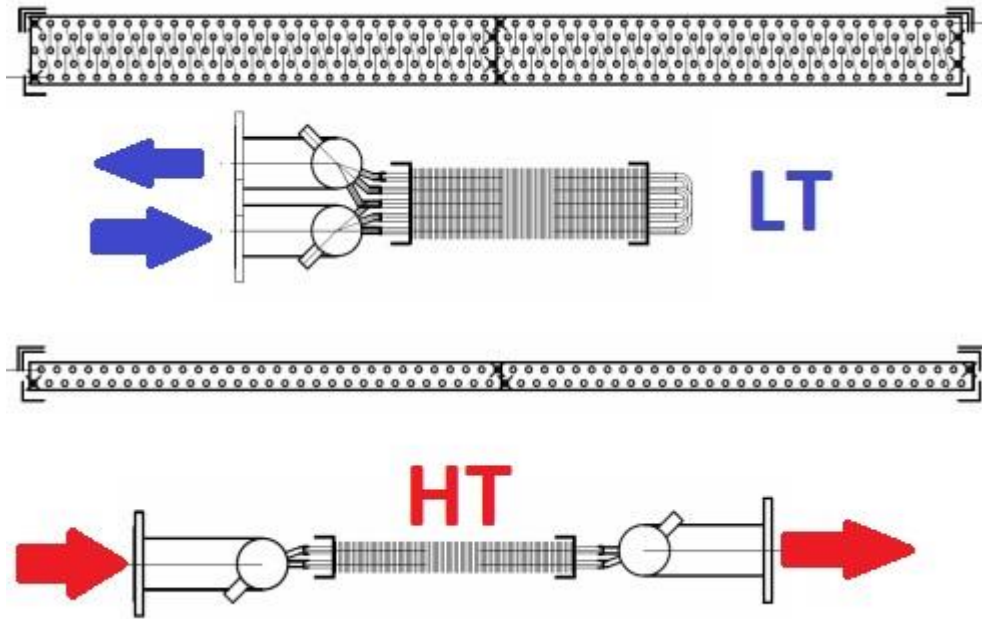
Hätädieselgeneraattorin LT- ja HT-piirissä on yhteensä kolme lämmönvaihdinta ja näissä on yhteensä 12 puhallinta, jotka nähdään kuvassa 18. Jokaista jäähdytyskennoa kohden on näin ollen neljä puhallinta. Puhaltimet on jaettu vielä kahteen ryhmään, ja kussakin ryhmässä on kuusi puhallinta. Ryhmien toiminta perustuu ulkolämpötilaan. Normaaleissa olosuhteissa kaikki 12 puhallinta ovat toiminnassa. Talviolosuhteissa lämpötilan laskiessa alle $+4\text{ °C}$ asteeseen, puhaltimen toinen ryhmä ei ole käytössä. Ryhmä käynnistyy vain, jos yksi kuudesta puhaltimista ei toimi tai HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötila nousee yli $+95\text{ °C}$ asteeseen. (Areva 2019).

LT- ja HT-piirin lämmönvaihtimet ovat sekoittamattomia ristivirtauslämmönvaihtimia, joissa väliaineet eivät sekoitu keskenään. Lämmönvaihtimen rivat ohjaavat ilmavirtausta jäähdytysnesteputkien ylitse. Lämmönsiirto tapahtuu pakotetulla konvektiolla, jossa puhaltimet imevät ilmaa lämmönvaihtimen läpi. LT- ja HT-piirin lämmönvaihtimet on sijoitettu päällekkäin ja tämän seurauksena ilmavirtaus kulkee ensin LT-piirin läpi, ja vasta tämän jälkeen HT-piirin läpi takaisin lopulliseen lämpönieluun. Kuvassa 21 sininen nuoli kuvaa sisään tulevaa ilmaa ja punainen nuoli lämmönvaihtimilta poistuvaa ilmaa.



Kuva 21. Hätädieselgeneraattorin ilmajäähdytin. (Areva 2011).

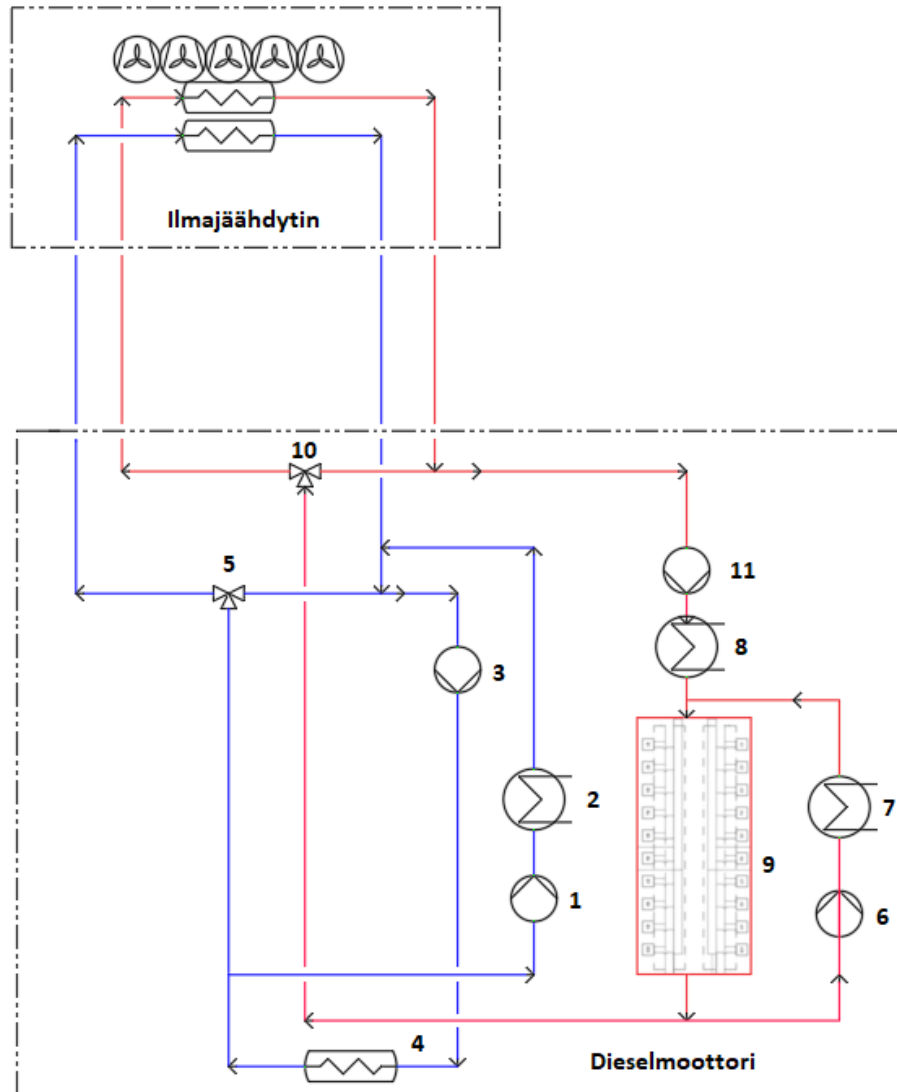
Kuvassa 22 on LT- ja HT-lämmönvaihtimen poikkileikkaus. Kuvasta nähdään jäähdytysnestelinjojen putket sekä LT- ja HT-lämmönvaihtimien erot. LT-puolella jäähdytysneste virtaa sisään ja ulos samalta puolelta, kun taas HT-puolella jäähdytysneste virtaa vain lämmönvaihtimen läpi.



Kuva 22. LT- ja HT-lämmönvaihtimien poikkileikkaus. (Areva 2012).

5.2 SBO-dieselgeneraattorin jäähdytysjärjestelmä

Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen SBO-dieselgeneraattoreilla ei ole voimalaitoksen normaaliin toimintaan liittyviä toimintoja. SBO-dieselgeneraattoreita käytetään vasta silloin, jos ydinvoimalaitoksen sisäiset ja ulkoiset sähkönsyötöt menetetään. SBO-dieselgeneraattoreiden LT- ja HT-piirin jäähdytysjärjestelmässä kiertää vesiglykoliseos. Jäähdytyksen tarkoituksena on pitää dieselmoottorissa oikea lämpötila ja estää koneen kampikammion ja sylinterikansien ylikuumentuminen. Lisäksi jäähdytyksen tehtävänä on viilentää moottorin turboja ja voiteluöljyä. Jäähdytyspiiriä kutsutaan makeavesijäähdytykseksi, joka jaetaan korkean (HT) ja matalan (LT) lämpötilapiireihin. LT- ja HT piirissä on yksi ilmajäähdytin ja viisi puhallinta. Ilmajäähdytyksen toiminta on suunniteltu niin, että se toimii ulkoilman lämpötilan ollessa huonoimmassa mahdollisessa suunnittelussa huomioidussa tilanteessa. Jäähdytysjärjestelmien yksinkertainen PI-piirros on nähtävissä kuvassa 23. Kuvassa LT-piiri on piirretty sinisellä ja HT-piiri punaisella värillä sekä tärkeimmät laitteet on numeroitu. (Areva 2019b).



Kuva 23. SBO-dieselgeneraattorin virtauskaavio, jossa LT-piiri on sinisellä ja HT-piiri punaisella. Muokattu valmistajan virtauskaaviosta.

Dieselmoottorin ollessa valmiustilassa, käytetään LT- ja HT-piiriä esilämmitykseen. Esilämmityksen tarkoituksena on varmistaa, että moottori käynnistyy äärimmäisissä olosuhteissa lämmittämällä moottorin imuilmaa, moottorin lohkoa ja voiteluöljyä. Sähkökäyttöinen pumppu kierrättää jäähdytysnestettä esilämmitysyksikön ja moottorin läpi. Esilämmitysyksikkö kytetään päälle ja pois termostaatin avulla. (Areva 2019b).

5.2.1 LT-piiri

Kuvassa 23 LT-piirin virtauskaavio on piirretty sinisellä värillä. Valmiustilan aikana LT-piirin esilämmityspumppu (1) kierrättää esilämmityslämmönvaihtimen (2) kautta jäähdytysnesteen moottorin läpi. LT-piirin esilämmityslämmönvaihdin lämmittää jäähdytysnesteen +30...+35 °C asteeseen. Moottorin käynnistyessä, LT-piirin esilämmitys jatkaa lämmitystä varmistaakseen, että moottorin jäähdytysnesteen lämpötila on vähintään +20 °C astetta. Esilämmitys sammuu siinä vaiheessa, kun lämpötila on noussut +37 °C asteeseen. (Areva 2019b).

Moottorin käynnistyessä LT-piirissä oleva jäähdytysneste saadaan kiertämään järjestelmässä moottorin mekaanisen pumpun (3) avulla. Mekaaninen pumppu kierrättää jäähdytysnesteen ahtoilman lämmönvaihtimien (4) kautta koneen termostaatille (5). LT-piirin termostaatti on mekaaninen kolmitieventtiili. Normaalisissa tilanteissa termostaattiventtiili on kiinni ja vesi ohjataan takaisin moottorille ja esilämmitykseen. Termostaattiventtiili aukeaa, kun jäähdytysnesteen lämpötila on noussut +38 °C asteeseen. Venttiili on täysin auki +51 °C asteessa. Termostaatin auetessa, moottorissa lämmennyt jäähdytysneste ohjataan ilmajäähdyttimen läpi, jossa vesiglykoliseos jäähdytetään. Ilmajäähdyttimen jälkeen jäähdytetty jäähdytysneste kulkeutuu takaisin kiertoan ja kierrosta saadaan suljettu piiri. (Areva 2019b).

5.2.2 HT-piiri

Dieselmootorin ollessa valmiustilassa, esilämmityspumppu (6) kierrättää jäähdytysvettä esilämmityslämmönvaihtimen (7) läpi moottoriin. Esilämmityksen tarkoituksena on pitää jäähdytysnesteen lämpötila +55...+60 °C asteen välillä. Moottorin käynnistyessä, HT-piirin esilämmitys sammuu ja moottorin mekaaninen pumppu (8) kierrättää jäähdytysvettä HT-piirissä. (Areva 2019b).

