

Anniina Pitkänen

LOVIISAN VOIMALAITOKSEN KOESTETTAVIEN LÄMMÖN- VAIHTIMIEN LÄMMÖNSIIRTO- KAPASITEETIN LASKENTA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Anniina Pitkänen
Työn nimi	Loviisan voimalaitoksen koestettavien lämmönvaihtimien lämmönsiirtokapasiteetin laskenta
Toimeksiantaja	Fortum Power & Heat Oy, Loviisan voimalaitos
Vuosi	2024
Sivut	62 sivua, liitteitä 14 sivua
Työn ohjaaja(t)	Hannu Sarvelainen, XAMK Tapio Riihelä, Fortum Power & Heat Oy

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli luoda Excel-taulukkolaskentaohjelmalla toteutettu laskentatyökalu Fortumin Loviisan voimalaitoksella tehtävien lämmönvaihtimien toiminnan varmistamiseen tarkoitettujen kokeiden eli koestusten apuvälineeksi. Työn tarkoituksena oli korvata tällä hetkellä käytössä oleva Visual Basic 6.0 -ohjelmointikielellä toteutettu kunnonvalvontaohjelma, jonka haasteiksi on osoittautunut muun muassa sen tarkastettavuuteen ja päivitettävyyteen liittyvät ongelmat sekä hankala käytettävyys.

Tavoitteena lämmönvaihtimiin liittyvissä koestuksissa on varmistaa lämmönvaihtimien toiminta myös onnettomuustilanteissa. Koestustilanteita harvoin pystytään toteuttamaan onnettomuustilanteen mukaisilla parametreilla, minkä vuoksi lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky onnettomuustilanteessa tulee ekstrapoloida laskennallisesti.

Työ toteutettiin perehtymällä alan kirjallisuuteen sekä lämmönsiirtoon liittyviin laskentamenetelmiin ja soveltamalla näitä työssä käytetyssä laskennassa. Laskentatyökalu toteutettiin Excel-ohjelmaa käyttäen, mikä itsessään tekee laskennan luettavuudesta nykyistä helpompaa. Lisäksi luettavuutta parannettiin esimerkiksi laskennan dokumentoimisella sekä erilaisilla toiminnoilla, kuten laskentasolujen ja solualueiden nimeämisellä sekä lisäämällä laskennassa hyödynnetyt yhtälöt laskentavälilehdelle, kaavarivin solulinkitysten lukemisen helpottamiseksi. Käytettävyyttä helpotettiin hyödyntämällä VBA-ohjelmointikieltä, jolla mahdollistettiin myös kahden laitoksen usean eri lämmönvaihtimen laskenta yhtä laskentavälilehteä käyttäen.

Työssä onnistuttiin luomaan työn tilaajan tarpeisiin sopiva, käyttäjäystävällinen laskentatyökalu, jonka laskentaa on nykyistä laskentaohjelmaa helpompi tarkastaa ja todentaa sekä mahdollisten laitosmuutosten myötä päivittää. Työssä tärkeänä osana oli laskennan dokumentointi sekä alan kirjallisuudesta löytyvien laskentamenetelmien käyttö.

Asiasanat: johtuminen, konvektio, lämmönsiirto, U-arvo, ydinvoimalaitos

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Anniina Pitkänen
Thesis title	Calculation for Performance Testing of Heat Exchangers in Loviisa Nuclear Power Plant
Commissioned by	Fortum Power & Heat Oy, Loviisa Nuclear Power Plant
Time	2024
Pages	62 pages, 14 pages of appendices
Supervisor	Hannu Sarvelainen, XAMK Tapio Riihelä, Fortum Power & Heat Oy

ABSTRACT

The objective of this thesis was to create a calculation tool for performance testings of heat exchangers at the Loviisa Nuclear Power Plant utilizing Microsoft Excel Spreadsheet Software. The purpose of this thesis was to solve problems related to the current calculation software in particular to rectify deficiencies related to updateability, auditability and usage.

Performance testings are conducted to determine whether a system consistently meets specified acceptance criteria. Typically, the temperature conditions of an accident cannot be reached during the performance testing. Consequently, the heat transfer capacity needs to be calculated.

The thesis was executed out in three stages. The first stage was a literature review on heat transfer and heat transfer calculation methods, forming the theoretical framework. The second stage involved the application of the reviewed calculation methods for extrapolating the heat transfer capacity in accident conditions. The final stage of the work focused on the development of the calculation tool.

The thesis produced a user-friendly calculation tool that was suitable for the commissioner's needs and solved the issues related to updateability, auditability and usability. The calculation phases and user manual have been documented to support the use, inspection and update of the calculation tool.

Keywords: conduction, convection, heat transfer, nuclear power plant, U-value

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	LOVIISAN VOIMALAITOS	7
2.1	Ydinvoimalan koestusten säädösperusta	8
2.2	Koestettavat lämmönvaihtimet Loviisan voimalaitoksella	9
2.2.1	Putkilämmönvaihtimet	12
2.2.2	Levyllämmönvaihtimet.....	14
3	LÄMMÖN SIIRTYMINEN	15
3.1	Johtuminen.....	15
3.2	Konvektio	19
3.2.1	Dimensiottomat luvut.....	22
3.2.2	Korrelaatiokaavat	23
3.3	Terminen resistanssi	26
3.3.1	Johtumisesta ja konvektiosta aiheutuva termien resistanssi	27
3.3.2	U-arvon määrittäminen termisten resistanssien avulla	29
3.4	Logaritminen lämpötilaero	31
4	LASKENTATYÖKALU.....	33
4.1	Sovitepolynomit.....	33
4.2	Lähtötietoja.....	36
4.3	Koestustietojen syöttö	38
4.4	Tulosarkisto.....	40
5	LASKENTATYÖKALUN LASKENTAOSUUS.....	41
5.1	Mittausvirheen huomiointi.....	42
5.2	Laskentavaihe 1: U-arvon määrittäminen koestustilanteessa.....	46
5.3	Laskentavaihe 2: U-arvon ekstrapolointi onnettomuustilanteeseen ..	48
5.3.1	Korjauskertoimen määrittäminen	49
5.3.2	U-arvon ekstrapolointi korjauskertoimien avulla	51

5.4	Laskentavaihe 3: Meriveden maksimilämpötilan määrittäminen.....	54
6	YHTEENVETO TYÖN TULOKSISTA.....	57
6.1	Laskentatyökalun jatkokehitys.....	57
6.2	Työn arviointi.....	58
	LÄHTEET	60
	LIITTEET	

Liite 1. Käyttöohje: Laskentatyökalun käyttäjälle

Liite 2. Käyttöohje: Laskentatyökalun tarkastajalle/päivittäjälle

Liite 3. Laskentatyökalun Laskenta-välilehti

Liite 4. Esimerkki Laskenta-välilehden yhtälösarakkeesta (B) sekä solujen nimeämisestä

1 JOHDANTO

Lämmönsiirto on tärkeä osa teollisia prosesseja. Prosessin toiminnan varmistamiseksi prosessissa virtaavaa väliainetta lämmitetään tai jäähdytetään haluttuun lämpötilaan. Lämmönsiirto toteutetaan lämmönvaihtimilla, joilla siirretään lämpöenergiaa kuumasta fluidista kylmempään fluidiin. Lämmönvaihtimilla on keskeinen tehtävä ydinvoimalaitoksen toiminnassa ja turvallisuudessa. Ydinvoimalaitoksen käytön aikana ydinpolttoaineeseen kertyy radioaktiivisia fissionituotteita, joiden hajotessa vapautuu energiaa, jota kutsutaan jälkilämmöksi. Polttoaineen tuottama jälkilämpö tulee kaikissa tilanteissa kyetä poistamaan reaktorista polttoaineen eheyden säilyttämiseksi. Jälkilämpö reaktorista ja primääripiiristä voidaan poistaa useilla eri järjestelmillä riippuen, onko kyseessä esimerkiksi tehokäytön aikainen lämmönsiirto, voimalaitoksen huoltoseisokin aikainen alasajoon liittyvä pysäytys vai häiriö- ja onnettomuustilanteeseen, kuten jäähdytteenmenetykseen liittyvä tilanne. (Sandberg 2004, 58–60.)

Ydinvoimalaitoksissa järjestelmien tai niiden osien toimintakuntoisuuden varmistamiseksi suoritetaan koestuksia. Koestuksia toteutetaan joko määräajoin tai esimerkiksi tiettyjen prosessiparametrien ylittyessä. Lämmönvaihtimiin liittyvissä koestuksissa tavoitteena on varmistaa turvallisuuden kannalta tärkeiden lämmönvaihtimien toiminta myös vakavimmissa suunnitteluperusteisissa onnettomuustilanteissa. Näiden lämmönvaihtimien koestuksissa käytetään apuvälineenä laskentaohjelmaa. Laskentaohjelmalla ekstrapoloidaan koestustilanteissa mitatut ja niiden perusteella lasketut arvot vastaamaan onnettomuustilannetta, sillä koestuksia harvoin pystytään toteuttamaan onnettomuustilanteen mukaisilla arvoilla.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin kehittämistehtävänä Fortum Power & Heat Oy:lle, Loviisan voimalaitokselle. Työssä tarkoituksena oli kehittää käytössä olevan, Microsoftin Visual Basic 6.0 -ohjelmointikielellä toteutetun, lämmönvaihtimien kunnonvalvontaohjelman (LVKUNVAL) tilalle uusi Excel-pohjainen laskentatyökalu. Nykyiseen LVKUNVAL-laskentaohjelmaan liittyvä puutteellinen dokumentointi sekä ohjelman laskennassa käyttämät useat aliohjelmat ovat hankaloittaneet laskennassa esiintyvien lukuarvojen alkuperän sekä las-

kentavaiheiden tarkastamista. Kunnonvalvontaohjelman laskennassa on havaittu virheitä, joiden päivittäminen on nykyisillä käyttöjärjestelmillä hankalaa. Lisäksi kunnonvalvontaohjelmassa haastavaksi käytettävyyden kannalta on koettu se, että tulosten saamiseksi laskentaohjelman käyttäjän tulee avata useampi välilehti ja käsitellä koestuksen tekijän kannalta epäolennaisia tietoja.

Raportin luvuissa 2 ja 3 keskitytään työhön liittyvään teoriaan ja luvut 4 ja 5 keskittyvät opinnäytetyön työosuuteen. Luvussa 2 esitellään työn toimeksiantaja, ydinvoimalaitoksissa tehtävien koestusten säädösperustaan liittyvää tietoa sekä esitellään Loviisan ydinvoimalaitoksessa koestettaviin lämmönvaihtimiin liittyvät järjestelmät ja yleisesti teoriaa lämmönvaihdintyyppeihin liittyen. Luku 3 keskittyy lämmönsiirtymiseen liittyvään teoriaan. Luvussa 4 käsitellään laskentatyökalun välilehdet sekä niiden sisältö, pois lukien laskentaosuus, joka on esitelty luvussa 5. Liitteissä 1 ja 2 esitetään ohjeistukset laskentatyökalun käyttäjälle sekä sen tarkastajalle ja päivittäjälle. Liitteessä 3 on puolestaan esitetty laskentatyökalun Laskenta-välilehti, jossa esiintyvät arvot on laskettu kuvitteellisilla lähtöarvoilla. Liitteessä 4 on esimerkki Laskenta-välilehden B-sarakkeeseen lisätyistä yhtälöistä sekä kaavarivillä näkyvästä solujen nimeämisestä.

2 LOVIISAN VOIMALAITOS

Fortum Power & Heat Oy on Fortum Oyj:n omistama, sähköä ja lämpöä tuottava tytäryhtiö. Fortum Oyj on energiakonserni, joka toimii pääasiassa vesi- ja ydinvoiman tuotannon parissa. Lisäksi Fortum Oyj omistaa tuuli- ja aurinkovoimaloita sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksia. (Fortum 2024a.) Yhtiön toiminta perustuu kolmeen strategiseen prioriteettiin: puhtaan energian luotettavaan tuottamiseen ja toimittamiseen, teollisuuden dekarbonisaation edistämiseen sekä toimintamallien ja työskentelytapojen uudistamiseen sekä kehittämiseen (Fortum 2024c).

Fortumin Loviisan ydinvoimalaitoksella on kaksi voimalaitosyksikköä, Loviisa 1 ja Loviisa 2, joista ensimmäinen otettiin käyttöön vuonna 1977 ja toinen vuonna 1980 (Fortum 2024d). Voimalaitoksen reaktorit ovat neuvostoliittolais-

valmisteisia VVER-tyyppisiä painevesireaktoreita, joissa jäähdytys- ja hidastinaineena käytettävän veden paine pidetään niin korkeana, ettei se kiehu (Fortum Power & Heat 2021). Yhden reaktorin nimellislämpöteho on 1 500 MW ja nettosähköteho 507 MW. Loviisan voimalaitoksella tuotettu sähkö kattaa noin 10 % koko Suomen sähköntuotannosta. (Fortum 2024d.)

Sähköntuotanto Loviisan ydinvoimalaitoksella perustuu siihen, että reaktorisydän lämmittää hallitun fission ja siitä syntyvän lämmön avulla primääripiirin jäähdytteen noin 300 °C:n lämpötilaan. Kuumentunut primääripiirin vesi kulkee höyrystimissä olevien lämmönsiirtoputkien läpi ja siirtyy jäähtyneenä pääkiertopumppujen kautta takaisin reaktoriin. Höyrystimen lämmönsiirtoputkien kautta lämpöä siirtyy primääripiirin vedestä sekundääripiiriin, höyrystäen sekundääripiirissä kulkevan matalapaineisen syöttöveden. Sekundääripiirissä syntynyt höyry johdetaan turbiinille, jossa se pyörittää samalle akselille kytkettyä generaattoria, tuottaen sähköä valtakunnan verkkoon. (Fortum Power & Heat 2021.)

Vuonna 2023 Valtioneuvosto myönsi Fortumille käyttöluvan jatkaa energiantuotantoa Loviisan voimalaitoksissa vuoteen 2050 asti (STUK 2023). Uusi käyttöluva mahdollistaa 170 TWh päästöttömän sähkön tuotannon molemmille laitoksiköille (Fortum 2024b).

2.1 Ydinvoimalan koestusten säädösperusta

Suomessa säteily- ja ydinturvallisuutta valvoo säteilyviranomaisen, Säteilyturvakeskus STUK. Ydinenergiain mukaan Säteilyturvakeskuksen tulee asettaa ydinenergian käyttöön turvallisuusvaatimuksia, joilla voidaan toteuttaa ydinenergiain mukainen turvallisuustaso. Nämä vaatimukset on esitetty ydinturvallisuus- eli YVL-ohjeissa, jotka sisältävät ohjeistuksia muun muassa ydinvoimalaitoksen turvallisuuden hallintaan, ydinvoimalaitosten ja sen järjestelmien suunnitteluun, säteilyturvallisuuteen, ydinjätteiden käsittelyyn sekä ydinvoimalaitoksen rakenteisiin ja laitteisiin liittyen. (STUK s.a.)

Ydinvoimalaitosten käyttötoimintaa ohjeistava YVL-ohje A.6 asettaa vaatimuksia ydinvoimalaitoksen turvalliselle käyttötoiminnalle sekä siihen liittyville menettelytavoille. Ohje asettaa vaatimuksia muun muassa turvallisuusteknisiin käyttöehtoihin (TTKE) liittyen. TTKE on laitousyksikkökohtainen jokaiset käyttötilat kattava asiakirja, jolla varmistetaan, että ydinvoimalaitosta käytetään suunnitteluperusteiden mukaisesti. (Stuklex 2019.) Ydinvoimalaitos suunnittelee niin, että se täyttää lakien, asetusten sekä viranomaisohjeiden mukaiset suunnitteluperusteet, joiden pohjalta on analyysijä tekemällä johdettu laitoksen turvalliset käyttötilat määrittävät käyttörajoitukset sekä -ehdot. TTKE:ssa esitetään käyttörajoitusten lisäksi käyttötilakohtaisesti järjestelmät tai niiden osat sekä niihin liittyvät turvallisuusrajat, suojausjärjestelmien asetusarvot sekä toimintakuntoa, huoltoa, määräaikaista koestuksia ja tarkastuksia koskevat vaatimukset. (Fortum Power & Heat Oy 2023a.) TTKE:n mukainen tila on edellytys laitoksen tehokäytölle (Stuklex 2019). Laitoksen ollessa TTKE:n mukaisessa tilassa myös turvajärjestelmien osalta, ovat määritellyt turvallisuusanalyysit voimassa ja laitoksella on edellytykset selvittää onnettomuustilanteista.

2.2 Koestettavat lämmönvaihtimet Loviisan voimalaitoksella

Ydinvoimalan turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa on esitetty vaatimukset järjestelmien käyttökuntoisuudelle sekä parametreille. Tehokäytön aikana käytössä olevien laitteiden viat sekä toimintakuntoisuuden puutteet voidaan havaita ilman erillisiä tarkastuksia, kun taas varalla olevien turvajärjestelmien laitteiden toimintakuntoisuuden sekä parametrien arvojen hyväksyttävyyden todentamiseksi tulee suorittaa määräaikaista tarkastuksia ja koestuksia. (Fortum Power & Heat Oy 2024.)

Tässä työssä tarkastellaan turvallisuuden kannalta tärkeitä lämmönvaihtimia, joissa prosessivettä jäähdytetään siirtämällä lämpöenergiaa joko suoraan tai välijäähdytyspiirin kautta mereen. Meriveden saannin ollessa poikkeustilanteessa estynyt, voidaan lämpöä osassa järjestelmistä siirtää varatoimenpiteenä ilmajäähdytystornien kautta ilmakehään. Tässä työssä tarkastelu on rajattu tilanteisiin, joissa lämpönieluna toimii merivesi.

Turvallisuuteen vaikuttavat järjestelmät ovat Loviisan voimalaitoksella pääasiassa kaksiredundanttisia eli toimivat rinnakkain toisistaan riippumatta. Tavoitteena on varmistaa, että järjestelmä pystyy toteuttamaan vaaditun turvallisuustehtävän myös tilanteessa, jossa yksittäisiä laitteita vikaantuu. (Fortum Power & Heat Oy 2023a.)

Kaikki tässä työssä tarkasteltavat lämmönvaihtimet ovat putki- tai levylämmönvaihtimia, jotka toimivat vastavirtaperiaatteella. Putki- ja levylämmönvaihtimien yleiset toimintaperiaatteet esitellään luvuissa [2.2.1](#) ja [2.2.2](#). Vastavirtalämmönvaihtimessa kylmä ja kuuma fluidi virtaavat toisiinsa nähden vastakkain suuntiin lämmönvaihtimessa. Tämä virtausperiaate mahdollistaa sen, että teoriassa kylmän puolen ulosvirtauksen lämpötila voi saavuttaa kuuman puolen ulosvirtauksen lämpötilan. (Incropera ym. 2007, 679.) Turbulenttisessa virtauksessa virtauksen liike on epäsäännöllistä ja sen suunta vaihtelee, kun taas laminaarinen virtaus etenee virtaviivaisesti (Incropera ym. 2007, 359). Lämmönvaihtimiin liittyviä tietoja on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Koestettaviin lämmönvaihtimiin liittyviä tietoja

Järjestelmätunnus	Järjestelmän kuvaus	Jäähdyttävä piiri	Koestusväli	Lämmönvaihtintyyppi
TF10	Puhdas välijäähdytyspiiri	VF	6 kk sekä meriveden lämpötilan noustua TTKE-rajan yli (häätämmönsiirtoketju)	LO1: Levy LO2: Putki
TH	Matalapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä	TF10	1 vuosi	LO1 & LO2: Putki
TQ	Matalapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä	TF10	1 vuosi	LO1 & LO2: Putki
VARARR	Primääripiirin seisontajäähdytysjärjestelmä	VF	2 vuotta	LO1 & LO2: Levy
TG	Polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmä	TF10	4 vuotta	LO1 & LO2: Putki
XU	Terässuojarakennuksen ulkopuolinen ruisutusjärjestelmä	VU	2 vuotta	LO1 & LO2: Levy

Taulukossa 1 yllä esitetty TF10 eli *puhdas välijäähdytyspiiri* toimii jäähdytteenmenetystilanteissa osana hätälämmönsiirtoketjua, siirtäen TH- ja TQ-

järjestelmistä reaktorin jälkilämpöä edelleen sivumerivesipiirin kautta meriveteen. Puhtaan välijäähdytyspiirin lämmönvaihtimet toimivat lisäksi tehokäytön aikana usean eri primääripuolen järjestelmien jäähdyttävänä piirinä (Fortum Power & Heat Oy 2019). Lämmönsiirron ketjutuksella sekä järjestelmän painetasoilla varmistetaan se, ettei primääripiirin vettä päädy esimerkiksi lämmönvaihtimen putkivuotojen myötä meriveteen (Fortum Power & Heat Oy 2023c).

Taulukon 1 toisella rivillä olevan TH-järjestelmän eli *matalapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän* tehtävänä on esimerkiksi putki- tai laitevaurioista aiheutuissa suurissa jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa poistaa polttoaineen kehittämää jälkilämpöä sekä peittää reaktorisydän vedellä, estäen polttoainesauvojen suojakuorten lämpenemisen yli sallitun arvon. Reaktorin hätäjähdytysjärjestelmän pääkomponentteja ovat typpipaineistetut painehätälisävesisäiliöt eli TH-akut, matalapainepumput, lämmönsiirtimet, hätä- ja varahätälisävesisäiliö sekä suojarakennuksen lattiakaivot eli sumpit. Onnettomuustilanteessa jäähdytysvesi purkautuu primääripiirin painetason mukaan TH-akuista reaktorin ylä- ja alaosaan. Primääripiirin paineen laskiessa jäähdytettä pumpataan hätälisävesisäiliöstä reaktoriin. Hätälisävesisäiliön pinnan alittaessa tietyn rajan, TH-pumppujen pumppujen imu siirtyy suojarakennuksen lattiakaivoihin eli sumppeihin. Niistä vesi siirtyy TH-lämmönvaihtimelle, joilla siirretään lämpöä puhtaan välijäähdytyspiiriin kautta sivumerivesipiiriin ja edelleen mereen. (Fortum Power & Heat Oy 2021.) TQ-järjestelmän eli *suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän* tarkoituksena on onnettomuustilanteessa lauhduttaa suojarakennuksen yläosaan vapautunutta höyryä ja siirtää ruiskutus- ja vuotoveteen sitoutunut lämpöenergia TQ-lämmönvaihtimen kautta välijäähdytyspiiriin (Fortum Power & Heat Oy 2023d). Tietyissä onnettomuustilanteissa hätäjähdytysjärjestelmän (TH) pumppujen sumpeista imemä vesi jäähdytetään suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän (TQ) lämmönvaihtimilla, jolloin vesi kiertää suojarakennuksen ilmatilan ja lattiakaivojen välistä suljettua kiertoa (Fortum Power & Heat Oy 2021).

RR-järjestelmä on *seisontajäähdytysjärjestelmä* tai *jälkilämmönpoistojärjestelmä*, joka ylläpitää alasajon aikaista jäähdytyskiertoa, siirtäen reaktorin jälkilämpöä höyrystimistä sivumerivesipiiriin VF kautta meriveteen (Fortum Power

& Heat Oy 2023b). Taulukon 1 neljännellä rivillä mainittu *primääripiirin jälkilämmönpoistojärjestelmän varajärjestelmää* eli vara-RR-järjestelmää hyödynnetään poistamaan lämpöä höyrystimistä tilanteessa, jossa RR-järjestelmä menetetään (Fortum Power & Heat Oy 2023c).

Taulukon 1 viidennellä rivillä kuvattua TG-järjestelmää *eli polttoaineen allasvesien jäähdytysjärjestelmää* käytetään käynnin sekä huoltoseisokissa toteutettavan vaihtolatauksen aikana poistamaan jälkilämpöä, jota muodostuu polttoainealtaissa varastoitavasta käytetystä polttoaineesta. Jäähdytys tapahtuu puhtaan välijäähdytyspiirin TF10 kautta. (Fortum Power & Heat Oy 2022.)