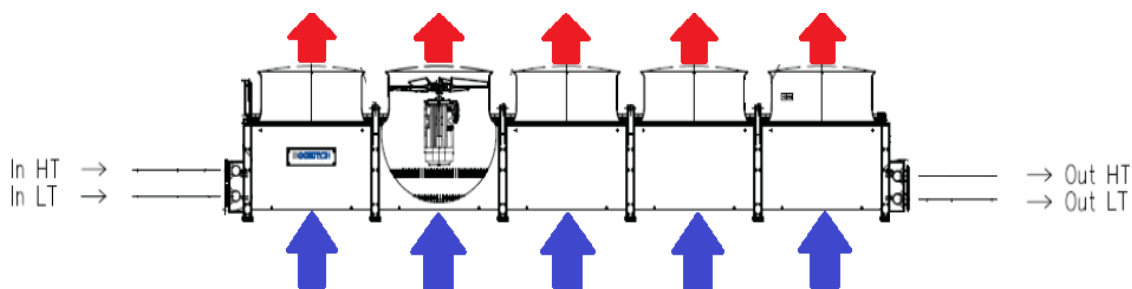
Mekaaniselta pumpulta jäähdytysneste menee koneen A ja B sylinterilinjoihin (9), jossa on myös molemmat pakokaasuahdit. Jäähdytysnesteen tarkoituksena on jäähdyttää koneen sylinterilinjot ja molempia pakokaasuahdit. Moottorin jälkeen lämmennyt jäähdytysneste kulkeutuu koneen mekaaniselle termostaatille (10). Termostaatti on samanlainen kuin LT-piirin termostaatti, ja se ohjaa jäähdytysvettä joko ilmajäähdyttimille tai takaisin moottorille. Termostaattiventtiili aukeaa lämmitysveden ollessa +79 °C astetta ja on täysin auki, kun lämpötila on saavuttanut +92 °C astetta. Termostaattiventtiilin ollessa auki, jäähdytysneste

ohjautuu ilmajäädyttimien läpi, jolloin vesiglykoliseos jäähtyy. Jäähdytetty jäähdytysneste kulkeutuu ilmajäädyttimen jälkeen moottorin mekaaniselle pumpulle ja siitä voiteluöljyn lämmönvaihtimelle (11). Pumpun myötä virtauksesta saadaan suljettu piiri, jossa termostaattiventtiili ohjaa jäähdytysnesteen virtausta ja lämpötilaa. HT-piirin virtauskaavio on piirretty punaisella värillä ja se on nähtävillä kuvassa 23. (Areva 2019b).

5.2.3 SBO-ilmajäädyttimen toiminta ja rakenne

SBO-dieselgeneraattorin LT- ja HT-piirin ilmajäädytin sijaitsee rakennuksen ylimmässä kerrossa. Dieselmoottori sijaitsee rakennuksen pohjakerroksessa ja ilmajäädyttimet ylimmässä kerroksessa. Ilmajäädyttimien tarkoituksena on poistaa ylimääräistä lämpöenergiaa LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen kierrosta. Ilmajäädyttimien suunnittelun perusteena on, että moottori jäähtyy huonoimmassa mahdollisessa suunnittelussa huomioidussa tilanteessa, kun ulkoilman lämpötila kohoaa riittävän korkealle ja yksi puhaltimista on pois käytöstä. (Areva 2019b).

Jäähdytyksen toimintaperiaate perustuu pakotettuun konvektioon, joka saadaan aikaan viiden puhaltimen avulla. Ilmajäädyttimen rakenne perustuu sekoittamattomaan ristivirtaukseen, jossa ilma ja jäähdytysneste eivät sekoitu keskenään. Jäähdytysnesteen LT- ja HT-piirin kennot ovat päällekkäin, joten ilmavirtaus menee ensin LT-piirin läpi ja tämän jälkeen HT-piirin läpi takaisin ilmanieluun. Kuvasta 24 nähdään SBO-ilmajäädyttimien rakenne, jossa sininen väri kuvaa sisään menevää ilmaa ja punainen väri ilmajäädyttimeltä poistuvaa ilmaa.



Kuva 24. SBO-ilmajäädyttimen rakenne. Muokattu valmistajan kuvasta (Areva 2013).

6 MITTAUSJÄRJESTELYT

Määräaikauskokeiden tarkoituksena on varmistaa hätädiezelgeneraattoreiden ja SBO-dieselgeneraattoreiden ilmajäädyttimien lämmönvaihtimien riittävä jäähdysteho. Riittävällä jäähdysteholla voidaan varmentaa dieselgeneraattorien toiminta. Lämmönsiirtoteho mitataan käytännössä aina eri olosuhteissa, kuin mitä valmistajan mitoitustilanteessa on huomioitu. Jotta riittävä jäähdysteho voidaan varmistaa, mittauksista on saatava hetkelliset arvot, joiden perusteella voidaan tehdä mittauslaskelmat.

Tässä työssä ei tehdä varsinaista määräaikauskoeita, mutta mittausjärjestelyt ja jäähdystehon laskennan todentamiset voidaan suorittaa. Työn aikana tehdään harjoitusmittaukset, joiden perusteella voidaan varmistua oikeista mittauspisteistä. Harjoitusmittaukset ennustavat tulevia määräaikauskoeita. Työssä tehtävä harjoitusmittaus tehdään hätädiezelgeneraattorin LT- ja HT-piiriin. LT-piiristä mitataan ilmajäädyttimelle menevä tilavuusvirtaus sekä lämpötila ennen ja jälkeen ilmajäädyttimen. HT-piiristä mitataan vain jäähdystynesteen lämpötilat, koska harjoitusmittausten aikana ei voida suorittaa tilavuusvirtauksen mittausta.

6.1 Mittalaitteet ja mitattavat suuret

Hätädiezelgeneraattorien ja SBO-dieselgeneraattorien lämmönvaihtimien jäähdystehon selvittämiseksi ja laskemiseksi yhtälöstä 8 ja NTU-tehokkuusmenetelmän hyödyntämiseksi, tarvitaan mittauksia, kuten ulkoilman lämpötilaa, ilmajäädyttimille virtaavan jäähdystynesteen tilavuusvirtausta sekä jäähdystynesteen lämpötiloja ennen ja jälkeen ilmajäädyttimen. Hätädiezelgeneraattorien LT-piirin osalta mittalaitteet ja mitattavat suuret nähdään taulukosta 4 ja HT-piirin osalta taulukosta 5.

Taulukosta nähdään myös mittauksissa käytettävien antureiden mittaustarkkuus. Hätädiezelgeneraattorien LT- ja HT-piirissä olevien lämpötila-antureiden mittaustarkkuus perustuvat anturivalmistajan mukaan standardiin EN 13190. LT-piirissä olevien antureiden mallin mukaan standardi ilmoittaa mittaustarkkuudeksi ± 1 °C astetta, kun taas HT-piirissä olevien antureiden tarkkuus on ± 2 °C astetta. Tilavuusvirtauksien osalta valmistaja ilmoittaa, että mittaustarkkuus on ± 1 % mitatusta mittaustuloksesta. Ulkolämpötilan mittauksessa käytettävän anturin pitää täyttää tarkastusvaatimuksen luokan A vaatimukset.

Taulukko 4. Hätädieselgeneraattorin LT-piirin mittalaitteet.

LT-piiri				
	Mittapiste	Suure	Tarkkuus	Yksikkö
Tuloilman lämpötila	Anturi CT001	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Tuloilman lämpötila	Anturi CT002	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Tuloilman lämpötila	Anturi CT003	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden lämpötila (sisään)	Anturi CT523	t_2	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden lämpötila (ulos)	Anturi CT524	t_3	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden tilavuusvirtaus	Transport PT900	\dot{m}_4	$\pm 1\%$	m^3/h

Taulukko 5. Hätädieselgeneraattorin HT-piirin mittalaitteet.

HT-piiri				
	Mittapiste	Suure	Tarkkuus	Yksikkö
Tuloilman lämpötila	Anturi CT001	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Tuloilman lämpötila	Anturi CT002	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Tuloilman lämpötila	Anturi CT003	t_1	$\pm (0,15+0,002*T)$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden lämpötila (sisään)	Anturi CT502	t_5	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden lämpötila (ulos)	Anturi CT503	t_6	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Jäähdytysveden tilavuusvirtaus	Transport PT900	\dot{m}_7	$\pm 1\%$	m^3/h

SBO-dieselgeneraattorien osalta mittaukset ovat huomattavasti hankalammat, koska LT- ja HT-piirissä ei ole kiinteitä mittapisteitä, joista saataisiin mitattua jäähdytysnesteen lämpötilat. Lämpötilan mittauksessa käytettävät lämpötilamittarit voidaan jakaa kahteen pääryhmään; kosketuslämpömittareihin ja koskemattomiin, eli optisiin mittareihin. SBO-dieselgeneraattorien jäähdytysnesteen lämpötila mitataan optisella lämpökameralla, joka on lämpösäteilymittauksen erikoissovellus. Nykyaikainen lämpökamera ja sitä tukeva ohjelmisto antavat mahdollisuuden säännöllisin väliajoin suoritettavaan kunnossapitovalvontaan ja muutosten seurantaan. SBO-dieselgeneraattorien LT- ja HT-piirin mittalaitteet ovat nähtävissä taulukosta 6. (Weckström 2005).

Taulukko 6. SBO-dieselin generaattorin mittalaitteet.

LT- ja HT-piiri				
	Mittalaite	Suure	Tarkkuus	Yksikkö
Tuloilman lämpötila	Anturi CT001-CT003	t_i	$\pm (0,15+0,002*T)$	°C
Jäähdytysveden lämpötila (sisään)	Fluke Ti25 (Lämpökamera)	t_{in}	± 2 °C	°C
Jäähdytysveden lämpötila (ulos)	Fluke Ti25 (Lämpökamera)	t_{out}	± 2 °C	°C
Jäähdytysveden massavirta	Transport PT900	\dot{m}	± 1 %	kg/s

6.2 Mittapisteen

Määräaikaiskokeen mittaukset suoritetaan yhtäaikaaisesti LT- ja HT-piireissä, minkä johdosta mittausvirheiden mahdollisuudet voidaan minimoida. Tuloilman lämpötila (1) mitataan hätädieselin generaattorin rakennuksen kiinteästä lämpötila-anturista CT001 – CT003, ja se luetaan hätädieselin rakennuksen koneisto-ohjauksen tietokoneelta. Ilmajäähdyttimien lämmönvaihtimien puhaltimet käyttävät ohjauksessa tätä samaa lämpötila-anturia. Hätädieselin generaattorien osalta jäähdytysnesteen lämpötilan mittauksessa hyödynnetään paikallismittareita. Paikallismittareissa lämpötila-anturit ovat asennettuina anturitaskuun. Lämpötila-anturit mittaavat putken sisällä virtaavan jäähdytysnesteen lämpötilaa.

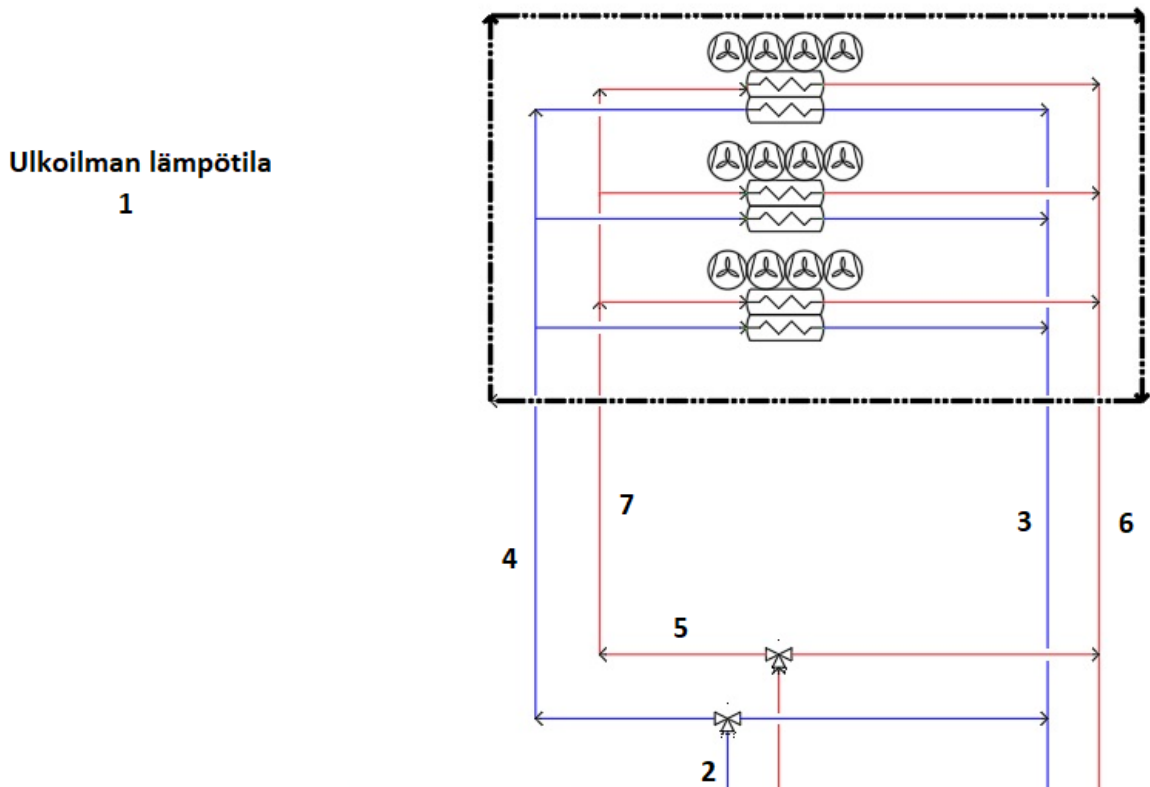
LT-piirissä ilmajäähdyttimille menevä jäähdytysnesteen lämpötila todennetaan paikallismittarista CT523 (2). Lämpötila-anturi mittaa jäähdytysnesteen lämpötilaa ennen termostaattia. Ilmajäähdyttimien jälkeinen LT-piirin lämpötila määritellään paikallismittarista CT524 (3). HT-piirissä ilmajäähdyttimille menevä jäähdytysnesteen lämpötila tarkistetaan paikallismittarista CT502 (5). Lämpötila-anturi mittaa jäähdytysnesteen lämpötilaa termostaatin jälkeen. Ilmajäähdyttimien jälkeinen HT-piirin lämpötila katsotaan paikallismittarista CT503 (6).