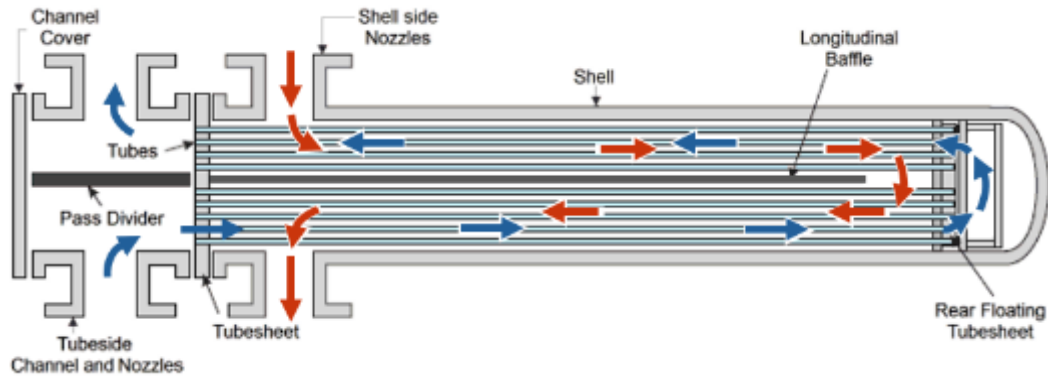
Taulukon 1 alimman rivin XU-järjestelmä on vakavassa reaktorionnettomuustilanteessa käytettävä, *teräksisen suojarakennuksen ulkopuolinen ruiskutusjärjestelmä*. XU-järjestelmällä estetään suojarakennuksen ylipaineistuminen tilanteessa, jossa lämmönsiirto suojarakennuksesta ei ole riittävää. Jäähdytys tapahtuu XU-järjestelmän omalla VU-jäähdytysjärjestelmällä, josta lämpö siirtyy meriveteen. (Fortum Power & Heat Oy 2023d.)

2.2.1 Putkilämmönvaihtimet

Putkilämmönvaihdin koostuu sylinterimäisestä kuoresta eli vaipasta, jonka sisällä kulkee lämmönsiirtoputkia. Prosessiaineista toinen kulkee lämmönsiirtoputkien sisäpuolella ja toinen vaipassa, putkien ulkopuolella. Virtaavien aineiden erilaiset ominaisuudet, kuten aineen puhtaus, viskositeetti, virtausnopeus sekä paine vaikuttavat siihen, määritetäänkö kuuma vai kylmä fluidi virtaamaan lämmönvaihtimen vaippa- vai putkipuolella. Usein esimerkiksi enemmän epäpuhtauksia sisältävä fluidi määritetään kulkemaan putkipuolella, sillä putket on helpompi puhdistaa niihin kerääntyneestä liasta. Likaantuminen vaikuttaa heikentävästi lämmönvaihtimen lämmönsiirtokykyyn. (IQS Directory s.a.)

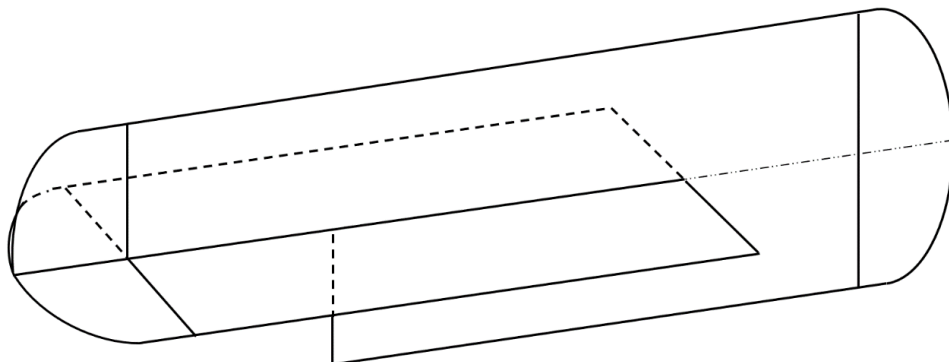
Putkilämmönvaihtimia voidaan jaotella rakenteellisten ominaisuuksien mukaan. Määrittelyyn vaikuttavat muun muassa lämmönvaihtimen päiden ja putkiryhmän tyypit sekä vaippapuolen virtaukseen liittyvät tekijät. Virtaus voi kulkea lämmönvaihtimen läpi joko kerran tai useamman kerran ja se voi esimer-

kiksi jakaantua vaipan läpi kulkiessaan. (IQS Directory s.a.) Kuvassa 1 on esitetty putki- ja vaippapuoleltaan kaksivaiheisen vastavirtalämmönvaihtimen virtausperiaate. Siniset nuolet kuvaavat putkipuolella kulkevan fluidin virtausta ja punaiset nuolet puolestaan vaippapuolen virtausta.



Kuva 1. Vastavirtaputkilämmönvaihtimen toimintaperiaate (muokattu Werner Sölken 2024)

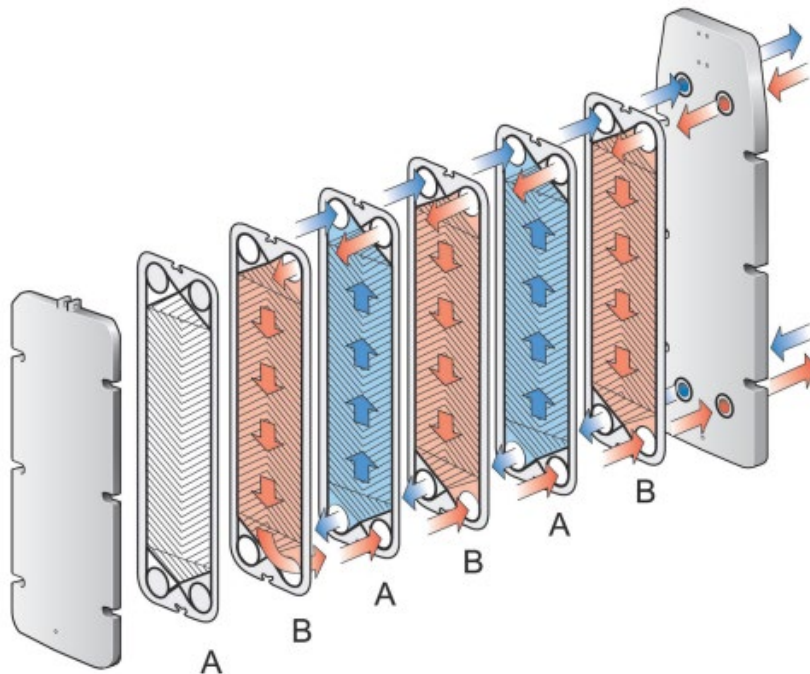
Putkilämmönvaihtimissa käytetään usein vaippapuolen virtaussuuntaan nähden poikittaisia ohjauslevyjä, jotka lisäävät turbulenssia vaippapuolen virtaukseen, ja muodostavat ristivirtausta virtaavien prosessiaineiden välille nostoen lämmönsiirtokerrointa. Lisäksi ohjauslevyt tukevat lämmönvaihtimien sisäisiä putkia ja estävät tärinävaurioita sekä putkien painumista. (IQS Directory s.a.) Tässä työssä tarkasteltavissa putkilämmönvaihtimissa ei ole poikittaisia ohjauslevyjä, jolloin lämmönvaihtimessa ei aiheudu merkittävää ristivirtausta, vaan virtaukset kulkevat toisiinsa nähden vastavirtaan. Työssä tarkasteltaviin putkilämmönvaihtimiin liittyvien kokoonpanopiirustusten mukaan pitkittäiset ohjauslevyt jakavat putkilämmönvaihtimissa virtauksen neljään lohkokoon kuvan 2 mukaisesti, jolloin vaippa- ja putkipuolen virtaukset kulkevat neljä kertaa lämmönvaihtimien läpi, toisiaan vastaan.



Kuva 2. Periaatepiirustus putkilämmönvaihtimen neljästä virtauslohkosta

2.2.2 Levylämmönvaihtimet

Levylämmönvaihdin koostuu runko- ja painelevystä, joiden väliin asetetaan ohuista metallisista kanavalevyistä koostuva levypakka. Kylmä ja kuuma virta kulkevat vuorotellen levyjen väliin muodostuvia kanavia pitkin ja lämpö siirtyy väliaineesta toiseen levyjen välityksellä. Tässä työssä tarkasteltavat levylämmönvaihtimet ovat tiivisteellisiä, jolloin kylmän ja kuumen puolen kanavat erottavat toisistaan levyparin väliin jäävä tiiviste. (Alfa Laval 2019.) Kuvassa 3 on esitetty tiivistetyn vastavirtalevylämmönvaihtimen periaate. Periaatekuvassa punaiset nuolet kuvaavat kuumen puolen virtausta ja siniset nuolet kylmän puolen virtausta.



Kuva 3. Tiivistetyn levylämmönvaihtimen toimintaperiaate (Alfa Laval 2019)

Levylämmönvaihtimen etuna on lämmönsiirtokapasiteetin muutettavuus levyjen määrää säätelemällä. Levyt ovat usein aaltomaisesti kuvioitu, mikä kasvattaa lämmönsiirtopinta-alaa sekä lisää turbulenssia virtaukseen. Virtauksen pyörteisyys vähentää levylämmönvaihtimen likaantumista. Muotoilunsa ansiosta levylämmönvaihtimilla on verrattain suuri lämmönsiirtokerroin, mikä mahdollistaa esimerkiksi putkilämmönvaihtimiin verrattuna tehokkaamman lämmönsiirron huomattavasti pienemmällä lämmönsiirtopinta-alalla. Etuna levylämmönvaihtimilla on myös niiden helppo puhdistettavuus verrattuna putkilämmönvaihtimiin. (Alfa Laval 2004.) Loviisa 1 -laitosyksiköllä esimerkiksi puh-

taan välijäähdytyspiirin TF10-levylämmönvaihtimien puhdistus tapahtuu kemiallisesti, kun taas Loviisa 2 -laitosyksikön vastaavien putkilämmönvaihtimien pesu toteutetaan erottamalla putkipuoli vaipasta ja suorittamalla puhdistus mekaanisesti.

3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan lämpötilaeron vuoksi aineen sisällä tai useamman aineen välillä siirtyvää energiaa. Lämpöä voi siirtyä johtumalla, konvektion kautta tai säteilemällä. Johtumisella tarkoitetaan sitä, että lämpö siirtyy kiinteän kappaleen tai levossa olevan fluidin sisällä. Konvektiossa lämpö kuljettuu kiinteän aineen ja virtaavan fluidin välillä. (Incropera ym. 2007, 2.) Lämpösäteilyssä energiaa siirtyy kappaleen pinnalta elektromagneettisina aaltoina, jolloin erillistä väliainetta lämmön siirtymiseen ei tarvita (Incropera ym. 2007, 2).

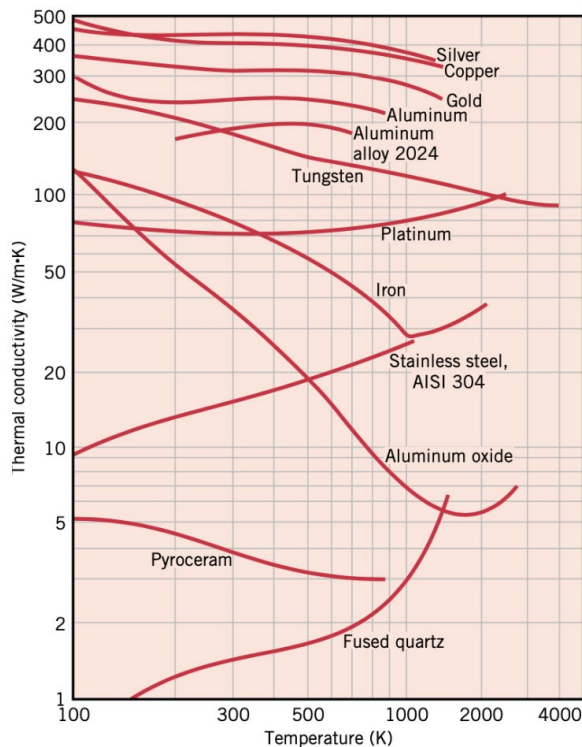
Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan lämmön siirtymistä ainoastaan konvektion ja johtumisen kautta. Säteilyn kautta tapahtuvan lämpövirran tiheys laskeaan kertomalla Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) pinnan lämpötilan neljännen potenssin sekä ympäristön lämpötilan neljännen potenssin erotuksen arvolla ja pinnan emissiiviteetillä, joka asettuu arvojen 0 ja 1 väliin (Incropera ym. 2007, 10). Stefan-Boltzmannin vakion ollessa suuruusluokaltaan hyvin pieni, tulee lämpötilaeron olla huomattavan suuri, jotta säteilystä aiheutuva lämmön siirtyminen olisi merkittävää. Kun tarkastellaan tilannetta, jossa lämpötilaero kuumen ja kylmän puolen välillä ei ole merkittävän suurta, voidaan lämpösäteilyn osuuden todeta olevan lämmön siirtymisessä lähes mitätön.