LT- ja HT-piirissä ilmajäähdyttimien jälkeinen lämpötilan mittauspiste sijaitsee kaikkien kolmen ilmajäähdyttimen jälkeen. Lisäksi mittauspisteet sijaitsevat ennen termostaattilinjan yhtymistä. Jos mittauspisteet olisivat yhtymäkohdan jälkeen ja termostaattit eivät olisi täysin auki ilmajäähdyttimille, johtaisi lämpötilan mittaus tulos virheelliseen arvoon. LT- ja HT-piirin mittauspisteet ovat esiteltyinä kuvassa 25.

Jäähdytysnesteen massavirtauksella on keskeinen vaikutus jäähdytyksen riittävään toimintaan. Mittauspaikan valinta on tehtävä huolellisesti huomioiden erilaiset mittausedellytykset.

Mittauskriteerinä voidaan pitää paikkaa, jossa on riittävä määrä putken suoraa osuutta, jotta massavirtaus voidaan suorittaa ongelmitta joko pysyvästi tai tilapäisenä ratkaisuna. Mittauspaikka riippuu täysin siitä, mitä putkesta löytyy ennen mittauspaikkaa. Pääsääntönä vähimmäisetäisyydelle voidaan pitää kymmentä putken halkaisijan mittaa. Jäähdytysnesteen massavirtaus mitataan tulevaisuudessa määräaikaikokeissa ultraäänimittarilla. Ultraäänimittari mittaa äänen kulkeman matkan väliaineessa, ja tätä ilmiötä kutsutaan Doppler ilmiöksi. Jotta mittauksesta saadaan mahdollisimman paikkansa pitävä, on oltava tiedossa putken halkaisija ja seinämän vahvuus. (Backman 2019).

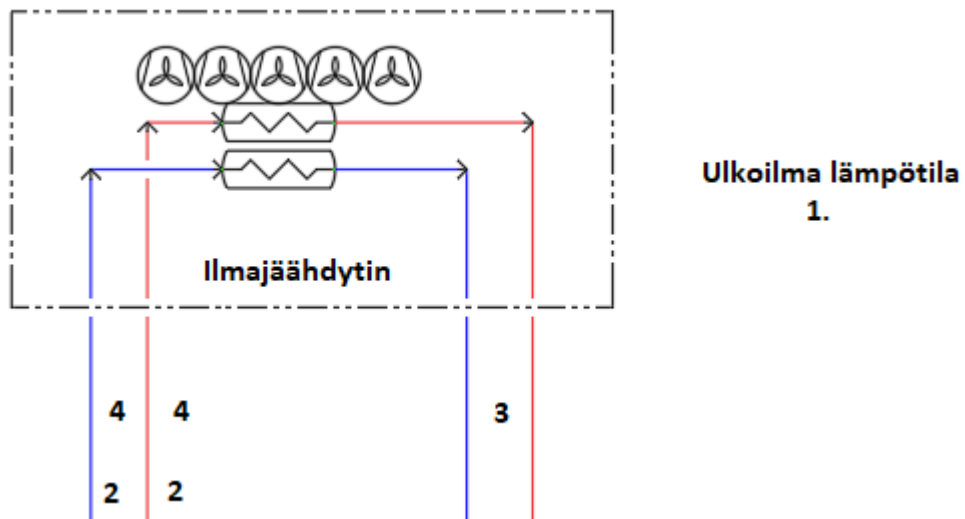
LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen massavirtaus mitataan molempien termostaattien jälkeen. Termostaatin jälkeinen massavirtaus on ilmajäähdyttimille menevä virtaus, jota tarvitaan jäähdytystehon laskennassa. Massavirran mittauspisteet ovat hätädieselrakennuksen toiseksi ylimmässä kerroksessa. Mittauskohta on valittu sen perusteella, että putkissa on tarpeeksi suoraa linjaa, ja mittauskohteet ovat riittävän kaukana virtaukseen vaikuttavista tekijöistä. LT-piirin osalta ultraäänimittari voidaan laittaa suoraan putkistoon, eikä se vaadi ennakoivia töitä. HT-piirin osalta ultraäänimittalaitteen asennus vaatii eristeiden poistoa jäähdytysnesteputkiston ympäriltä. LT-piirin massavirtauksen mittauskohta on merkattuna kuvaan 25 numerolla neljä, ja HT-piirin osalta numerolla seitsemän.



Kuva 25. Mittapisteet hätädieselgeneraattorin osalta.

SBO-dieselgeneraattoreiden osalta mittausten tekeminen on hyvin hankalaa, koska jäähdytysnestelinjassa ei ole kiinteitä mittauspisteitä. LT- ja HT-piirin osalta jäähdytysnesteen lämpötilojen mittaus tulisi tässä vaiheessa suorittaa lämpökameran avulla. Tuloilman lämpötila (1) mitataan hätä dieselgeneraattorin rakennuksen kiinteistä lämpötila-antureista CT001 – CT003.

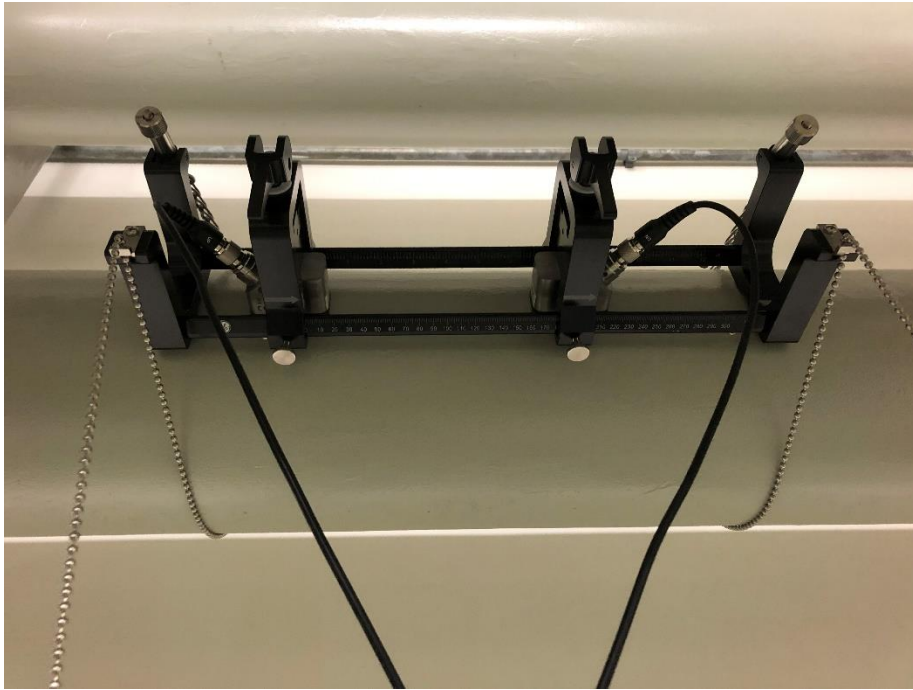
LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilojen mittauskohta on ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen jakotukissa. Kuvassa 26 on esitettyjä lämpötilojen mittauspisteet, joissa kohdassa kaksi mitataan lämmönvaihtimen sisään menevien LT- ja HT-piirin lämpötilat. Kohta kolme on lämmönvaihtimelta poistuvan LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilat. Massavirtauksen mittauksessa käytetään samoja edellytyksiä kuin hätä dieselgeneraattoreiden osalta, ja mittauskohta on merkitty numerolla neljä.



Kuva 26. Mittapisteet SBO-dieselgeneraattorin osalta.

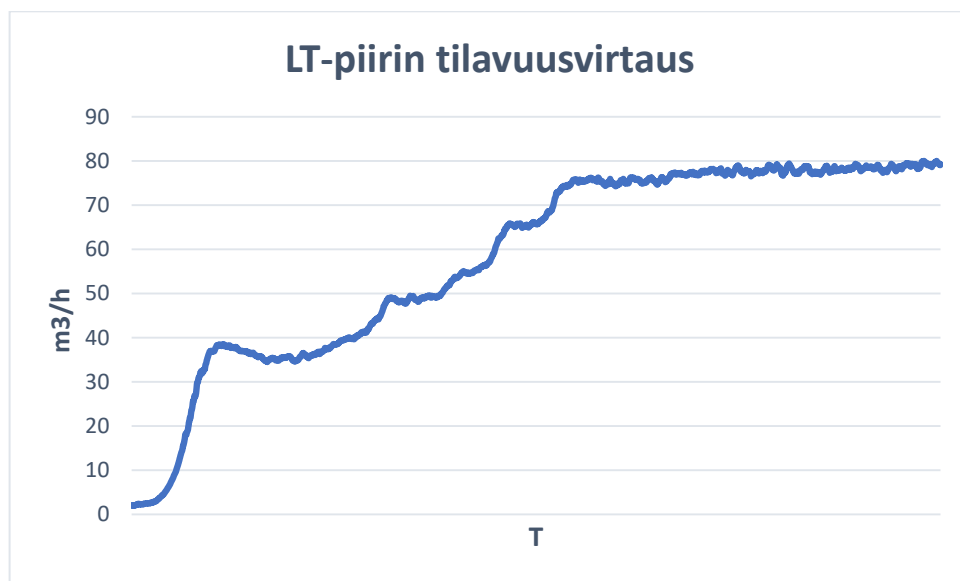
6.3 Mittaustulos ja sen epävarmuus

Hätä dieselgeneraattorin osalta tehty harjoitusmittaus suoritettiin ulkolämpötilan ollessa +10 °C astetta. Mittaustulosten kirjaaminen aloitettiin siinä vaiheessa, kun dieselmoottorin teho on saavuttanut 100 % ja lämpötilojen nousu on tasaantunut. Jäähdytysnesteen massavirtauksen osalta ultraäänimittariin asetetaan mittausväli yhden sekunnin välein. Jäähdytysnesteen massavirtauksen laitteisto ja mittapaikka ovat esiteltynä kuvassa 27.



Kuva 27. LT-piirin putkistoon asennettu siirrettävä ultraäänimittalaite Transport PT900.

LT-piirin massavirtauksen mittaustulokset ovat nähtävissä kuvasta 28. Kuvasta nähdään hätädiezelgeneraattorin LT-piirissä virtaavan jäähdytysnesteen virtauksen muutokset koneen tehon noustessa. Dieselmoottorin lämmitessä, jäähdytysnesteen lämpötila alkaa nousta ja termostaatti alkaa aueta, jolloin mittauskohdassa tilavuusvirtaus nousee. Termostaatin tarkoituksena on pitää tasainen +41 °C asteen lämpötila. Lämpötilan tasoitus nähdään kuvaajasta siinä vaiheessa, kun tilavuusvirtaus on tasoittunut mittauskohdassa.



Kuva 28. Hätädiezelgeneraattorin LT-piirin tilavuusvirtauksen muutos suhteessa aikaan.

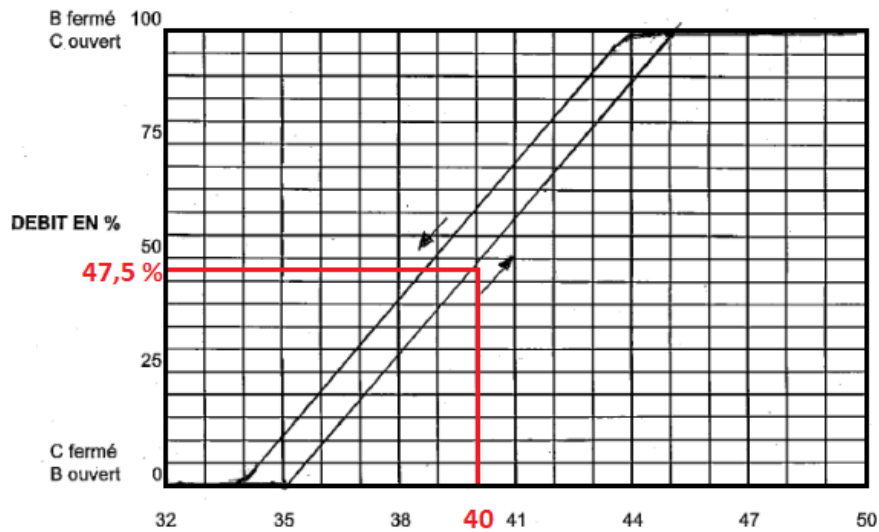
Mittaustuloksena käytetään sitä tilavuusvirtauksen vaiheen keskiarvoa, kun lämpötila ja tilavuusvirtaus ovat tasoittuneet. Mittaustuloksen keskiarvoksi saadaan 78,3 m³/h ja kun putkiston maksimitilavuusvirtaus on 200 m³/h, saadaan prosentuaaliseksi arvoksi 39,15 %. Prosentuaalisen arvon perusteella LT-piirin termostaatti pitäisi olla auki noin 39 %.

LT- ja HT-piirin lämpötilojen mittaukset saadaan kirjattua paikallismittarista. Paikallismittareiden luentatarkkuus on 2 °C asteen välein, joten tarkkaa mittaustulosta on hyvin vaikea saada. Jos mittauksista haluttaisiin tarkempia tuloksia, vaadittaisiin tässä vaiheessa tarkempaa paikallismittaria. Tällä hetkellä paikallismittarista saadaan luettua noin +/-0,5 °C asteen tarkkuudella. LT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilan mittaustulokseksi saadaan kirjattua +40 °C astetta ja HT-piirin lämpötilaksi +83 °C astetta. Mittaustulokset ovat nähtävissä taulukosta 7.

Taulukko 7. Hätädieselgeneraattorin mittaustulokset.

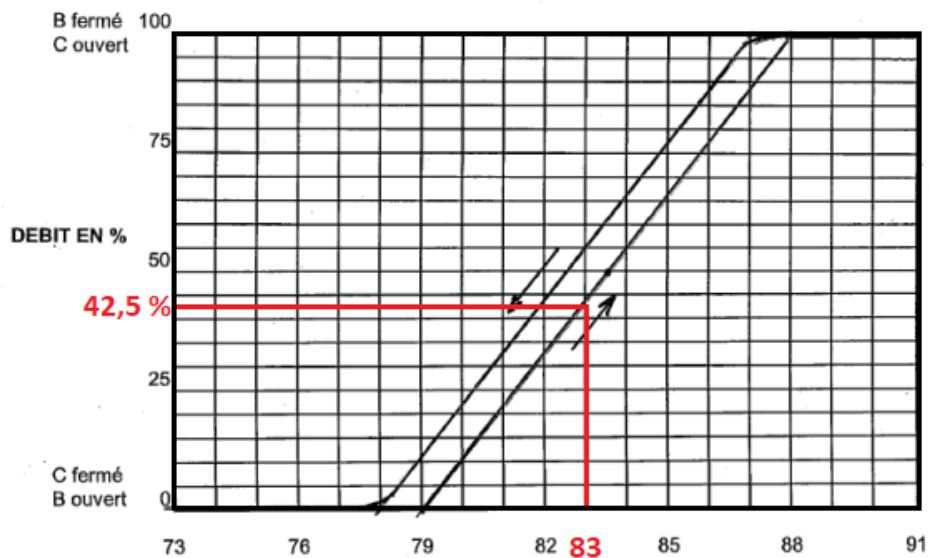
Mittaustulokset				
	Mittapiste	Suure	Tulos	Yksikkö
Tuloilman lämpötila	Anturi CT001-CT003	t_1	10	°C
LT-piirin jäähdytysnesteen Temp in	Anturi CT523	t_2	40	°C
LT-piirin jäähdytysnesteen Temp out	Anturi CT524	t_3	23,5	°C
HT-piirin jäähdytysnesteen Temp in	Anturi CT502	t_5	83	°C
HT-piirin jäähdytysnesteen Temp out	Anturi CT503	t_6	45	°C
LT-piirin tilavuusvirtaus	LT-piiri / Siirrettävä mitta-laite Transport PT900	\dot{m}_4	78,30	m ³ /h

Mittaustulokset kirjataan siinä vaiheessa, kun dieselmoottorin teho on nostettu 100 % ja lämpötilan nousu on tasoittunut. LT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilasta ja tilavuusvirtauksesta voidaan tarkistaa termostaatin auki-asento. Tämä on havainnollistettu kuvassa 29. Kuva osoittaa, että jäähdytysnesteen lämpötilan ollessa +40 °C astetta, saadaan termostaatin auki-asennoksi noin 47,5 %. Tässä vaiheessa on huomioitava lämpötilan mittaustarkkuus. LT-piirin jäähdytysnesteen lämpötila-anturin absoluuttiseksi mittaustarkkuudeksi on annettu +/-1 °C astetta. Lämpötilan ollessa +39 °C astetta, saadaan termostaatin auki-asennoksi noin 40 %, mikä vastaisi mittauksista saatua keskiarvoa. Tämä myötä voidaan todeta, että tarkastelut valmistajan tekemästä kuvaajasta termostaatin toiminta-alueesta ovat hyvin oikeanlaiset.



Kuva 29. Hätdiesलगeneraattorin LT-piirin termostaatin toiminta-alue mittausajanhetkellä.

HT-piirin jäähdytysnesteen tilavuusvirtauksen mittausta ei suoritettu harjoitusmittausten aikana. Harjoitusmittausten aikana saatujen lämpötilamittauksista voidaan tarkistaa termostaatin auki-asento. HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilan mittauksista saadaan +83 °C. Kuvassa 20 olevia arvoja voidaan hyödyntää, kun piirretään uusi kuvaaja termostaatin auki-asennosta. Kuvasta 30 nähdään, että lämpötilan ollessa +83 °C, saadaan termostaatin auki-asennoksi 42,5 %. HT-piirin jäähdytysnesteputkiston maksimitilavuusvirtaus on 220 m³/h ja laskennalliseksi tulokseksi saadaan 93,5 m³/h.



Kuva 30. Hätdiesलगeneraattorin HT-piirin termostaatin toiminta-alue mittausajanhetkellä.

Mittaustulosten yhteydessä tulee aina tietää mittaukseen liittyvä epävarmuus. Mittaustuloksista ei voida tehdä johtopäätöksiä, ellei tulokseen liittyvää epävarmuutta tunneta. Mittausepävarmuus on mittaustulokseen liittyvä parametri, joka kuvaa mittaussuurelle saatujen arvojen oletettua vaihtelua. Mittauksen virhe koostuu sekä satunnaisesta että systemaattisesta osasta. Satunnainen virhe johtuu mittauksen epäluotettavasta tai huolimattomasta lukemasta ja sitä on vaikea ennalta arvioida muuten kuin yläraja-arviolla. Systemaattinen virhe johtuu mittalaitteen tai mittaolosuhteiden vaikutuksesta. Virhettä voi pienentää huolellisella kalibroinnilla. (Weckström 2005).

Ulkoilman lämpötila-anturit sijaitsevat hätädieselgeneraattorin rakennuksen ulkopuolella. Lämpötila-antureista saadaan tarkka seurantakäyrä, jota voidaan hyödyntää koko määräaikauskokeiden ajan. Jäähdytysnesteen lämpötilojen mittaus suoritetaan lukemalla paikallismittaria useampia kertoja ja kirjaamalla mittaustulos pöytäkirjaan. Mittaustulos on mitattujen lämpötilojen keskiarvo. Jokaisen lämpötilamittauksen tulos on vain arvio mittaushetken todellisesta lämpötilasta mittaushetkellä. Mittausarvoihin voi vaikuttaa myös systemaattinen virhe. Virheellä tarkoitetaan esimerkiksi mittalaitteen ja materiaalin välisestä etäisyydestä aiheutuvaa lämpötilaeroa. (Weckström 2005).

Jäähdytysnesteen massavirran mittaustulokset sisältävät aina eri tekijöistä aiheutuneita epävarmuuksia. Epävarmuuden suuruuteen vaikuttavat muun muassa mittausteollisuus, ympäristö ja mittauksen tekijä. Mittauslaitteen valmistaja ilmoittaa mittalaitteelleen virheen ylärajan. Tulosten luotettavuuden arvioimiseksi ja mittaustulosten kehittämiseksi, suoritetaan tulosten luotettavuuden arviointia eli epävarmuustarkastelua. (Backman 2019).

Pystyäkseen hyödyntämään mittaustuloksia, on tulosten laskennassa hyödynnettävä kokonaisvirheen laskentaa. Kokonaisvirheen laskennassa huomioidaan virhetekijöitä, jotka ovat tässä tapauksessa valmistajan ilmoittamia epätarkkuuksia mittalaitteesta. Tulosten laskennassa mittauksen eri virheitä voidaan laskea yhteen ja näin ollen saadaan maksimi virhe mittaukselle. Valmistajan ilmoittamat epätarkkuudet mittalaitteista voidaan summata neliöllisesti yhteen yhtälön 27 mukaisesti (kokonaisdifferentiaali). Yhtälössä F on funktio ja X on muuttuja. (Hiltunen et al. 2011).

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots} \quad (27)$$

7 JÄÄHDYTYSTEHON LASKENTA

Tämän kappaleen tarkoituksena on esittää, kuinka mittaustuloksia hyödynnetään varmistamaan ilmajäähdyttimen jäähdytystehon riittävyys. Jäähdytystehon laskennassa käytetään mittaustuloksia sekä teoriaosuudessa esiteltyjä yhtälöitä. Laskenta esitetään NTU-tehokkuusmenetelmällä, jota käytetään lämmönvaihtimen suunnittelussa ja analysoinnissa. NTU-tehokkuusmenetelmää käytetään silloin, kun tiedetään vain lämmönvaihtimelle menevien väliaineiden lämpötilat. Kyseisellä menetelmällä saadaan laskettu teoreettinen jäähdytysteho vallitsevissa mittausolosuhteissa.

Ilmajäähdyttimen vertaileva jäähdytysteho voidaan laskea jäähdytysnesteen massavirran, väliaineen ominaislämpökapasiteetin ja väliaineen lämpötilan muutoksen tulona, joka on esitetty yhtälössä 8. Molempien jäähdytystehojen laskelmat esitetään vaihe vaiheelta. Laskentatapojen teoreettinen käsittely esiteltiin kappaleessa 4. Jäähdytystehon laskennasta saatuja tuloksia verrataan toisiinsa, jolloin voidaan varmistua riittävästä jäähdytystehosta. Työssä lasketaan hätädiezelgeneraattorin LT- ja HT-piirin ilmajäähdyttimien jäähdytystehot. SBO-dieselgeneraattorien jäähdytystehon laskentaa ei tässä työssä esitetä. Tämän työn ohella on tehty toimeksiantajalle Excel-laskentamalli, mutta tässä työssä ei esitellä sitä salassa pidettävien tietojen takia.

7.1 Ilman aineominaisuuksien laskenta

Kuvista 21 ja 22 nähdään, että EDG- ja SBO-ilmajäähdyttimien LT- ja HT-piirien kennot ovat toistensa päällä. Tämä on huomioitava laskennassa siten, että ensin on laskettava LT-piirin lämmönvaihtimen jäähdytysteho ja siitä saatujen tulosten perusteella määritellään HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan ilman lämpötila. Ilmajäähdyttimen jäähdytystehon laskenta aloitetaan ilman aineominaisuuksien laskennalla.

Määräaikaiskoe on tarkoitus suorittaa haastavimmassa mahdollisessa olosuhteissa, jossa ilman lämpötila on mahdollisimman korkea. Mitä korkeampi ilman lämpötila, sitä pienempi on jäähdytysteho. Mittausten aikana mitatusta ulkoilman lämpötilasta on laskettava ilman ominaislämpökapasiteetti, dynaaminen viskositeetti ja lämmönjohtokyky. Kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua yhtälöiden 28 – 29 mukaisesti. (Lampinen J).

$$p_v = \frac{x}{0,6220 + x} p \quad (28)$$

jossa

p_v = Vesihöyryn osapaine [bar]

x = Ilman kosteuspitoisuus $\left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]$

p = Ilmanpaine [bar]

Kuivan ilman osapaine saadaan laskettua vähentämällä ilmanpaineesta vesihöyryn osapaine eli $p_{da} = p - p_v$. Kuivan ilman tiheys saadaan laskettua yhtälön 29 mukaisesti.

$$\rho_{da} = \frac{p_{da} \cdot M_{da}}{R \cdot T} \quad (29)$$

jossa

ρ_{da} = Kuivan ilman tiheys $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

p_{da} = Kuivan ilman osapaine [bar]

M_{da} = Moolimassa 0,028964 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$

R = Kaasuvakio 8,31441 $\left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$

T = Ilman lämpötila [K]

Normaalissa tilanteessa hätädieselgeneraattorin (EDG) ilmajäähdyttimessä toimivat kaikki 12 puhallinta. Ilmavirtauksen kokonaismassavirta saadaan laskettua puhaltimien määrän, ilman virtausnopeuden ja kuivan ilman tiheyden tulona. Kuivan ilman dynaaminen viskositeetti voidaan laskea yhtälöstä 30, ja kuivan ilman lämmönjohtokyky yhtälöstä 31. Yhtälöissä oleva T on mittaussajanhetkellä oleva ilman lämpötila kelvineinä. (Detlev et al. 2004).

$$\mu_a = 2,287973 \cdot 10^{-6} + 6,259793 \cdot 10^{-8} \cdot T - 3,131956 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 8,15038 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] \quad (30)$$

$$k_a = -4,937787 \cdot 10^{-4} + 1,018087 \cdot 10^{-4} \cdot T - 4,627937 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 1,250603 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (31)$$

7.2 LT-piirin jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin

Määräaikaiskokeen mittauspisteenä on LT- ja HT-piirin jäähdytysnesteen lämpötilan mittaaminen ja tilavuusvirtaus. Lämpötilat mitataan ennen ilmajäähdytintä. Jäähdytysnesteen lämpötilan mittausten myötä selvitetään vesiglykoliseoksen aineominaisuudet. Aineominaisuuksien selvittämiseksi on tiedettävä vesiglykoliseoksen tilavuusprosentti, jonka oletetaan olevan vakio. Jäähdytysnesteen lämpötilan ja tilavuusprosentin kautta voidaan selvittää vesiglykoliseoksen tiheys, ominaislämpökapasiteetti, dynaaminen viskositeetti ja lämmönjohtavuuskyky.