3.1 Johtuminen

Lämmön johtumisella tarkoitetaan lämpötilaeron aiheuttamaa energian liikkuamista väliaineessa. Lämmön johtumista voi tapahtua kiinteässä kappaleessa tai levossa olevan fluidin sisällä. Nesteissä ja kaasuissa johtuminen aiheutuu molekyylien tai atomien satunnaisesta liikkeestä. Kiinteässä aineessa liike tapahtuu aineen kidehilassa sekä vapaiden elektronien kulkeutumisen mukana. Molekyyli tiheys vaihtelee eri faasien välillä, mikä aiheuttaa sen, että nesteet

johtavat kaasuja paremmin lämpöä ja kiinteät aineet johtavat puolestaan nesteitä paremmin lämpöä. (Incropera ym. 2007, 3–4.)

Aineen olomuodon lisäksi myös materiaalilla on vaikutus lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuus tai lämmönjohtokyky (tunnus λ) on aineen fyysiseen rakenteeseen liittyvä materiaaliominaisuus. Lämmönjohtavuuden yksikkö on $W/(mK)$ tai $W/(m^{\circ}C)$. (Incropera ym. 2007, 60–62.) Metallien ja epämetallien lämmönjohtavuuksien lämpötilariippuvuuksia on esitetty kuvassa 4. Esimerkiksi ruostumattoman teräksen AISI 304 lämpötilariippuvuuden voidaan todeta käyttäytyvän erityisesti noin 300–1000 Kelvinin lämpötila-alueella lähes lineaarisesti.



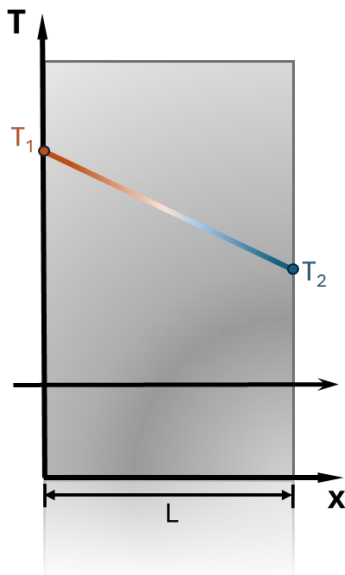
Kuva 4. Kiinteiden aineiden lämmönjohtavuuksia eri lämpötiloissa (Incropera ym. 2007, 62)

Johtumalla tapahtuvaan lämmönsiirtoon sovelletaan Fourierin lakia, joka määrittää lämpövuon suuruuden eli lämpövirran pinta-alayksikköä kohden. Lämpövuon suuruus riippuu lämpöjakaumasta väliaineen sisällä ja on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon kappaleessa. (Incropera ym. 2007, 3–4.)

Yksinkertainen esimerkki johtumisesta on lämmön johtuminen yksidimensionaalisesti yksikerroksisen tasoseinän läpi (yhtälö 1) tilanteessa, jossa prosessin käyttäytymistä määrittävät muuttujat, esimerkiksi lämpövirran tiheys ja lämpötila pysyvät ajallisesti muuttumattomina. Tällaisessa tilanteessa seinämän paksuuden oletetaan pysyvän joka kohdassa samana ja lämpötilajakauman pinnan läpi muuttuvan lineaarisesti kuvan 5 mukaisesti. Yksidimensionaalisella johtumisella tarkoitetaan sitä, että lämmön siirtymistä tarkastellaan yhtä koordinaattiakselia käyttäen, jolloin lämpö johtuu tämän koordinaatin suuntaisesti. (Incropera ym. 2007, 96.) Yhtälössä olevan lämpötilan alaindeksi 1 kuvaa suurempaa ja alaindeksi 2 pienempää lämpötila-aluetta.

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

jossa	q_x''	lämpövuoto tasomaisen levyn läpi	[W/m ²]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]
	T	lämpötila	[°C]
	L	ainekerroksen paksuus	[m]



Kuva 5. Johtuminen yksikerroksisen seinämän läpi

Fourierin lain mukaan lämpövuoto on vektorisuure, jolloin vuolla on suuruus ja suunta. Miinusmerkki yhtälössä kuvaa lämpövuon siirtyvän aina laskevan lämpötilan suuntaan. Lämpövuon suunta on normaali poikkipinta-alalle, joka on usein isoterminen eli vakiolämpötilassa oleva pinta. (Incropera ym. 2007, 59.)

Lämpövirran tiheys saadaan laskettua jakamalla lämpövuoto lämmönsiirtopinta-alalla yhtälön 2 mukaan.

$$q_x = \frac{q_x''}{A} \quad (2)$$

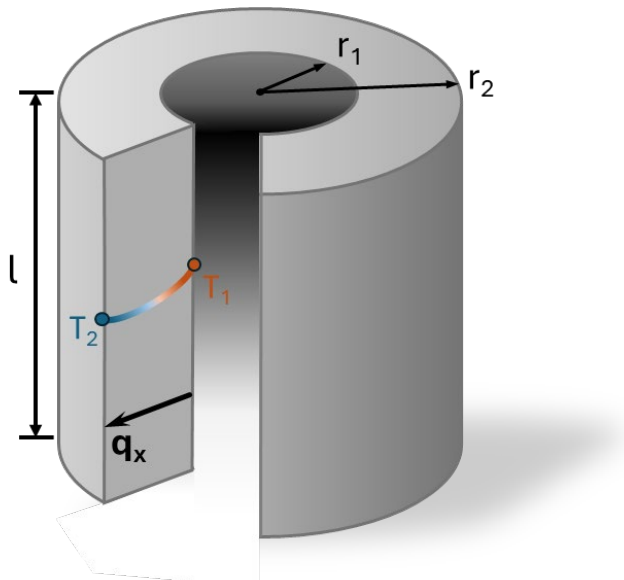
jossa	q_x	lämpövirran tiheys tasomaisen levyn läpi	[W]
	q_x''	lämpövuoto tasomaisen levyn läpi	[W/m ²]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]

Lämmön johtumista voidaan tarkastella myös kolmedimensionaalisesti, jolloin lämmön oletetaan johtuvan esimerkiksi karteesisen koordinaatiston mukaan x-, y- ja z-akseleiden suuntaisesti (Incropera ym. 2007, 70). Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan yksidimensionaalista lämmön johtumista lämmönsiirtopinnan läpi, sillä johtumisen ei arvioida olevan merkittävää muihin suuntiin lämmönsiirtopinnan sisällä. Tämä yksinkertaistaa lämmönsiirtokapasiteetin laskentaa, vaikuttamatta laskentatuloksen tarkkuuteen merkittävästi.

Kun tarkastellaan onttoa sylinterimäistä kappaletta, jossa lämpö johtuu yksidimensionaalisesti, voidaan lämpötilan todeta muuttuvan ja lämpövirran siirtyvän säteen r suuntaisesti. Lämmön siirtyessä poispäin sylinterin pituusakselilta, lämmönsiirtopinta-ala kasvaa säteen kasvaessa, minkä vuoksi myös lämpötilagradientti pienenee siirryttäessä sylinterin ulkokehää kohti. Tämä aiheuttaa sen, että lämpötila jakautuu sylinterimäisen kappaleen seinämässä epälineaarisesti (kuva 6). (Jokilaakso 1987, 89.) Lämpövirran suuruus ontossa sylinterimäisessä kappaleessa voidaan selvittää yhtälön 3 mukaan. Yhtälössä säteen alaindeksi 1 kuvaa putken sisäsädettä ja alaindeksi 2 ulkosädettä.

$$q_r = \lambda 2\pi r l \frac{\Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3)$$

jossa	q_r	lämpövirran tiheys sylinterin läpi	[W]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]
	r	säde	[m]
	l	sylinterimäisen lämmönsiirtopinnan pituus	[m]
	T	lämpötila	[°C]



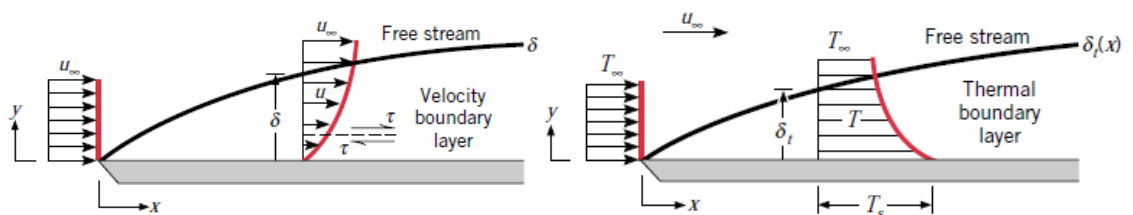
Kuva 6. Johtuminen onton sylinterin seinämän läpi

3.2 Konvektio

Konvektiivisessa lämmönsiirrossa lämpö siirtyy liikkuvan aineen ja pinnan välillä. Konvektioon liittyy aina johtumista, sillä energia siirtyy kuljettumalla eli advektion kautta sekä molekyylien vapaan liikkeen eli johtumisen kautta. (Incropera ym. 2007, 6.)

Konvektiota voi tapahtua vapaasti, jolloin fluidin liike syntyy siinä esiintyvien tiheyserojen vuoksi tai pakotetusti, jolloin fluidin liike saadaan aikaan osin tai kokonaan esimerkiksi pumpun, puhaltimen tai muun ulkoisen voiman avulla (Jokilaakso 1987, 97). Tässä työssä tarkastellaan tilanteita, jossa konvektio tapahtuu pakotetusti pumpun tuottaman paine-eron avulla.

Konvektiivisessa lämmönsiirrossa tarkastellaan kiinteän aineen ja fluidin välistä rajanpintaa. Fluidin partikkelien ollessa kontaktissa lämmönsiirtopinnan kanssa, voidaan fluidin nopeuden todeta olevan nolla. Pintaan koskeva fluidin partikkelikerros hidastaa siihen kontaktissa olevan partikkelikerroksen nopeutta, mikä hidastaa taas seuraavan partikkelikerroksen nopeutta. Tämä toistuu, kunnes saavutetaan vapaan virtauksen alue eli rajapinnan ulkopuolinen alue, jolloin rajakerroksen kitkavastuksen vaikutus fluidin nopeuteen on merkityksetön. Fluidin nopeuden voidaan siis todeta olevan pienimmillään lämmönsiirtopinnan lähellä ja kasvavan vapaata virtausta kohden. (Incropera ym. 2007, 349.) Kun tarkastellaan termistä rajakerrosta, voidaan lämmönsiirtopintaan osuvien partikkeleiden todeta saavuttavan terminen tasapainotila pinnan lämpötilan kanssa. Pinnan lämpötilan ollessa fluidin lämpötilaa suurempi, pienenee lämpötilagradientti kauemmas pinnasta siirryttäessä, kunnes saavutetaan vapaan virtauksen alue. (Incropera ym. 2007, 350.) Nopeuden rajakerros sekä terminen rajakerros kehittyvät isotermisen levyn pinnalla kuvan 7 mukaisesti. Kuvassa tunnus U_∞ kuvaa rajapinnan ulkopuolisen fluidin nopeutta ja tunnus T_∞ vastaavasti rajapinnan ulkopuolisen fluidin lämpötilaa. Puolestaan tunnus U kuvaa rajakerroksen sisällä olevan fluidin virtausnopeutta ja tunnus T vastaavasti lämpötilaa. δ kuvaa nopeuden ja δ_t termisen rajakerroksen pak-suutta.



Kuva 7. Nopeuden rajakerros vasemmalla, terminen rajakerros oikealla (Incropera ym. 2007, 349–350)

Konvektiivisen lämpövuon laskemiseksi hyödynnetään Newtonin jäähtymislakia (yhtälö 4), jonka mukaan lämpövuoto on suoraan verrannollinen ympäristön ∞ ja pinnan s lämpötilaeroon. Yhtälön avulla saadaan laskettua paikallinen lämpövuoto tietyssä kohdassa kappaletta. (Incropera ym. 2007, 8.)