Jäähdytysveden aineominaisuuksien ja mittauksesta saadun tilavuusvirtauksesta voidaan laskea Prandtlin-, Reynoldsin- ja Nusseltin luvut. Laskenta aloitetaan Prandtlin luvusta, joka mittaa liikevoiman suhteellista tehokkuutta ja energiansiirtoa. Prandtlin luku saadaan laskettua yhtälöstä 4 ja tulokseksi saadaan 38,94. Jotta saadaan Reynoldsin luku, on laskettava ensin jäähdytysnesteen massavirtaus. Massavirtaus saadaan laskettua tilavuusvirtauksen ja vesiglykoliseoksen tiheyden avulla. Massavirtaus saadaan laskettua yhtälön 32 avulla.

$$\dot{m} = \frac{q_v \cdot \rho}{3600 \text{ s}} = 22,50 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (32)$$

jossa

$$\dot{m} = \text{Massavirtaus} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$q_v = \text{Tilavuusvirtaus} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

$$\rho = \text{Väliaineen tiheys} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Putken sisäinen jäähdytysnesteen virtausnopeus saadaan laskettu yhtälön 33 avulla. Virtausnopeutta hyödynnetään Reynoldsin luvun laskennassa.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_w} = 0,398 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (33)$$

jossa

$$v = \text{Väliaineen nopeus} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m} = \text{Massavirtaus} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho = \text{Väliaineen tiheys} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$A_w = \text{Putken vesialueen pinta – ala} [\text{m}^2]$$

Putken sisällä virtaavan jäähdytysnesteen Reynoldsin luku saadaan laskettua yhtälön 3 mukaisesti ja tulokseksi saadaan 1412,32. Reynoldsin luku kuvaa inertiavoimien suhteesta nesteen viskoosien voimiin. Reynoldsin luvun laskettua voidaan määrittää virtauksen kitkakerroin seuraavasti:

$$f = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2} = 0,059696$$

Prandtin luku saadaan laskettua yhtälön 4 mukaisesti ja tulokseksi saadaan 38,94. Jäähdytysnesteen Nusseltin luku saadaan laskettua hyödyntäen Gnielinskin korrelaatiokaavaa. Korrelaatiokaavassa käytetään aikaisemmin laskettuja Prandtin ja Reynoldsin lukuja sekä kitkakerrointa. Nusseltin luku edustaa lämmönsiirron tehostamista nestekerroksen läpi konvektion seurauksena suhteessa saman nestekerroksen johtamiseen. Mitä suurempi Nusseltin luku, sitä tehokkaampi konvektio on kyseessä. Nusseltin luku saadaan laskettua seuraavasti:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = 9,5798$$

Jäähdytysnesteen Nusseltin luvun myötä, saadaan laskettua putkessa virtaavan jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin. Jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroimen laskennassa hyödynnetään jäähdytysnesteen lämmönjohtavuutta ja putken sisäistä halkaisijaa. Lämmönsiirtokerroin saadaan laskettu yhtälöllä 34.

$$h_h = \frac{Nuk}{D_i} = 252,42 \frac{W}{m^2K} \quad (34)$$

Jäähdytysnesteen lämmönsiirtopinta-ala A_h saadaan laskettua yhtälöstä 35.

$$A_h = NL\pi D_i \quad (35)$$

7.3 LT-piirin ilman lämmönsiirtokerroin

Ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimien lävitse virtaavan ilman lämmönsiirtokerroimen laskeminen on tämän työn vaativin osuus. Lämmönvaihtimien osalta on tiedettävä tarkat geometriset mitat, jotta ilman lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua. Tarkastelussa käytetään hyödyksi valmistajan tekemiä rakennepiirustuksia, joista nähdään ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen rakenne. Hätädieselgeneraattorin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen rakenne on nähtävissä kuvissa 21 ja 22. Kuvista nähdään, että ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen sisällä olevat putket ovat porrastetusti toisiinsa nähden. Lisäksi lämmönvaihtimen ilmapuolella on jatkuvalevyiset rivat, jotka tekevät ilman virtauksesta sekoittamattoman.

Ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimessa virtaavan ilman lämmönsiirtokerroimen laskenta aloitetaan pienimmän ilman vapaan virtauksen alueesta A_o . Laskennassa hyödynnetään kuvaa 17 sekä yhtälöitä 21, 22 ja 23, jotka ovat esiteltyinä alla:

$$A_o = \left\{ \left(\frac{L_3}{P_t} - 1 \right) z'' + [(P_t - d_o) - (P_t - d_o)t_f N_f] \right\} L_1$$

$$z'' = x'' \quad \text{jos } x'' < y''$$

$$z'' = y'' \quad \text{jos } y'' < x''$$

$$x'' = (P_t - d_t) - (P_1 - d_t)t_f N_f$$

$$y'' = \left[\left(\frac{P_t}{2} \right)^2 + (P_1)^2 \right]^{0.5} - d_t - (P_t - d_t)t_f N_f$$

Pienimmän ilman vapaan virtauksen alueen laskennasta voidaan määritellä ilman massanopeus G . Massanopeus saadaan laskettua yhtälöllä 19 seuraavasti:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_o} = 223,91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

Ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen sisällä virtaavan ilman Reynoldsin luvun laskennassa hyödynnetään massanopeutta G , putken ulkohalkaisijaa d_o ja ilman dynaamista viskositeettia μ . Reynoldsin luku saadaan laskettua yhtälöstä 36 seuraavasti:

$$Re_D = \frac{Gd_o}{\mu} = 168374,17 \quad (36)$$

Kuvasta 23 nähdään LT- ja HT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen rakenne. Kuvan perusteella voidaan todeta, että LT-piirin lämmönvaihtimessa on viisi putkiriviä. Putkirivien myötä voidaan laskea Colburnin kerroin j , hyödyntäen Gray and Webb korrelaatiokaavaa yli neljän rivin osalta ja se on esiteltyä yhtälössä 16.

$$j = 0,14 Re_D^{-0,328} \left(\frac{P_t}{P_1} \right)^{-0,502} \left(\frac{s}{d_o} \right)^{0,0312}$$

LT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimessa virtaavan ilman lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua yhtälön 18 mukaisesti ja se on esiteltyä alla.

$$h_c = j \frac{Gc_p}{Pr^{\frac{2}{3}}} = 723,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{s}}$$

LT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen ilman lämmönsiirtopinta-ala A_c saadaan laskettua yhtälöstä 37 seuraavasti:

$$A_c = NL\pi D_o \quad (37)$$

7.4 LT-piirin lämmönsiirron kokonaiskerroin

Jotta ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin pinta-alaa kohden UA saadaan laskettua, on sitä ennen selvitettävä jäähdytysputkien lämpövastus sekä putkien sisäinen kokonaisvaltainen likaisuusaste. Jäähdytysputkien lämpövastus R_w saadaan laskettua yhtälöstä 10, joka on esitettyä kappaleen alla. Jäähdytysputkien sisäistä likaisuusastetta laskiessa hyödynnetään valmistajan antamaa likaisuuskerrointa.

$$R_w = \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi kNL}$$

LT-piirissä olevan ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen lämmönsiirron kokonaiskerroin pinta-alaa kohden saadaan laskettua yhtälön 9 mukaan. Yhtälössä hyödynnetään kaikkia edellä laskettuja arvoja, jotka olivat jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin ja pinta-ala, jäähdytysnesteputken sisäinen likaisuusaste, jäähdytysputkien lämpövastus sekä ilmajäähdyttimen ilman lämmönsiirtokerroin ja pinta-ala.

$$UA = \left(\frac{1}{h_h A_h} + \frac{R''_{f,i}}{A_h} + R_w + \frac{1}{h_c A_c} \right)^{-1} = 62,07 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

7.5 LT-piirin lämmönsiirtoteho

Ilmajäähdyttimen LT-piirin lämmönvaihtimen kokonaisteho saadaan laskettua hyödyntämällä NTU-tehokkuusmenetelmää. NTU-tehokkuusmenetelmän käyttämistä pidetään hyväksytyimpänä lämmönvaihtimen suunnittelu- ja analyysimenetelmänä. NTU-tehokkuusmenetelmän määrittäminen aloitetaan NTU-luvun laskemisella. Siirtoyksiköiden lukumäärä NTU on dimensioton parametri, jota käytetään laajalti lämmönvaihtimen analyysiin ja se saadaan määritettyä seuraavasti:

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{UA}{\dot{m}c_p} = \frac{\left[\frac{\text{kW}}{\text{K}} \right]}{\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \cdot \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]} = 0,784$$

NTU-luvun yhtälössä oleva UA on edellisessä kappaleessa esitelty lämmönsiirronkokonaiskerroin pinta-alaa kohden. C_{\min} on pienempi lämpövirta ja se saadaan laskettua väliaineen massavirran ja ominaislämpökapasiteetin avulla. Kuvasta 23 nähdään LT-piirin lämmönvaihtimen rakenne, josta voidaan havaita, että jäähdytysneste tulee ja lähtee samalta puolelta lämmönvaihdinta. Lämmönvaihtimessa virtaava jäähdytysneste on vastavirtaava lämmönvaihtimen keskellä olevissa putkissa. Tämä tieto on keskeistä lämmönvaihtimen tehokkuuden selvittämisessä ja sen perusteella valitaan taulukosta 3 vastavirtauksen tehokkuuden yhtälö. Vastavirtauksen tehokkuus voidaan laskea yhtälöstä 38.

$$\varepsilon_{co} = \frac{1 - \exp[-NTU(1-C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1-C_r)]} \quad (38)$$

Yhtälöä 38 käytetään siinä vaiheessa, kun lämpövirtasuhde C_r on alle 1. Lämpövirtasuhde kuvaa pienemmän ja suuremman lämpövirran välistä suhdetta ja se saadaan laskettua yhtälöstä 39 seuraavasti:

$$C_r = \frac{c_{\min}}{c_{\max}} = \frac{\dot{m}c_p}{\dot{m}c_p} \quad (39)$$

Jos lämpövirtasuhde on 1, käytetään vastavirran tehokkuuden laskennassa yhtälöä 40.

$$\varepsilon_{co} = \frac{NTU}{1+NTU} \quad (40)$$

Lämmönvaihtimen rakenteesta huomataan, että putkissa virtaava jäähdytysneste ja putkien ylitse virtaava ilmavirtaus ovat ristikkäin toisiinsa nähden. Ilmavirtaus on sekoittamaton lämmönvaihtimissa asennettujen ripojen takia. Lisäksi lämmönvaihtimen sisälle menevä jäähdytysneste virtaa omissa putkissa, joten jäähdytysnestekin on sekoittamaton. Sekoittamattomien väliaineiden ristivirtauslämmönvaihtimen rakenne on nähtävissä kuvassa 13. Tietojen perusteella voidaan valita taulukosta 3 ristivirtauksen tehokkuuden yhtälö, jossa kumpikaan väliaineista ei sekoitu keskenään. Ristivirtauksen tehokkuus voidaan laskea yhtälöstä 41.

$$\varepsilon_{cr} = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right) (NTU)^{0,22} \{\exp[-C_r(NTU)^{0,78}] - 1\}\right] \quad (41)$$

Lämmönvaihtimen kokonaistehokkuus saadaan määriteltyä hyödyntämällä vastavirtauksen ja ristivirtauksen tehokkuutta sekä vastavirtauksessa olevien putkirivien määrää. Kokonaistehokkuus saadaan laskettua yhtälön 42 mukaan seuraavasti:

$$\varepsilon = \exp\left(\frac{1}{N_t} \ln\left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{co}}\right)\right) \varepsilon_{co} \quad (42)$$

NTU-tehokkuusmenetelmää hyödyntämällä saadaan lämmönvaihtimen todellinen jäähdytysteho, kun tiedetään ε tehokkuus, pienempi lämpökapasiteetti C_{\min} ja väliaineen sisään

tulevat lämpötilat T_h ja T_c . T_h on jäähdytysnesteen lämpötila ja T_c on ilman lämpötila. Jäähdytysteho saadaan laskettua yhtälön 25 mukaisesti seuraavasti:

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = 1226 \text{ kW}$$

LT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen jäähdytystehoksi on saatu NTU-tehokkuusmenetelmällä 1171 kW. Jäähdytystehon laskennassa ei ole otettu huomioon ilmankosteutta. Esimerkiksi, jos laskennassa oletetaan ilmankosteuden RH olevan 80 %, jäähdytystehoksi saadaan 1169 kW.