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

jossa	q''	lämpövuoto	[W/m ²]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	T	lämpötila	[°C]

Kokonaislämpövirran tiheys saadaan määritettyä integroimalla paikallinen lämpövuoto lämmönsiirtopinta-alan suhteen tai määrittämällä keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin kokonaislämmönsiirtopinta-alalle. Tällöin laskenta saadaan yhtälön 5 mukaiseen muotoon. (Incropera ym. 2007, 353.)

$$q = \bar{h}A(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

jossa	q	lämpövirran tiheys	[W]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	T	lämpötila	[°C]

Laskennoissa esiintyvä konvektiivinen lämmönsiirtokerroin h riippuu virtauksen ja fluidin rajapinnan tilasta, johon vaikuttavat muun muassa kappaleen muoto, virtausolosuhteet sekä erinäiset fluidiin liittyvät ominaisuudet, kuten tiheys, viskositeetti sekä lämmönjohtavuus. Konvektiivisen lämmönsiirron tarkastelussa ongelmaksi muodostuu usein lämmönsiirtokerroimen määrittämiseen liittyvät haasteet. (Incropera ym. 2007, 355.) Tämän vuoksi lämmönsiirtokerroimen määrittämisessä hyödynnetään dimensiottomiin lukuihin perustuvia tapauskohtaisia empiirisiä korrelaatioita. Dimensiottomat luvut on esitetty raportin luvussa 3.2.1 ja korrelaatiokaavat luvussa 3.2.2. Korrelaatiokaavojen käyttäminen laskennassa aiheuttaa sen, että lämmönsiirtokerroimelle määritetty arvo on aina likimääräinen. (Incropera ym. 2007, 385.)

3.2.1 Dimensiottomat luvut

Virtausolosuhteiden määrittäminen tapahtuu dimensiottomalla parametrilla, Reynoldsin luvulla, joka kuvaa fluidin inertian suhdetta fluidin kykyyn vastustaa virtauksen muodonmuutosta. Reynoldsin luvun ollessa pieni, ovat muodonmuutosta vastustavat voimat merkittäviä ja virtauksen voidaan todeta olevan laminaarista. (Incropera ym. 2007, 360.) Reynoldsin luvun noustessa kriittisen arvon yli, alkaa virtaukseen muodostua turbulenssia (Incropera ym. 2007, 487). Kriittinen arvo putken sisällä tapahtuvassa virtauksessa on 2 300 ja tasomaisen levyn pinnalla noin 500 000 (Nuclear Power 2024).

Putken ulkopuolella tai levyn pinnalla tapahtuvan virtauksen virtausolosuhteet voidaan määrittää Reynoldsin luvun avulla yhtälön 6 mukaan, lähtötiedoista riippuen. Yhtälössä karakteristinen mitta x kuvaa levyn pinnalla virtausmatkaa tasolevyn etureunasta. Putken sisällä tai kanavassa kulkevan virtauksen laskennassa karakteristisena mittana käytetään putken sisähalkaisijaa tai vaihtoehtoisesti poikkipinta-alaltaan muun kuin pyöreän putken tai kanavan hydraulista halkaisijaa. Tässä työssä virtausolosuhteita ei erikseen määritetä, sillä laskentatyökalua hyödynnetään ainoastaan lämmönvaihtimille, joissa virtauksen tiedetään olevan täysin turbulenttista.

$$Re = \frac{\rho w x}{\mu} = \frac{4q_m}{\pi D_h \mu} \quad (6)$$

jossa	Re	Reynoldsin luku	[–]
	ρ	tiheys	[kg/m ³]
	w	virtausnopeus	[m/s]
	x	karakteristinen mitta	[m]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	D_h	hydraulinen halkaisija	[m]

Prandtin luku on tarkasteltavasta geometriasta riippumaton aineominaisuus, jolla kuvataan liikemäärän ja termisen diffuusion suhdetta. Liikemäärään vai-

kuttavat fluidin viskositeetti sekä ominaislämpökapasiteetti. Termiseen diffuusioon vaikuttaa puolestaan materiaalin lämmönjohtavuus. Prandtin luku voidaan laskea yhtälön 7 mukaan. (Incropera ym. 2007, 376.)

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (7)$$

jossa	Pr	Prandtin luku	[–]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kg°C)]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]

Nusseltin lukua käytetään kuvaamaan konvektion suhdetta johtumalla tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Nusseltin luku ratkaistaan kertomalla rajakerroksen vastuksia huomioon ottava konvektiivinen lämmönsiirtokerroin karakteristisella mitalla ja jakamalla tämä materiaalin lämmönjohtavuuden arvolla (yhtälö 8). (Incropera ym. 2007, 376.)

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} \quad (8)$$

jossa	Nu	Nusseltin luku	[–]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m²°C)]
	x	karakteristinen mitta	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]

3.2.2 Korrelaatiokaavat

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen ratkaisemiseksi hyödynnetään kokeellisesti tai teoreettisesti määritettyjä korrelaatiokaavoja, joilla saadaan ratkaistua tapauskohtaisesti yhtälössä 8 esiintyvä Nusseltin luku. Korrelaatiokaavan valintaan vaikuttavat muun muassa kappaleen geometria, eli millaisella pinnalla virtaus tapahtuu, sekä virtauksen ja rajapinnan olosuhteet. Lisäksi tulee määrittää, selvitetäänkö lämmönsiirtokerroin paikallisesti vai keskiarvona koko pinnalle. (Incropera ym. 2007, 415.)

Tässä työssä tarkastellaan levy- ja putkilämmönvaihtimia, joissa lämmönsiirto on pakotettua ja virtaukset kulkevat vastavirtaan toisiinsa nähden. Virtauksen lämmönvaihtimissa voidaan todeta olevan täysin turbulenttista suurien virtausnopeuksien vuoksi. Työssä tarkastellaan lämmönvaihtimia kokonaisuutena, minkä vuoksi keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin halutaan selvittää koko tarkasteltavalle lämmönsiirtopinta-alalle.

Laskettaessa keskimääräistä Nusseltin lukua levyn pinnalla tapahtuvassa virtauksessa, voidaan laskennassa käyttää esimerkiksi yhtälön 9 mukaista korrelaatiokaavaa. Korrelaatio on voimassa, kun Prandtlin luku asettuu noin arvojen 0,6 sekä 60 välille ja Reynoldsin luku on alle 100 000 000. (Incropera ym. 2007, 412.)

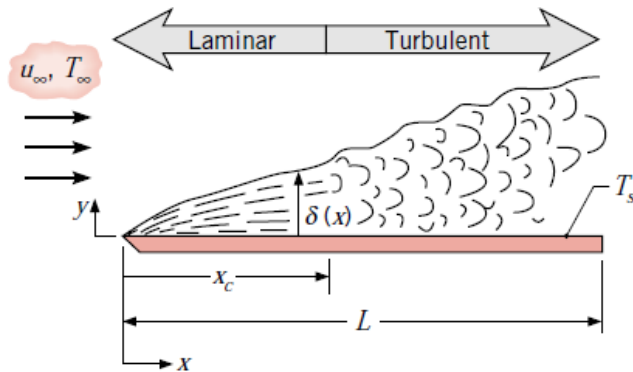
$$\overline{Nu} = 0,037 \cdot \left(Re^{\frac{4}{5}} - B \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

jossa	Nu	Nusseltin luku	[-]
	Re	Reynoldsin luku	[-]
	B	vakio	[-]
	Pr	Prandtlin luku	[-]

Yhtälössä 9 vakion B arvo on 871, mikäli Reynoldsin luku on kriittinen eli noin 500 000 siinä pisteessä, jossa virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Kuvassa 8 tämä piste on esitetty tunnuksella x_c . Mikäli virtaus on turbulenttista heti lämmönsiirtolevyn etureunasta, kuten tässä työssä tarkasteltavien lämmönvaihtimien osalta voidaan olettaa, vakion B arvoksi voidaan määrittää 0. Tällöin yhtälö saadaan yhtälön 10 mukaiseen muotoon. (Incropera ym. 2007, 412.)

$$\overline{Nu} = 0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

jossa	Nu	Nusseltin luku	[-]
	Re	Reynoldsin luku	[-]
	Pr	Prandtlin luku	[-]



Kuva 8. Levyn suuntaisesti kulkeva virtaus (Incropera ym. 2007, 405)

Putkilämmönvaihtimien osalta hyödynnettiin Dittus-Boelterin korrelaatiokaavaa (yhtälö 11). Dittus-Boelterin korrelaatiokaava sopii tilanteisiin, joissa veden ominaisuuksien vaihtelut lämmönvaihtimessa sekä lämpötilaero putken pinnan ja poikkipinnan keskilämpötilan välillä ovat pieniä tai kohtalaisia. (Incropera ym. 2007, 514.)

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n \quad (11)$$

jossa	Nu	Nusseltin luku	[–]
	Re	Reynoldsin luku	[–]
	Pr	Prandtlin luku	[–]

Yhtälössä Prandtlin luvun eksponenttina esiintyvä n saa arvokseen 0,4, kun lämmönsiirtopinnan lämpötila on fluidin lämpötilaa korkeampi eli fluidia lämmitetään ja 0,3, kun fluidin lämpötila on siirtopinnan lämpötilaa korkeampi eli fluidia jäähdytetään. Dittus-Boelterin korrelaatio on voimassa, kun Prandtlin luku asettuu noin arvojen 0,7 ja 160 välille ja Reynoldsin luku on vähintään noin 10 000 eli virtaus on täysin turbulenttista. Lisäksi tarkasteltavan putken pituuden tulee olla yli kymmenkertainen putken ulkohalkaisijaan verrattuna. (Incropera ym. 2007, 514.)

Kyseisiin korrelaatiokaavoihin päädyttiin yksinkertaisen yhtälörakenteen sekä yhtälöiden keskinäisen samankaltaisuuden vuoksi. Tällä pystyttiin sujuvoittamaan yhtälöiden käyttöä, kun samaa laskentatyökalun laskentavälilehteä hyödynnettiin sekä putki- että levylämmönvaihtimien laskemiseksi.

3.3 Terminen resistanssi

Tarkasteltaessa yksidimensionaalista lämmön siirtymistä, jossa lämpöä ei tuoteta eikä varastoida, voidaan havaita yhtäläisyys lämmön ja sähkön johtumisen sekä näihin liittyvien vastusten välille. Ohmin lain mukaan sähkövastuksen eli sähköisen resistanssin arvo saadaan jakamalla jännite-ero sähkövirran arvolla yhtälön 12 mukaan. (Incropera ym. 2007, 98–99.)

$$I = \frac{\Delta E_S}{R_e} \Rightarrow R_e = \frac{\Delta E_S}{I} \quad (12)$$

jossa	I	sähkövirta	[A]
	E_s	jännite	[V]
	R_e	sähköinen resistanssi	[Ω]

Sähköopin mukaan virtapiirin jännite-ero toimii ajavana voimana, joka käynnistää elektronien virtauksen ja sähköinen resistanssi vastustaa virran kulkua. Samaan tapaan lämpötilaero aiheuttaa lämmön siirtymisen ja terminen resistanssi vastustaa lämpövirran kulkua (yhtälö 13). (Incropera ym. 2007, 98–99.)

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_t} \Rightarrow \Sigma R_t = \frac{\Delta T}{q} \quad (13)$$

jossa	q	lämpövirran tiheys	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]

Terminen resistanssin määrittäminen riippuu lämmönsiirtymistavasta sekä tarkasteltavan pinnan geometrisista ominaisuuksista. Terminen resistanssin määrittäminen on esitetty luvussa 3.3.1.

3.3.1 Johtumisesta ja konvektiosta aiheutuva terminen resistanssi

Johtumisesta aiheutuva terminen resistanssi levyn pinnalla voidaan määrittää uudelleenjärjestelemällä yhtälön 2 termit yhtälön 14 mukaisesti. Yhtälössä 14 lämpötilaero aiheuttaa lämmön siirtymisen ja nimittäjään jää termisen resistanssin aiheuttavat termit. Levyn pinnalla johtumisesta aiheutuva terminen resistanssi voidaan siis esittää yhtälön 15 mukaan. (Incropera ym. 2007, 98.)

$$q_{x,levy} = \frac{\Delta T}{\frac{L}{\lambda A}} = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (14)$$

$$R_{t,levy} = \frac{L}{\lambda A} \quad (15)$$

joissa	q_x	lämpövirran tiheys tasomaisen levyn läpi	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	L	ainekerroksen paksuus	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]

Putken sisäpuolista virtausta tarkasteltaessa terminen resistanssi voidaan määrittää uudelleenjärjestelemällä yhtälön 3 termit, jolloin lauseke saadaan yhtälön 16 mukaiseen muotoon. Yhtälössä lämpötilaero edelleen aiheuttaa lämmön siirtymisen ja jakoviivan alla oleva nimittäjä termisen resistanssin, jolloin putkessa johtumisesta aiheutuva terminen resistanssi voidaan esittää yhtälön 17 mukaan.

$$q_r = \frac{\Delta T}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda 2\pi l}} = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (16)$$

$$R_{t,sylinteri} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda 2\pi l} \quad (17)$$

joissa	q_r	lämpövirran tiheys sylinterin läpi	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	r	säde	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]
	l	sylinterimäisen lämmönsiirtopinnan pituus	[m]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]

Vastaavasti konvektiosta aiheutuva terminen resistanssi voidaan määrittää Newtonin jäähtymislain yhtälön (yhtälö 5) kautta, kun lämpövirran yhtälö asetetaan muotoon, jossa jakolaskun osoittajaksi jää pinnan ja ympäristön välinen lämpötilaero (yhtälö 18). Tällöin nimittäjään muodostuu terminen resistanssin osuus. Konvektiosta aiheutuva terminen resistanssi määritetään pinnalle yhtälön 19 mukaan.

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{hA}} \quad (18)$$

$$R_t = \frac{1}{hA} \quad (19)$$

jossa	q	lämpövirran tiheys	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]

3.3.2 U-arvon määrittäminen termisten resistanssien avulla

Lämpövirran tiheys voidaan määrittää termisten resistanssien avulla. Yksikerroksiselle levylämmönsiirtimelle laskenta voidaan esittää yhtälön 20 (Incropera ym. 2007, 100) ja putkilämmönsiirtimelle yhtälön 21 mukaan (Incropera ym. 2007, 118). Lämpötilojen välinen ero määrittää suunnan, johon lämpö virtaa.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\left(\frac{1}{A \cdot h_1} + \frac{L}{A \cdot \lambda} + \frac{1}{A \cdot h_2}\right)} \quad (20)$$

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\left(\frac{1}{2\pi r_{sisä} l \cdot h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}}\right)}{2\pi l \lambda} + \frac{1}{2\pi r_{ulko} l \cdot h_2}\right)} \quad (21)$$

joissa	q	lämpövirran tiheys	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	L	ainekerroksen paksuus	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]
	r	säde	[m]
	l	sylinterimäisen lämmönsiirtopinnan pituus	[m]

Lämpövirran tiheys voidaan määrittää lämpötilaeron ja termisten resistanssien summan osamäärän lisäksi kokonaislämmönläpäisykerroimen eli U-arvon, lämmönsiirtopinta-alan ja kylmän ja kuumen fluidin lämpötilaeron tulona (yhtälö 22). Kun merkataan aiemmin esitetyt laskentakaavat yhtä suuriksi, saadaan yhtälöstä ratkaistua U-arvo yhtälön 23 mukaisesti. U-arvon suuruuteen vaikuttavat muun muassa lämmönsiirtopintojen käytön aikainen likaantuminen, mikä lisää lämpövastusta ja näin ollen heikentää lämmönsiirron tehoa (Incropera ym. 2007, 673).

$$q = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{\Sigma R_t} \quad (22)$$

$$q = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$$

$$U = \frac{1}{\Sigma R_t A} \quad (23)$$

joissa	q	lämpövirran tiheys	[W]
	T	lämpötila	[°C]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]
	U	lämmönläpäisykerroin, U-arvo	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]

Kun lasketaan U-arvoa yksikerroksiselle tasolevylle sijoittamalla johtumisesta ja konvektiosta aiheutuvien termisten resistanssien yhtälöt 15 ja 19 yhtälöön 23, voidaan lämmönsiirtopinta-alan todeta pysyvän A muuttumattomana, jolloin laskenta saadaan yhtälön 24 mukaiseen muotoon (Incropera ym. 2007, 100). Alaindeksi c kuvaa lämmönvaihtimen kylmää puolta ja alaindeksi h kuumaa puolta.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_h}\right)} \quad (24)$$

jossa	U	lämmönläpäisykerroin, U-arvo	[W/(m ² °C)]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	L	ainekerroksen paksuus	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]

Sylinterimäistä yksikerroksista kappaletta tarkasteltaessa, kasvaa lämmönsiirtoala pituusakseliilta poispäin siirryttäessä, mikä tulee ottaa huomioon U-arvoa määritettäessä. Mikäli U-arvo määritetään sylinterin sisäpuolisen lämmönsiirtopinta-alan $A_{sisä}$ mukaan, voidaan näin lasketun U-arvon $U_{sisä}$ ja sisäpuolen lämmönsiirtopinta-alan tulon todeta olevan yhtä suuri kuin ulkopinnan mukaan

määritetyn U-arvon U_{ulko} ja ulkopinnan lämmönsiirtopinta-alan A_{ulko} tulon (yhtälö 25). U-arvon ja lämmönsiirtopinta-alan tulon pysyessä muuttumattomana, voidaan U-arvon todeta pienenevän lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa ja puolestaan lämmönsiirtopinta-alan pienenevän U-arvon kasvaessa. (Incropera ym. 2007, 118.)

$$U_{sisä}A_{sisä} = U_{ulko}A_{ulko} = \frac{1}{\sum R_t^{-1}} \quad (25)$$

jossa	U	lämmönläpäisykerroin, U-arvo	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	R_t	terminen resistanssi	[°C/W]

Kun määritetään U-arvo sylinterin sisäpuolisen lämmönsiirtopinta-alan mukaan, U-arvon yhtälö saadaan yhtälön 26 mukaiseen muotoon. U-arvo voidaan vastaavasti määrittää myös sylinterin ulkopuolen lämmönsiirtopinta-alan mukaan, jolloin lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa U-arvo pienenee (yhtälö 27). (Incropera ym. 2007, 118.)

$$U_{sisä} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{r_{sisä}}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}}\right) + \frac{r_{sisä}}{r_{ulko}} \cdot \frac{1}{h_2}\right)} \quad (26)$$

$$U_{ulko} = \frac{1}{\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{r_{ulko}}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}}\right) + \frac{1}{h_2}\right)} \quad (27)$$

joissa	U	lämmönläpäisykerroin, U-arvo	[W/(m ² °C)]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	r	säde	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]

3.4 Logaritminen lämpötilaero

Laskennoissa hyödynnettiin logaritmissen lämpötilaeron (LMTD) laskentakaavaa tilanteissa, joissa kylmän ja kuumen fluidin sisään- ja ulostulolämpötilat ovat tiedossa. Aritmeettisen lämpötilaeron (AMTD) laskennasta (yhtälö 28)

poiketen logaritminen lämpötilaero ottaa huomioon lämmönvaihtimissa epälineaarisesti muuttuvan lämpötilan, kun fluidien välinen lämpötilaero pienenee lämmön siirtyessä kuumasta fluidista jäädyttävään fluidiin. (Vaia s.a.) Logaritminen lämpötilaero lasketaan yhtälön 29 mukaisesti.

$$\Delta T_{aritm} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \quad (28)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (29)$$

joissa	ΔT_{aritm}	aritmeettinen lämpötilaero	[°C]
	ΔT_1	virtojen lämpötilaero lämmön-	
		siirtimen alkupäässä	[°C]
	ΔT_2	virtojen lämpötilaero lämmön-	
		siirtimen loppupäässä	[°C]
	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]

Logaritmisen lämpötilaeron laskenta riippuu virtausasettelusta eli siitä, virtaavatko kuuma ja kylmä fluidi myötä-, risti- vai vastavirtaan toisiinsa nähden. Kun lasketaan logaritmistä lämpötilaeroa vastavirtalämmönvaihtimille, yhtälössä 29 esiintyvän muuttujan ΔT_1 arvo määräytyy kuuman puolen sisäänmenolämpötilan ja kylmän puolen ulostulolämpötilan erotuksen mukaan ja puolestaan ΔT_2 arvo kuuman puolen uloslämpötilan ja kylmän puolen sisäänmenolämpötilan erotuksen mukaan (yhtälö 30). (Incropera ym. 2007, 697.)

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{H,in} - T_{C,out}) - (T_{H,out} - T_{C,in})}{\ln\left(\frac{(T_{H,in} - T_{C,out})}{(T_{H,out} - T_{C,in})}\right)} \quad (30)$$

jossa	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]
	$T_{H,in}$	kuuman puolen sis.menolämpötila	[°C]
	$T_{C,out}$	kylmän puolen ulostulolämpötila	[°C]
	$T_{H,out}$	kuuman puolen ulostulolämpötila	[°C]
	$T_{C,in}$	kylmän puolen sis.menolämpötila	[°C]

4 LASKENTATYÖKALU

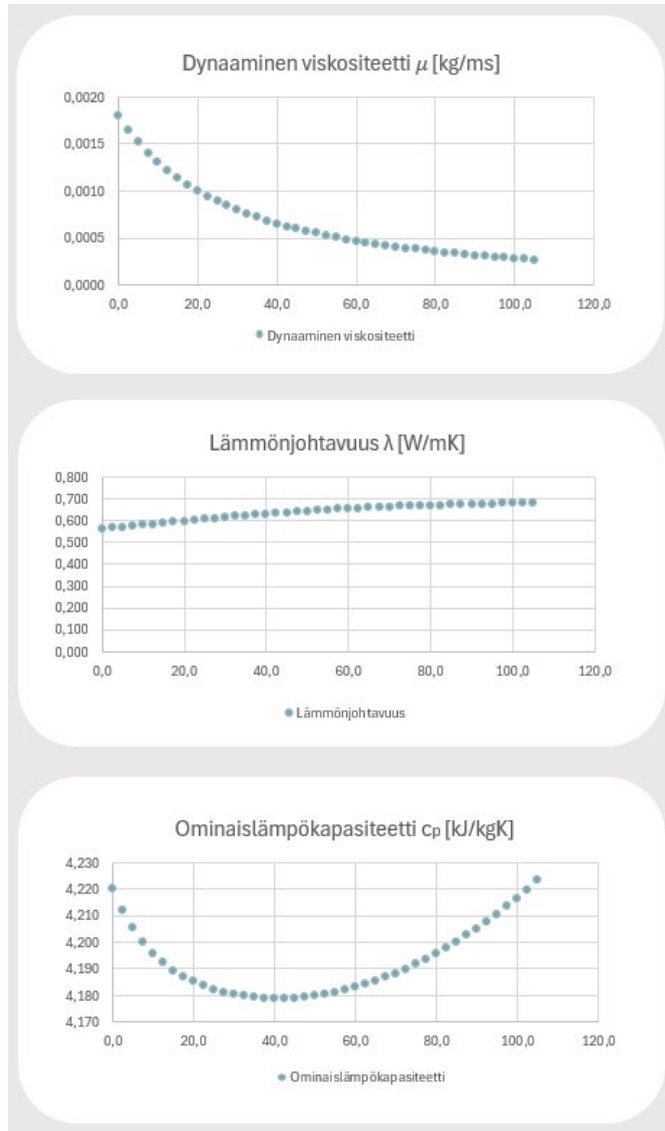
Laskentatiedosto koostuu viidestä välilehdestä: *Sovitepolynomit*, *Lähtötietoja*, *Laskenta*, *Koestustietojen syöttö* sekä *Tulosarkisto*. Näistä laskentatyökalun käyttäjä eli koestusta suorittava henkilö hyödyntää ainoastaan Koestustietojen syöttö -välilehteä lämmönsiirtokapasiteetin tai muun koestusohjeessa vaadittavan parametrin laskemiseksi sekä tulosten tarkastelemiseksi ja tarvittaessa Tulosarkisto-välilehteä aiempien koestusten laskentatulosten tarkastelua varten. Muilta välilehdiltä löytyy muun muassa lämmönvaihtimien tietoja sekä laskenta.