Vertaileva jäähdytysteho saadaan laskettu LT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan jäähdytysnesteen massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen tulona. Lämpötehon laskenta on esitetty yhtälössä 8 ja se saadaan laskettua seuraavasti:

$$q = \dot{m}c_p(T_i - T_o) = 1306 \text{ kW}$$

LT-piirin lämmönvaihtimen jäähdytystehon vertailutulokseksi saadaan 1306 kW. Vertailutulos on korkeampi, koska LT-piirin ilman lämmönsiirtokertoimessa laskennassa käytetään korrelaatiokaavaa. Korrelaatiokaava ei kerro todellista arvoa ja sen tarkkuus on ± 10 %. Tämän lisäksi valmistaja on käyttänyt ilman lämmönsiirtokertoimen ja jäähdytysputkien lämpövastuksien määrittämiseen laboratoriotestejä. Mittausvirhe huomioiden edellä lasketut laskelmat vastaavat valmistajan tekemiä tuloksia.

7.6 HT-piirin jäähdytystehon laskenta

LT- ja HT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimet ovat päällekkäin, joten HT-piirin lämmönvaihtimen laskenta aloitetaan ilman lämpötilan määrittämisellä. HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaava ilma tulee LT-piirin lämmönvaihtimen läpi, joten LT-piirin lämmönvaihtimen jälkeinen lämpötila saadaan johdettua yhtälöstä 8. Laskennassa käytetään LT-piirin lämmönvaihtimen NTU-tehokkuusmenetelmästä saatua jäähdytystehoa sekä, ilman massavirtaa, ominaislämpökapasiteettia ja lämpötilaa. HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan ilman lämpötila saadaan laskettua seuraavasti:

$$T_o = \left(\frac{q}{\dot{m}c_p} \right) + T_i = 15,99 \text{ °C}$$

HT-piirin lämmönvaihtimen jäähdytysteho lasketaan hyödyntämällä ensin NTU-tehokkuusmenetelmää. Jäähdytysteho lasketaan samassa laskujärjestyksessä, kuin mitä LT-piirin lämmönvaihtimen laskennassa käytetään. Laskenta aloitetaan HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan ilman aineominaisuuksien laskennalla ja siinä hyödynnetään yhtälöitä 28 – 31.

Määräaikaiskokeen mittauspisteinä ovat HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan jäähdytysnesteen lämpötila ja tilavuusvirtaus. Jäähdytysnesteen lämpötilan ja tilavuusvirtauksen avulla voidaan laskea HT-piiriin lämmönvaihtimessa virtaavan jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerroimen määrittämisessä on huomioitava, että jäähdytysnesteen aineominaisuudet ovat muuttuneet lämpötilan nousun johdosta. HT-piirissä virtaavan jäähdytysnesteen lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua hyödyntämällä samoja yhtälöitä, joita käytettiin ja esiteltiin kappaleessa 7.2.

HT-piirin lämmönvaihtimien osalta on tiedettävä tarkat geometriset mitat, jotta ilman lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua. Tarkastelussa käytetään hyödyksi valmistajan tekemiä rakennepiirustuksia, joista nähdään HT-piirin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen rakenne. HT-piiriin ilmajäähdyttimen ilman lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua samalla tavalla, kuin on tehty luvussa 7.3. Laskenta aloitetaan pienimmän ilman vapaan virtauksen alueesta A_0 .

Kuvasta 22 nähdään HT-piirin lämmönvaihtimen rakenne. Kuvan perusteella voidaan todeta, että HT-piiriin lämmönvaihtimessa on kaksi putkiriviä. Putkirivien avulla voidaan laskea Colburnin kerroin j , hyödyntämällä Gray and Webb korrelaatiokaavaa alle neljän rivin osalta. Colburnin kerroin j saadaan laskettua yhtälön 17 mukaan seuraavasti:

$$j_N = \frac{0,14 Re_D^{-0,328} \left(\frac{P_t}{P_1}\right)^{-0,502} \left(\frac{s}{d_0}\right)^{0,0312}}{0,991 \left[2,24 Re_D^{-0,092} \left(\frac{N_t}{4}\right)^{-0,031} \right]^{-0,607(4-N_t)}}$$

HT-piiriin lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin pinta-ala kohden voidaan laskea samalla tavalla, kuin on tehty luvussa 7.4. Laskuissa on huomioitava lämmönvaihtimen sisällä olevien jäähdytysnesteputkimäärän muutos. Putkimäärän muutos on huomioitava pinta-ala laskuissa ja putken sisäistä likaisuusastetta määrittäessä.

HT-piirin ilmajäädyttimen lämmönvaihtimen jäähdytystehoksi saadaan NTU-tehokkuusmenetelmällä 3795 kW. Vertaileva jäähdytysteho saadaan määriteltä HT-piirin lämmönvaihtimelle virtaavan jäähdytysnesteen massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen tulona. HT-piirin ilmajäädyttimen lämmönvaihtimen jäähdytystehon vertailutulokseksi saadaan 3639 kW.

NTU-tehokkuusmenetelmästä saatu jäähdytysteho korkeampi, koska harjoitusmittausten aikana ulkolämpötila oli alhainen. Määräaikaiskokeet suoritetaan huomattavasti korkeamassa ulkoilman lämpötilassa, jolloin LT-piirin lämmönvaihtimen läpi virtaavan ilman lämpötila on korkeampi. HT-piirin lämmönvaihtimen ilman lämmönsiirtokertoimen laskemisessa käytetään korrelaatiokaavaa. Korrelaatiokaava ei kerro todellista arvoa ja sen tarkkuus on $\pm 10 \%$. Tämän lisäksi valmistaja on käyttänyt ilman lämmönsiirtokertoimen ja jäähdytysputkien lämpövastuksien määrittämiseen laboratoriotestejä. Mittausvirhe huomioiden edellä määritetyt laskelmat vastaavat valmistajan tekemiä tuloksia.

7.7 Hyväksyntäkriteeri ilmajäädyttimille

Turvallisuustekniset käyttöehdot määrittävät viranomaisten hyväksymät ja määräämät puitteet, joissa ydinvoimalaitoksen käyttö on ympäristön turvallisuusnäkökohdat huomioon ottaen sallittua. Turvallisuustekniset käyttöehdot pitävät sisällään määräaikaiskokeiden hyväksyntäkriteerit. Määräaikaiskokeessa suoritettava koe on tehtävä hyväksyttävien tuloksien, jotta hätädieselgeneraattorin ja SBO-dieselgeneraattorin ilmajäädytin voidaan katsoa olevan käyttökunnossa.

Käyttökuntoisuustarkastus aloitetaan ilmajäädyttimien silmämääräisellä tarkastuksella. Tarkastuksessa tarkistetaan ilmajäädyttimien alapuolinen osa, ettei ilmajäädyttimien lamellien välissä ole sinne kuulumatonta roskaa tai vierasesineitä. Lisäksi tarkastuksessa tarkistetaan ilmajäädyttimen puhaltimen sisäinen osa vierasesineiden osalta. Ilmajäädyttimien määräaikaiskokeissa tehdyillä jäähdytysteholaskuilla on merkittävä vaikutus hyväksyntäkriteeriin. Tavanomaisesti hyväksyntäkriteeri lämmönsiirron määräaikaiskokeelle asetettaisiin seuraavasti:

Hyväksyttävä mittaustulos \geq vaadittu lämmönsiirtoteho + mittausrvirhe + marginaali = hyväksyntäkriteeri

Hyväksyntäkriteerin eräänä merkittävänä kriteerinä on mittausvirhe, joka tulee huomioida arvioidessa onko koe suoritettu hyväksytysti vai ei. Määräaikaiskokeiden aikana mittauksia tehdään jäähdytysnesteen tilavuusvirran selvittämiseen ja jäähdytysnesteen lämpötilojen mittaamiseen. NTU-tehokkuusmenetelmässä hyödynnetään mittaustuloksista saatua jäähdytysnesteen tilavuusvirtaa ja ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen sisään virtaavaa jäähdytysnesteen lämpötilaa. Samoja mittaustuloksia käytetään ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen vertailevan jäähdytystehon laskemisessa. Lämmönvaihtimelle virtaavan jäähdytysnesteen tilavuusvirtaa ja sisään menevän lämpötilan mittausvirheitä ei siis tarvitse ottaa huomioon kokonaisvirhetarkastelussa.

Mittausvirheen suuruuden vuoksi edellä esitettyä tavanomaista hyväksyntäkriteeriä ei voida asettaa määräaikaiskokeelle, joten kriteerissä on väistämättä joustettava turvallisuusmarginaalista teknisten rajoitteiden vuoksi. Määräaikaiskokeiden hyväksyntäkriteeriksi voidaan asettaa laskutoimitusten mukaan seuraavasti. Lasketaan ensin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen jäähdytysteho NTU-tehokkuusmenetelmällä, lasketaan vertaileva jäähdytysteho yhtälöllä 8 virtaavan jäähdytysnesteen massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen tulona. Lasketaan vertailevaan jäähdytystehoon vaikuttava mittausvirhe ja määritetään, että NTU-tehokkuusmenetelmä pitää olla vertailevan jäähdytystehon ja siihen vaikuttavan mittausvirheen sisällä. Hyväksyntäkriteeriksi voidaan asettaa tämän myötä seuraavasti:

Laskettu jäähdytysteho - mittausvirhe ≤ NTU-tehokkuusmenetelmä ≤ laskettu jäähdytysteho + mittausvirhe = hyväksyntäkriteeri

Mittausvirheessä otetaan huomioon vain vertailevan jäähdytystehon laskennassa esille nousut ilmajäähdyttimien lämmönvaihtimien jälkeinen jäähdytysnesteen lämpötila. Taulukoiden 5 ja 6 arvojen mukaan LT-piiriin asennetun lämpötila-anturin CT524 absoluuttinen virhe ± 1 °C astetta ja HT-piirissä olevan lämpötila-anturin CT503 absoluuttinen virhe ± 2 °C astetta. Absoluuttisten virheiden lisäksi paikallismittareissa on luentavirhettä ± 1 °C astetta. Edellä mainittujen arvojen perusteella saadaan laskettua vertailevan jäähdytystehon mittausvirhe, joka otetaan huomioon hyväksyntäkriteerissä. Hätädieselgeneraattorin LT-piiriin ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen vertailevan jäähdytystehon mittausvirhe saadaan johdettua yhtälöllä 8 ja yhtälöstä 27 seuraavasti:

$$\Delta q = \sqrt{(-c_p \cdot \dot{m})^2 \cdot \Delta T} = \sqrt{\left(-3,518 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 22,50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)^2 \cdot (\pm 2 \text{ K})} = \pm 158 \text{ kW}$$

kun virhekaavan osittaisderivaatta otetaan vain ulostulevan lämpötilan suhteen.

Vertaileva jäähdytysteho ja siihen vaikuttavan mittausvirheen tulokseksi saadaan 1148 kW - 1464 kW. NTU-tehokkuusmenetelmästä saatu jäähdytysteho 1171 kW, joka on vertailevan jäähdytystehon ja siihen vaikuttavan mittausvirheen sisällä ja se voitaisiin hyväksyä. HT-piirin lämmönvaihtimen jäähdytystehoksi saatiin laskettu NTU-tehokkuusmenetelmällä 3795 kW ja vertailevaksi jäähdytystehoksi 3639 kW. Vertailevaan jäähdytystehoon vaikuttavan mittausvirheeksi saadaan laskettu ± 287 kW, jonka myötä vertaileva jäähdytysteho on 3352 kW - 3926 kW. NTU-tehokkuusmenetelmästä laskettu jäähdytysteho on mittausvirheen sisällä, jolloin tämä hyväksyntäkriteeri täytyisi.

Jäähdytysnesteen lämpötilan mittauspisteiden epätarkkuuksien myötä, vertailevalla jäähdytysteholla on merkittäviä heittoja. Hyväksyntäkriteeri olisi suotavaa asettaa siten, että mitaustulos pysyisi mittausvirhe huomioiden koko ajan NTU-tehokkuusmenetelmän yläpuolella. Tässä vaiheessa kyseistä hyväksyntäkriteeriä ei voida vielä asettaa, koska mittalaitteiden suuri epätarkkuus estää tämän. Hyväksyntäkriteeri on asetettava kompromissina turvallisuuden ja toistuvien (aiheettomien) alitusten suhteen. Hyväksyntäkriteeriä on suositeltavaa tarkastella tarkemmin korkeammassa ulkoilman lämpötilassa, jolloin mittauksista saataisiin kerrytettyä mitaustuloksia ja trendiseurantaa määräaikaikoe varten. Mittaustulosten ja trendiseurannan myötä voitaisiin tehdä päätöksiä hyväksyntäkriteerin osalta ja tarkastella tarkemmin voidaanko laskennassa huomioida ilmajäähdyttimien lämmönvaihtimien ylimeritys hyväksyntäkriteeriin kuuluvana turvallisuusmarginaalina.