Laskentaosuus koostuu mittausvirhelaskennasta sekä kolmesta laskennan päävaiheesta, joista ensimmäisessä lasketaan U-arvo koestustilanteen arvojen mukaan ja toisessa U-arvo ekstrapoloidaan onnettomuustilanteeseen. Kolmas laskentavaihe liittyy hätälämmönsiirtoketjuun ja TF-lämmönvaihtimen koestukseen. Laskenta on esitetty kokonaisuudessaan luvussa 5.

4.1 Sovitepolynomit

Sovitepolynomit-välilehdelle on koottu taulukkoarvoja, joiden perusteella on määritetty joko lineaarisen kuvaajan kulmakertoimen ja vakion arvo tai vaihtoehtoisesti käyrän kuvaajan polynomien kertoimet tiettyjen aineominaisuuksien lämpötilariippuvuuksien selvittämiseksi. Lämpötilariippuvuudet selvitettiin kyläläiselle vedelle dynaamisen viskositeetin, lämmönjohtavuuden sekä ominaislämpökapasiteetin osalta ja lämmönvaihtimien materiaaleille lämmönjohtavuuden osalta.

Sovitepolynomien funktiot määritettiin taulukoimalla ensin kylläisen veden lämpötilan arvot 0 ja 105 °C:n väliltä, 2,5 °C:n välein. Lämpötilojen arvioitiin pysyvän näiden arvojen välillä jokaisen lämmönvaihtimen kohdalla. Kylläisen veden ominaisuuksien arvot saatiin hyödyntäen veden ja höyryn ominaisuuksien laskuria (Peacesoftware s.a). Laskuriin syötettiin ”Calculation of thermodynamic properties of saturated steam” -otsikon alle haluttu veden lämpötila ja tuloksista kirjattiin dynaamisen viskositeetin, lämmönjohtavuuden sekä ominaislämpökapasiteetin arvot kussakin lämpötilassa. Taulukoiduista arvoista luotiin havainnollistavat kuvaajat (kuva 9) Sovitepolynomit-välilehdelle.



Kuva 9. Kylläisen veden ominaisuuksien kuvaajia

Tiedoista ratkaistiin laskennallisesti neljännen asteen polynomifunktion kertoimet hyödyntäen Excelin INDEKSI-funktiota sekä siihen yhdistettyä LINREGR-funktiota, joka laskee lineaarista regressiomenetelmää hyödyntäen muuttujien välisiä riippuvuuksia. Excelin kaavariville syötettiin funktio `"=@INDEKSI(LINREGR(C6:C44;B6:B44^{1\2\3\4});1)"`. Yhtälössä punaisella merkityt solut kuvaavat saraketta, jossa on listattuna kylmän veden lämpötilojen arvot ja sinisellä merkityt solut kuvaavat saraketta, jossa on valitun veden ominaisuuden arvot listattuna kyseisissä lämpötiloissa. Yhtälössä termi `"{1\2\3\4}"` kuvaa polynomien asteiden määrää ja yhtälön lopussa vaihtuva numero (1–5) kuvaa, kuinka mones polynomien tekijä on kyseessä. Funktion avulla lasketut polynomifunktion kertoimet on esitetty taulukossa 2. Taulukon kertoimia hyödynnettiin yhtälössä 31. Kertoimet on linkitetty Laskenta-välilehdelle.

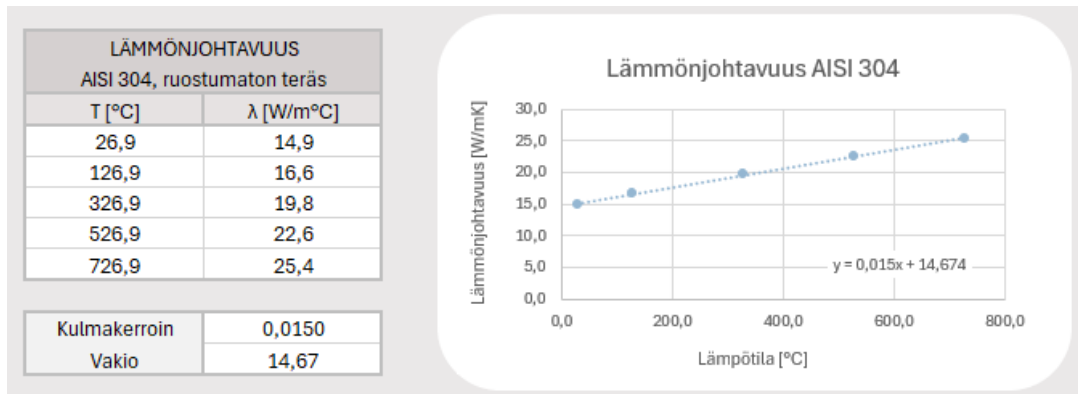
$$y = aT^4 + bT^3 + cT^2 + dT + e \quad (31)$$

jossa	y	valittu veden ominaisuus	[vaihtelee]
	a	tekijän 1 kerroin	[-]
	b	tekijän 2 kerroin	[-]
	c	tekijän 3 kerroin	[-]
	d	tekijän 4 kerroin	[-]
	e	tekijän 5 kerroin	[-]
	T	kylläisen veden lämpötila	[°C]

Taulukko 2. Kylläisen veden ominaisuuksien polynomien kertoimet

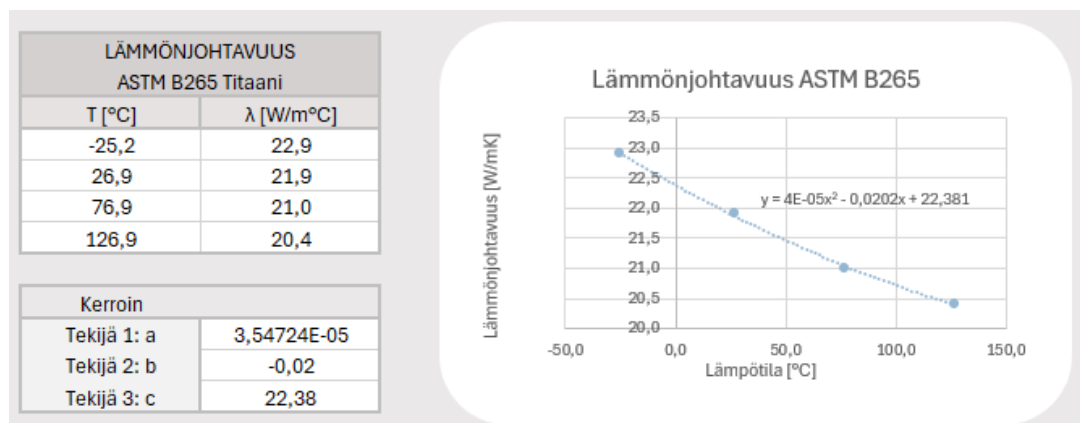
KYLLÄISEN VEDEEN OMINAISUUKSIEN POLYNOMIEN KERTOIMET			
Kerroin	Dynaaminen viskositeetti, μ [kg/(ms)]	Lämmönjohtavuus, λ [W/(m°C)]	Ominaislämpökapasiteetti, cp [kJ/(kg°C)]
Tekijä 1: a	2,86359E-11	5,59969E-10	2,03063E-09
Tekijä 2: b	-8,28821E-09	-1,18231E-07	-5,21242E-07
Tekijä 3: c	9,3379E-07	-1,50294E-06	5,75532E-05
Tekijä 4: d	-5,40485E-05	0,001955028	-0,002584702
Tekijä 5: e	0,001772204	0,560827884	4,217684397

Lämmönvaihtimien kokoonpanopiirustuksista tarkastettiin lämmönvaihtimien materiaalit. Levylämmönvaihtimissa käytössä oleva materiaali piirustusten perusteella on titaani ASTM B265 ja putkilämmönvaihtimissa ruostumaton teräs AISI 304. Kuten aiemmin mainittiin, luvussa 3.1 esitetyn, eri materiaalien lämmönjohtavuuskäyriä esittävän kuvan 4 perusteella voitiin havaita, että ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuuskäyrä on lähes lineaarinen. Tämän vuoksi ruostumattoman teräksen osalta selvitettiin lämmönjohtavuuden yhtälölle kulmakerroin ja vakio, hyödyntämällä Excelin "=KULMAKERROIN()"- ja "=LEIKKAUSPISTE()"-funktioita sekä taulukoituja lämmönjohtavuuksien arvoja. Ruostumattoman teräksen osalta taulukoidut arvot, kuvaaja sekä laskettu kulmakerroin ja vakio on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona

Titaanin osalta lämmönjohtavuuden arvoja taulukoidessa havaittiin kuvaajan olevan käyrä, minkä vuoksi polynomien kertoimet selvitetiin kylläisen veden sovitepolynomien laskennan tapaan ”=@INDEKSI(LINREGR())”-funktioita käyttäen. Titaanin osalta taulukoidut arvot, kuvaaja sekä lasketut polynomien kertoimet on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Titaanin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona

Kuvissa 10 ja 11 esiintyvä kulmakerroin, vakio sekä sovitepolynomien kertoimet linkitettiin Laskenta-välilehdelle. Kuvaajissa näkyvissä kaavoissa muuttuja x kuvaa myöhemmin esitettävää referenssitilanteen eli onnettomuustilanteen keskilämpötilaa, mikä vaihtelee lämmönvaihtimesta riippuen.

4.2 Lähtötietoja

Lähtötietoja-välilehdiltä löytyy lämmönvaihtimiin, mittaustunnuksiin sekä esimerkiksi hätälämmönsiirtoketjuun liittyviä tietoja, joiden perusteella laskenta toteutetaan. Tiedot linkittyvät Laskenta- ja Koestustietojen syöttö -välilehdille.

Työssä hyödynnettiin olemassa olevalle LVKUNVAL-kunnonvalvontaohjelmalle luotua tietokantaa, joka sisältää koestettavien lämmönvaihtimien suunnittelu- ja referenssitilan arvoja eriteltynä Loviisa 1 ja 2 -laitosyksiköille. Suunnitteluarvot kuvaavat pääasiassa yksittäisen tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen tietoja, kuten lämmönvaihtimen tyyppin, lämmönvaihtimessa virtaavat väliaineet, tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen sekä erinäisiä mittauksiin liittyviä tietoja. Referenssitilan arvot ovat analyysimenetelmillä määritettyjä onnettomuustilanteen arvoja. Lähtötiedot-välilehdelle on koottu tietoja lämmönvaihtimista taulukon 3 mukaisesti. Alaindeksi *suun* kuvaa suunnittelutilan eli tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen arvoja ja alaindeksi *ref* referenssitilan eli onnettomustilanteen arvoja.

Taulukko 3. Lähtötietoja-välilehden lämmönvaihtimia koskevat tiedot

Solun otsikko	Selitys	Yksikkö
Virtaus A	Virtauksen järjestelmätunnus, putkilämmönvaihtimilla putkipuoli	-
Virtaus B	Virtauksen järjestelmätunnus, putkilämmönvaihtimilla vaippapuoli	-
Virtaava aine	Virtaava aine (vesi/boorivesi)	-
Kokonaislämmönsiirtoala	Lämmönsiirtopinta-ala: jos useampi lämmönsiirrin rinnakkain, niin näiden yhteisala	m ²
D_{ulko} / Levyn paksuus	Putkilämmönvaihtimen putken ulkohalkaisija tai levylämmönvaihtimessa yksittäisen levyn paksuus	m
$d_{sisä}$	Putkilämmönvaihtimen putken sisähalkaisija	m
h_{suun}	Lämmönsiirtokerroin, suunnitteluarvo	W/(m ² °C)
$q_{m,suunn}$	Massavirran suunnitteleuarvo	kg/s
$T_{keski,suun}$	Keskilämpötila, suunnitteluarvo	°C
T_{mitt_tarkk}	Lämpötilan mittaustarkkuus	°C
$q_{m,mitt_tarkk}$	Massavirran mittaustarkkuus	%
$q_{m,alue}$	Massavirran mittausalue	kg/s
$T_{keski,ref}$	Keskilämpötila, referenssiarvo	°C
Hyväksymiskriteeri, U-arvo	U-arvon hyväksymiskriteeri	W/(m ² °C)
Hyväksymiskriteeri, q_m	Massavirtauksen hyväksymiskriteeri	kg/s

Lisäksi Lähtötietoja-välilehdelle on lisätty muita Laskenta-välilehdelle linkitettyjä, mahdollisesti myöhemmin päivittyviä lukuarvoja. Näitä arvoja ovat esimerkiksi hätälämmönsiirtoketjun laskennassa hyödynnettävä suunnitteluperusteisessa onnettomuustilanteessa mereen siirrettävän lämpötehon arvo, TF-piirille määritetty lämmönvaihtimen jälkeisen maksimilämpötilan arvo sekä koestustilanteen lämpötila- ja virtausmittauksen virhelaskennassa hyödynnettävä otoskoon suuruus.