Vertailun vuoksi voidaan tarkastella OL1 ja OL2 laitosten uuden ilmajäähdytteisen 9. EDG:n hyväksyntäkriteeriä. Esimerkiksi 9. EDG:n osalta hyväksyntäkriteeriksi on asetettu, että määräaikaikoe tehdään vain ulkolämpötilan ollessa yli $+15$ °C astetta, kun taas OL 3 hätdieselgeneraattorien ja SBO-dieselgeneraattorien osalta laskutoimitukset pystytään toteuttamaan alle $+15$ °C asteen. Lisäksi 9. EDG osalta on määritetty, ettei jäähdytysnesteen massavirta ja lämpötila saa ylittyä annetuista kokeellisesti määritetyistä rajoista. Myöskään 9. EDG:ssä ei voida käyttää tavanomaista hyväksyntäkriteeriä lämmönsiirron osalta, koska mittaustarkkuus on paikallisten lämpötilamittausten vuoksi liian heikko. Toisin kuin nyt tarkasteluissa EDG- ja SBO-dieselgeneraattoreissa 9. EDG:n määräaikaikoe oli valmistajan laskentatulosten puutteessa määritettävä kokeellisesti käyttämällä ilmajäähdytystä eri ulkoilman lämpötiloilla kesällä 2020. Tämän myötä 9. EDG:tä ei ole voitu käyttää hyödyksi OL3 laitoksen määräaikaikokeiden määrittämiseen. 9. EDG:n kokemusten perusteella voi-

daan kuitenkin todeta, että paikallismittareissa on kuitenkin mahdollista olla useamman asteen systemaattinen virhe. Systemaattista virhettä saataisiin pienennettyä useammalla lämpötilamittarilla.

7.8 Kehitysehdotukset

Työn aikana tehtiin mittauksia hätädiezelgeneraattorin jäähdytysnesteen parissa. Mittauksia suoritettiin jäähdytysnesteen tilavuusvirtaukseen ja lämpötilan seurantaan. Tilavuusvirran mittauksissa hyödynnettiin Transport PT900 -mittalaitetta. Hätädiezelgeneraattorien lämpötilamittausten tulosten tarkistamisessa käytettiin paikallismittareita. Määräaikaiskoe on tarkoitus suorittaa yhtäaikaisesti LT- ja HT-piireihin, joten tilavuusvirtauksen mittaukseen tarvitaan samanaikaisesti kaksi ultraääni-Transport PT900 -mittalaitetta. HT-piirin osalta tilavuusvirtamittalaitteen asennus vaatii tällä hetkellä paljon työtä, koska HT-piiristä on purettava aina eristeet ennen mittalaitteen asentamista.

Jatkoa ja tulevia määräaikaiskokeita varten, olisi tärkeää selvittää, onnistuisiko kiinteiden tilavuusvirtausmittareiden asentaminen hätädiezelgeneraattorien ja SBO-dieselgeneraattorien jäähdytysnesteen LT- ja HT-piireihin. Tällä hetkellä HT-piirissä tilavuusvirtauksen mittauskohtien osalta olisi suotavaa tehdä eristeistä helposti poistettavia, esimerkiksi pikakiinnikkeellä olevia suoja/eristeitä.

Hätädiezelgeneraattorien osalta jäähdytysnesteen lämpötilat LT- ja HT-piireistä saadaan mitattua lämpötila-antureista, jotka ovat asennettu putkien sisään. Vaikka lämpötila-anturit ovat asennettu putkien sisään, mittaustulosten epätarkkuus johtuu paikallismittareiden lukuvirheestä. Paikallismittareissa olevat mittaussvälit ovat tällä hetkellä 2 °C asteen välein, joka tekee mittarista olevan lukuvirheen huomattavan suureksi. Suositeltavaa olisi, että paikallismittarit saataisiin vaihdettua esimerkiksi digitaalisiin mittareihin. Vaihdoksen myötä välttyttäisiin lukuvirheistä aiheutuneista laskuvirheistä.

SBO-dieselgeneraattorien LT- ja HT-piirin jäähdytysnestelinjassa ei ole tällä hetkellä ainutakaan paikallista lämpötila-anturia. Tästä syystä ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimelle menevää ja sieltä poistuvaa jäähdytysnesteen lämpötilaa ei saada paikallisesti selvitettyä. Harjoitusmittausten aikana kokeiltiin lämpökameran ja infrapunamittarin käyttöä jäähdytysnestelinjojen lämpötilojen selvittämiseen. Lämpötilojen mittaaminen ilmajäähdyttimestä lämpökameran ja infrapunamittarin kanssa on erittäin hankalaa. Kyseisillä mittalaitteilla mittaustarkkuus ja toistettavuus ovat erittäin huonoja.

Suosittelen, että SBO-dieselgeneraattorien osalta LT- ja HT-piirin jäähdytysnestejärjestelmään lisättäisiin kiinteitä anturitaskuja. Kiinteiden anturitaskujen johdosta saadaan putken sisällä virtaavan jäädytysveden lämpötilat mitattua ja mittaustuloksista johdetuista tuloksista tarkempia. Ensimmäinen anturitasku olisi hyvä asentaa LT- ja HT-piirissä termostaatin jälkeen, mutta kuitenkin ennen ilmajäähdyttimen lämmönvaihdinta. Antureilla saadaan mitattua ilmajäähdyttimelle menevän jäähdytysnesteen lämpötilat LT- ja HT-piirissä. Toinen anturitasku olisi hyvä asentaa ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen jälkeen LT- ja HT-piiriin ennen termostaattilinjojen yhtymistä. Antureilla saadaan mitattua ilmajäähdyttimen jälkeinen jäähdytysnesteen lämpötila LT- ja HT-piirissä.

8 YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli määrittää Olkiluoto 3 -häädieselgeneraattorien ja SBO-dieselgeneraattorien ilmajäähdyttimien määräaikaiskoe. Aihe on ajankohtainen, koska kyseistä määräaikaiskoetta ei ole vielä määritetty. Määräaikaiskokeen tarkoituksena on selvittää ydinvoimalaitoksen hätägeneraattoreiden ilmajäähdyttimen riittävä jäähdytysteho mitausajanhetkellä. Ilmajäähdyttimet ovat kriittisessä asemassa ja ne ovat turvallisuusluokiteltuja. Ilmajäähdyttimet jäähdyttävät dieselmoottorin LT- ja HT -piirissä virtaavaa jäähdytysvettä. Määräaikaiskokeen tarkoituksena on ennaltaehkäistä vikatilanteet ja mahdollistaa tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet samalla ylläpitäen ilmajäähdyttimen jäähdytystehoa.

Määräaikaiskoe aloitetaan ilmajäähdyttimien silmämääräisellä tarkastuksella. Tarkastuksessa tarkastetaan ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen alapuoli ja lisäksi puhaltimen sisäpuoli sinne kuulumattomista roskista sekä vierasesineistä. Määräaikaiskokeessa tehdään mittaukset dieselmoottorin jäähdytysnesteen LT- ja HT-piiriin. Jäähdytysnestepiireistä on tarkoitus mitata ilmajäähdyttimille virtaavan jäähdytysnesteen tilavuusvirtaus sekä lämpötila ennen ja jälkeen ilmajäähdyttimen. Jäähdytysnesteen tilavuusvirtauksen mittauksessa käytetään ultraäänimittalaitetta, joka asennetaan LT- ja HT-piiriin termostaatin jälkeen. Hätädieselgeneraattorien jäähdytysnesteen lämpötilojen mittauksessa käytetään kiinteitä antureita ja niiden lämpötilat pystytään lukemaan paikallismittareista. SBO-dieselgeneraattorien osalta käytetään vaihtoehtoisia mittalaitteita, koska jäähdytysnestepiiristä ei löydy kiinteästi asennettuja lämpötila-antureita.

Määräaikaiskokeen tärkeimpänä päämääränä on varmistua ilmajäähdyttimien riittävät jäähdytystehot. Ilmajäähdyttimien valmistaja on käyttänyt suunnitteluperusteena korkeaa ulkoilman lämpötilaa. Koska määräaikaiskoe tullaan aina tekemään erilaisessa ulkolämpötilassa, on ilmajäähdyttimen jäähdytystehon teoreettisessa laskennassa hyödynnettävä NTU-tehokkuusmenetelmä. NTU-tehokkuusmenetelmässä hyödynnetään vain ilmajäähdyttimen lämmönvaihtimen sisään menevien väliaineiden lämpötiloja ja massavirtoja. NTU-tehokkuusmenetelmä on lämmönvaihtimien käytetyin suunnittelu- ja analyysimenetelmä. Ilmajäähdyttimien vertaileva jäähdytystehon laskenta suoritetaan lämmönvaihtimelle virtaavan jäähdytysnesteen massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen tulona.

Määräaikaiskokeessa suoritettava koe on tehtävä hyväksyttävien tuloksin, jotta hätädieselgeneraattorin ja SBO-dieselgeneraattorin ilmajäähdytin voidaan katsoa olevan käyttökunnossa. Määräaikaiskokeiden hyväksyntäkriteeriksi voitaisiin asettaa laskutoimitusten myötä

Laskettu jäähdytysteho - mittausvirhe \leq NTU-tehokkuusmenetelmä \leq laskettu jäähdytysteho + mittausvirhe = hyväksyntäkriteeri.

Hyväksyntäkriteeriä on suositeltavaa tarkastella tarkemmin korkeammassa ulkoilman lämpötilassa, jolloin mittauksista saataisiin tarkempia tuloksia ja vaadittavaa trendiseurantaa määräaikaikaiskoetta varten. Trendiseurannan myötä voitaisiin tehdä päätöksiä hyväksyntäkriteerin osalta ja tarkastella tarkemmin voidaanko laskennassa huomioida ilmajäähdyttimien lämmönvaihtimien ylirajoitus tarvittavana turvallisuusmarginaalina. Tämän työn lisäksi toimeksiantajalle on tehty Excel-laskentatyökalu, joka helpottaa ilmajäähdyttimen jäähdytystehon laskemista. Excel-laskentatyökalun avulla voidaan määrittellä vain esimerkiksi yhden ilmajäähdyttimen jäähdytysteho, muokata lämmönvaihtimen sisällä olevien putkien määrää ja lisäksi laskea tilanne, jossa yksi puhaltimista on rikki.

Työssä tehtyjen laskutoimitusten myötä havaittiin, että valmistaja on mahdollisesti tehnyt laskentavirheen ainakin hätädieselgeneraattorien LT-piirin lämmönvaihtimen jäähdytystehon laskennassa. Lisäksi huomiota herättävä epäselvyys on siinä, että valmistaja vaikuttaa käyttävän ristivirtauksen tehokkuusmenetelmässä teorian vastaista yhtälöä. Valmistajan tekemässä laskennassa käytetään yhtälöä, jota pitäisi käyttää siinä vaiheessa, kun jäähdytysneste sekoittuu keskenään lämmönvaihtimen sisällä. Lämmönvaihtimien rakenne on sellainen, jossa molemmat väliaineet eivät sekoitu. Jäähdytysneste virtaa omissa putkissa ja putkien ylitse liikkuva ilma ripojen välissä. Tämän seurauksena ristivirtauksen tehokkuuden laskennassa pitäisi käyttää yhtälöä, jossa väliaineet eivät sekoitu.

Jatkotoimenpiteenä olisi hyvä selvittää oikeat jäähdytysteholaskennat valmistajalta ja varmistua tarkemmista mittausvirheistä. Lisäksi SBO-dieselgeneraattorien osalta olisi suotavaa, että jäähdytysnesteen LT- ja HT-piiriin asennettaisiin kiinteät lämpötila-anturit, koska tällä hetkellä lämpötilojen mittaaminen on erittäin hankalaa. Kiinteiden lämpötila-antureiden kautta saataisiin tarkemmat lämpötilamittaukset jäähdytysnesteputkistojen sisältä.

LÄHDELUETTELO

- (Ahonen 2011) Ahonen Essi. 2011. *Vikatietoisuuden tutkiminen todennäköisyysperusteisen riskianalyysin avulla*. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- (Andersson 1998) Andersson John. 1998. *Lämpöoppi*. Espoo. 109 s. ISBN 952-90-6368-7
- (Areva 2019) *System Description Emergency Diesel Generator System EDG*. 2019. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Areva 2019b) *System Description SBO Diesel Generator System*. 2019. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Areva 2013) *SBO Diesel Generator Sets Water Air Cooler Manufacturing Drawing & Name Plate*. 2013. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Areva 2012) *Emergency Diesel Generators Sets Air Cooler – Equipment Visual Examination Procedure*. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Areva 2011) *Emergency Diesel Generator Sets Air Cooler / Radiators Manufacturing Drawing*. 2011. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Areva 2010a) *Emergency Diesel Generators Sets Air Cooler Calculation Note*. 2010. TVO konsernin sisäinen dokumentti.
- (Backman 2019) Backman Jari. *Energiatekniikan Laboratoriotyöt, Massavirtaus*. 2019. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikka.
- (Cabezas et al. 2015) Cabezas-Comez L, Navarro H, Saiz-Jabardo J. 2015. *Thermal Performance Modeling of Cross-Flow Heat Exchangers*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-09671-1
- (Detlev et al. 2004) Detlev G, Kröger. 2004. *Air-cooled heat exchangers and cooling towers*. USA. 559 s. ISBN 0-87814-896-5

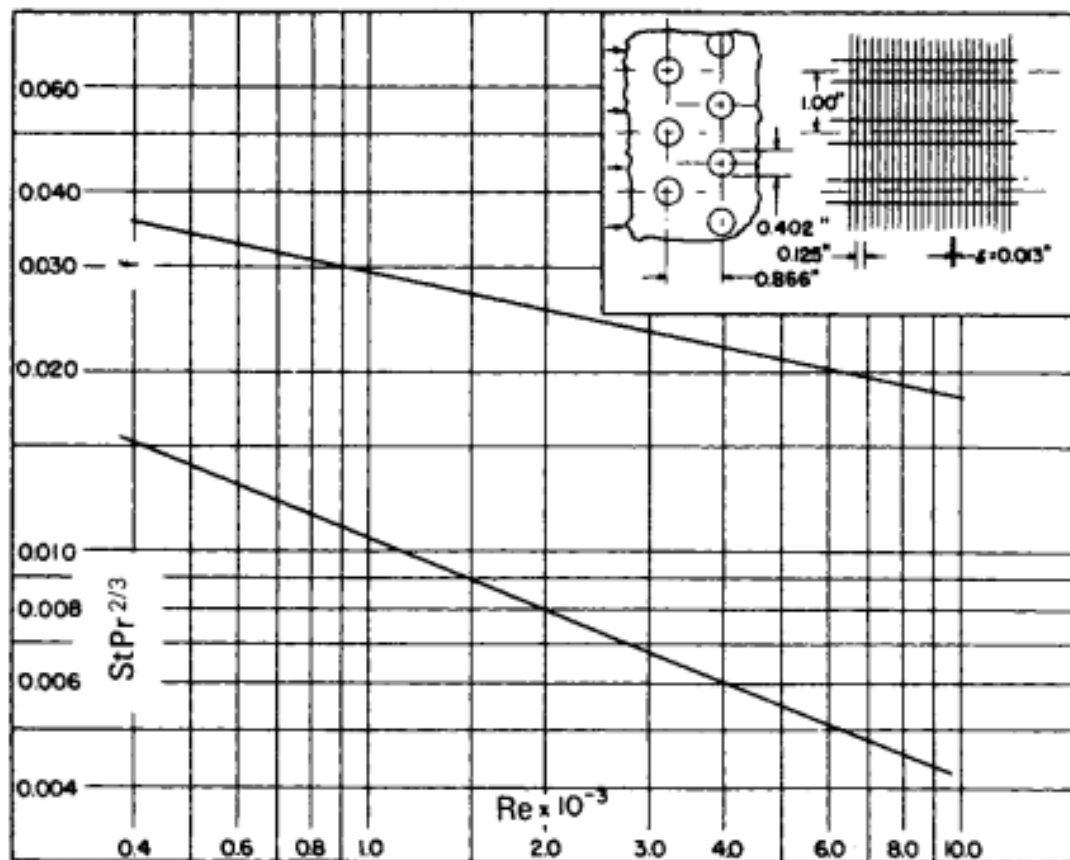
- (Fagerholm 1986) Nils-Erik Fagerholm. 1986. Termodynamiikka. Helsinki: Otatieto. 382 s. ISBN 951-671-327-0.
- (Hemilä et al. 1991) Simo Hemilä, Juha Utriainen. 1991. *Lämpöoppi*. 2. painos. 194 s. Jyväskylä. ISBN 951-96117-4-6.
- (Hiltunen et al. 2011) Hiltunen E, Linko L, Hemminki S, Hägg M, Järvenpää E, Saari-
nen P, Simonen S, Kärhä P. 2011. *Laadukkaan mittaamisen pe-
rusteet*. Espoo. 134 s. ISBN 978-952-5610-76-5.
- (Holman 2010) Holman, J. P. 2010. *Heat Transfer*. 10. painos. USA. 758 s. ISBN
978-0-070352936-3.
- (Hyppänen 2019) Hyppänen Timo. 2019. *Lämmönsiirron perusteet*. Luentomo-
niste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikka.
- (Lampinen. J) Markku J. Lampinen. *Thermodynamics of humid air*. Luen-
tomoniste. Aalto-yliopisto.
- (LUT 2018) *Fundamentals of Energy Technology*. 2018. Luentomoniste.
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikka.
- (Kays at al. 2018) Kays W. M., London A. L. 2018 *Compact Heat Exchangers*. 3.
painos. USA. 335 s. ISBN 978-93-87938-03-8
- (Sandberg 2004) Jorma Sandberg. 2004. *Ydinturvallisuus*. Hämeenlinna. ISBN
951-712-507-0.
- (Theodore et al. 2018) Theodore L. Bergman, Andrienne S. Lavine. *Fundamentals of
Heat and Mass Transfer*. 8. painos. USA. 854 s. ISBN 978-1-
119-32042-5.
- (Thulukkanam 2013) Thulukkanam Kuppan. 2013. *Heat Exchanger Design Hand-
book*. 2. painos. USA. ISBN 978-1-4398-4213-3
- (TVO 2020a) Teollisuuden Voima Oy. 2012. *TVO-konsernipresentaatio*. Yh-
tiön sisäinen Powerpoint esitys.
- (TVO 2020c) Teollisuuden Voima Oy. 2020. *Aineistoa tekniikasta ja turvalli-
suudesta*. Yhtiön sisäinen Powerpoint esitys.
- (TVO 2012b) Teollisuuden Voima Oy. 2012. *Ydinsähköä Olkiluodosta*. Verk-
kodokumentti. Saatavissa: [https://www.tvo.fi/ajankohtaista/jul-
kaisut.html](https://www.tvo.fi/ajankohtaista/julkaisut.html)

- (TVO 2010) Teollisuuden Voima Oy. 2010. *Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3*. Verkkodokumentti. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/ajankoh- taista/julkaisut.html>
- (Yunus et al. 2015) Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. 2015. *Heat and Mass Trans- fer*. 5. painos. USA. 1208 s. ISBN 978-0-07-339818-1.
- (YVL A.2) Ydinturvallisuusohje A.2. *Ydinlaitoksen sijaintipaikka*. 2019. *Saatavilla sähköisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisohjeet/ydinturvallisuusohjeet>
- (YVL A.6) Ydinturvallisuusohje A.6. *Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminta*. 2019. *Saatavilla sähköisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisohjeet/ydintur- vallisuusohjeet>
- (YVL A.7) Ydinturvallisuusohje A.7. *Ydinvoimalaitoksen todennäköisyys- perusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta*. 2019. *Saatavilla säh- köisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viran- omaisohjeet/ydinturvallisuusohjeet>
- (YVL B.1) Ydinturvallisuusohje B.1. *Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuun- nittelu*. 2019. *Saatavilla sähköisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisohjeet/ydintur- vallisuusohjeet>
- (YVL B.2) Ydinturvallisuusohje B.2. *Ydinlaitoksen järjestelmien, rakentei- den ja laitteiden luokittelu*. 2019. *Saatavilla sähköisesti osoit- teessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisoh- jeet/ydinturvallisuusohjeet>
- (YVL B.7) Ydinturvallisuusohje B.7. *Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uh- kiin ydinlaitoksessa*. 2019. *Saatavilla sähköisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisohjeet/ydintur- vallisuusohjeet>
- (YVL E.10) Ydinturvallisuusohje E.10. *Ydinlaitoksen varavoimalähteet*. 2020. *Saatavilla sähköisesti osoitteessa*: <https://www.stuk.fi/saannosto/stukin-viranomaisohjeet/ydintur- vallisuusohjeet>

(Weckström 2005)

Weckström Thua. 2005. *Lämpötilan mittaus*. 2. painos. Helsinki.
135 s. ISBN 952-5209-96-2.

Liite 1. Kays ja Londonin kuvaajat jatkuvaripaisesta lämmönvaihtimesta (Kays et al. 2018).



Tube outside diameter = 0.402 in = 10.2×10^{-3} m

Fin pitch = 8.0 per in = 315 per m

Flow passage hydraulic diameter, $4r_h = 0.01192$ ft = 3.632×10^{-3} m

Fin thickness = 0.013 in = 0.33×10^{-3} m

Free-flow area/frontal area, $\sigma = 0.534$

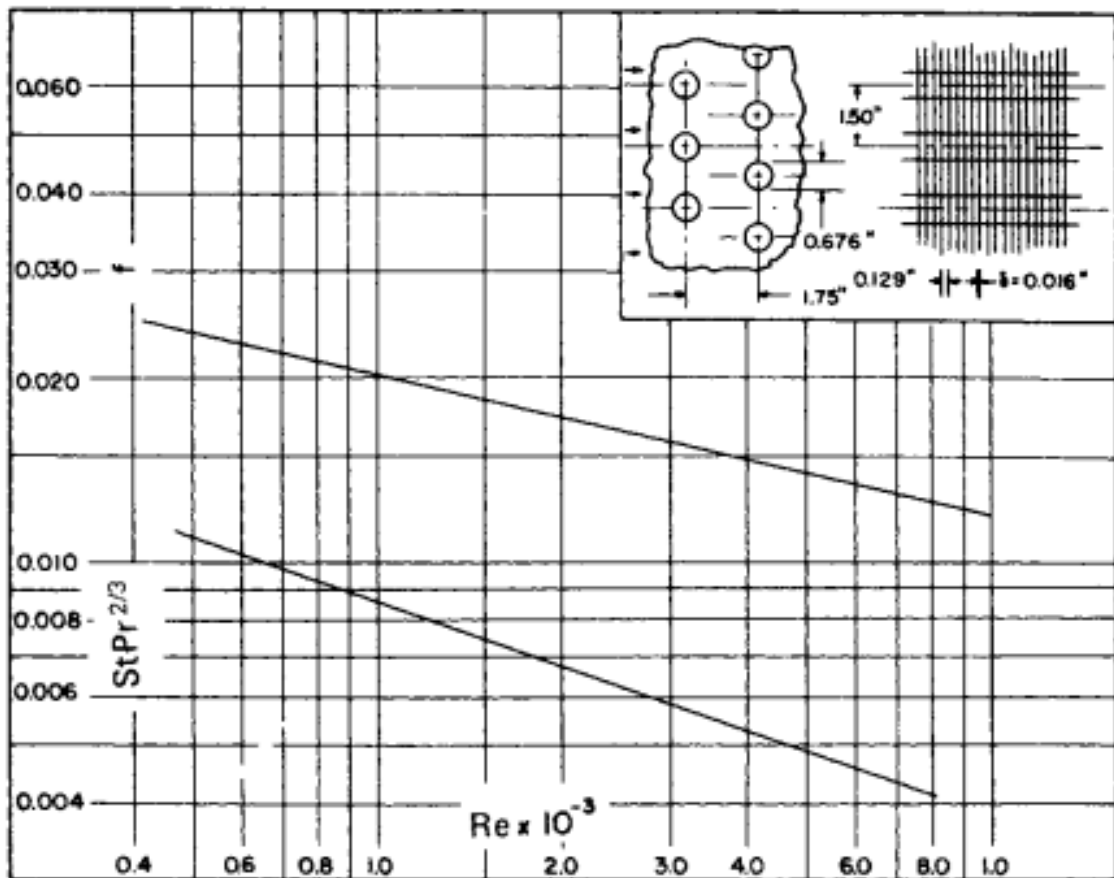
Heat transfer area/total volume, $\alpha = 179$ ft²/ft³ = 587 m²/m³

Fin area/total area = 0.913

Note: Minimum free-flow area in spaces transverse to flow.

(Jatkuu)

Liite 1: Jatkoa



Tube outside diameter = 0.676 in = 17.17×10^{-3} m

Fin pitch = 7.75 per in = 305 per m

Flow passage hydraulic diameter, $4r_h = 0.0114$ ft = 3.48×10^{-3} m

Fin-flow area/frontal area, $\sigma = 0.481$

Heat transfer area/total volume, $\alpha = 169$ ft²/ft³ = 554 m²/m³

Fin area/total area = 0.950

Note: Minimum free-flow area in spaces transverse to flow.