Lähtötietoja-välilehdeltä linkittyvät myös tiedot Koestustietojen syöttö -välilehden alavetovalikoihin. Virtaus- ja lämpötilamittausten tunnukset päivittyvät Koestustietojen syöttö -välilehdelle käyttäjän tekemien alavetovalikon valintojen perusteella.

4.3 Koestustietojen syöttö

Koestustietojen syöttö -välilehti on oletusvälilehtenä Excel-tiedoston auetessa ja koestustietojen syöttöön liittyvät taulukot sekä alavetovalikoiden valinnat oletuksena tyhjä (kuva 12). Koestustietojen syöttö -välilehdeltä laskentatyökä-lun käyttäjä valitsee alavetovalikoista koestustilanteen mukaan laitoksen, jär-jestelmän ja redundanssin sekä valitsee koestukseen osallistuvan lämmön-vaihtimen tai TF-järjestelmän osalta kaksi rinnakkain koestettavaa lämmön-vaihdinta. Tiedot alavetovalikoihin on haettu Lähtötietoja-välilehdeltä Excelin "=JOS()" - ja "=XHAKU()" -funktioita hyödyntäen niin, että alavetovalikko tar-joaa ainoastaan sellaisia vaihtoehtoja, jotka täyttävät ehdot jo aiemmin tehty-jen valintojen osalta.

28.10.2024 7:35

VALITSE ALASVETOVALIKOISTA:

Laitos	
Järjestelmä	
Redundanssi	
Koestettavat lämmönvaihtimet (max. 2)	

SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT:

		°C
		°C
		kg/s
		°C
		°C
		kg/s

HYVÄKSYMISKRITEERIT

q _m		kg/s
U-arvo		W/(m ² °C)
Teho (RR)		MW

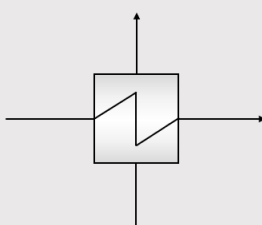
TULOKSET:

Lämmönsiirtokyky		W/(m ² °C)
------------------	--	-----------------------

Kirjaa lisätietoja koestuksesta (valinnainen):

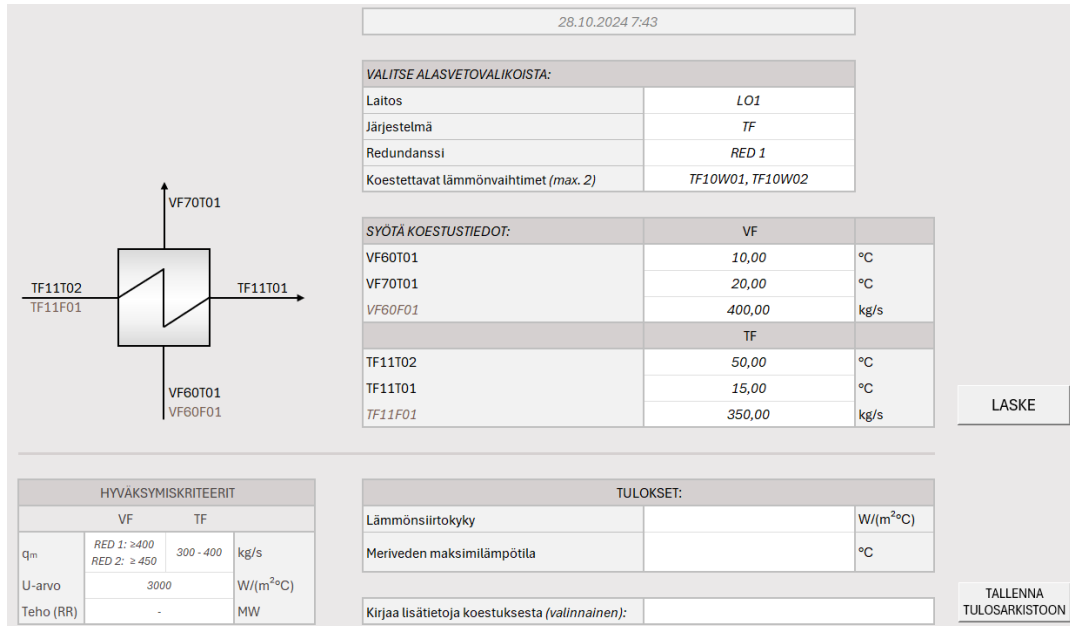
LASKE TYHJENNÄ KENTÄT

TALLENNA
TULOSARKISTOON



Kuva 12. Tyhjä Koestustietojen syöttö -välilehti Excel-tiedoston auetessa

Valitsemalla koestettavaan lämmönvaihtimeen liittyvä järjestelmä ja redundanssi sekä oikea laitosyksikkö, ilmestyvät koestuksissa käsiteltävien lämpötilojen ja massavirran mittaustunnukset välilehdellä olevaan lämmönvaihdinta kuvaavaan periaatepiirustukseen sekä taulukkoon, johon koestuksen mittausarvot syötetään. Taulukon otsikkokenttiin päivittyvät myös lämmönvaihtimessa virtaavien aineiden järjestelmätunnukset. Tietojen haku Koestustietojen syöttö -välilehden *Syötä koestustiedot* -taulukkoon tapahtuu "=XHAKU()"-funktiota käyttäen niin, että ylempään taulukkoon laskentatyökalu hakee tiedot Lähtötiedot-välilehdellä *Virtaus A* -otsikon alta ja alempaan taulukkoon *Virtaus B* -otsikon alta. Putkilämmönvaihtimilla *Virtaus A* kuvaa aina putkipuolen virtausta ja *Virtaus B* vaippapuolen virtausta. Levylämmönvaihtimilla *Virtaus A* puolestaan kuvaa aina lämmönvaihtimen kuumaa ja *Virtaus B* kylmää puolta. Näin koestustiedot linkittyvät oikein Laskenta-välilehdelle. Kuvassa 13 on esitetty Koestustietojen syöttö -välilehti, kun koestukseen liittyvät tiedot on syötetty ja tulokset kyseisen lämmönvaihtimen osalta laskettu. Kuvassa esiintyvät lukuarvot ovat kuvitteellisia.



Kuva 13. Hätälämmönsiirtoketjun koestus, arvot kuvitteellisia

Koestustietojen syöttö -välilehdelle on lisätty seuraavat painikkeet: *Tyhjennä kentät*, *Laske* ja *Tallenna tulosarkistoon*. Laske-painikkeesta laskennan tulokset ilmestyvät Koestustietojen syöttö -välilehden alalaidassa olevaan taulukoon. Muiden kuin vara-RR-järjestelmän osalta ratkaistaan ekstrapoloitu U-arvo onnettomuustilanteessa. Vara-RR-järjestelmää koestaessa ratkaistaan lämpöteho onnettomuustilanteessa, koestusohjeen mukaisesti. U-arvon lisäksi TF-lämmönvaihtimen kohdalla hätälämmönsiirtoketjua koestettaessa ratkaistaan myös meriveden maksimilämpötila, jolla lämmönsiirtokapasiteetti on vielä riittävä onnettomuustilanteessa. Tallenna tulosarkistoon -painikkeesta siirtyvät Koestustietojen syöttö -välilehdeltä tiedot Tulosarkisto-välilehdelle. Tyhjennä kentät -painikkeesta Koestustietojen syöttö -välilehden taulukoihin syötetyt tiedot saadaan tyhjennettyä esimerkiksi uusia koestustietoja varten.

4.4 Tulosarkisto

Koestustietojen syöttö -välilehden Tallenna tulosarkistoon -painikkeesta siirtyvät päivämäärä ja aika, laitos, järjestelmätunnus, redundanssi, mittaustunnukset sekä koestuksessa tehdyt mittaukset, koestustietojen perusteella laskettujen tulosten kanssa Tulosarkisto-välilehdelle. Käyttäjä voi myös halutessaan kirjoittaa koestuksesta vapaamuotoisesti lisätietoja "Lisätietoja koestuksesta" -kenttään, mikä tallentuu myös Tulosarkisto-välilehdelle.

Tallennettuja tietoja voidaan lajitella ja rajata otsikkokenttiin lisättyjen suodattimien avulla. Näin voidaan tarkastella esimerkiksi tietynä ajankohtana tai tietylle laitokselle tai lämmönvaihtimelle tehtyjä koestuksia.

5 LASKENTATYÖKALUN LASKENTAOSUUS

Laskentavaiheessa selvitettiin koestettavien lämmönvaihtimien lämmönsiirtokapasiteetti onnettomuustilanteessa sekä hätälämmönsiirtoketjun osalta jäädyttävän meriveden maksimilämpötila, jolla saadaan siirrettyä onnettomuustilanteessa vallitseva lämpöteho mereen niin, että TF-välijäähdytyspiirin lämmönvaihtimen jälkeinen lämpötila saadaan pidettyä määritetyn maksimilämpötilarajan alapuolella. Mereen siirrettävä lämpöteho sekä TF-piirin maksimilämpötila ovat analyysiperusteisia arvoja, joita saatetaan päivittää mahdollisten laitosmuutosten myötä. Päivitys tapahtuu Lähtötiedot-välilehden kautta.

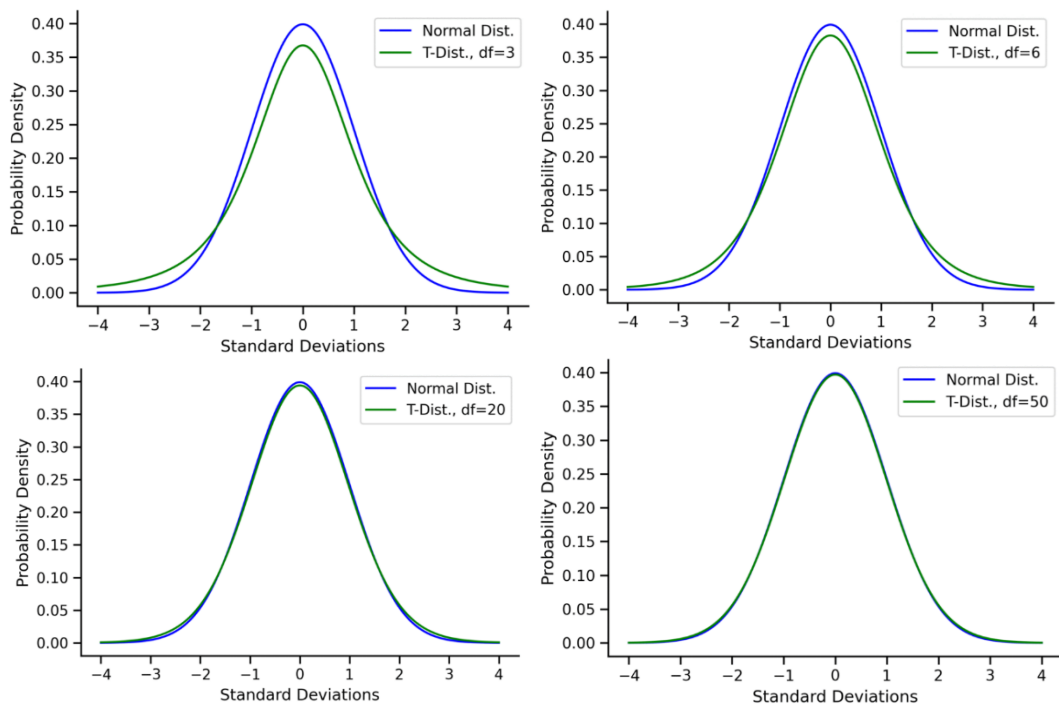
Laskenta koostuu kolmesta laskentavaiheesta, joista kolmas koskee ainoastaan hätälämmönsiirtoketjua eli TF-lämmönvaihtimen koestusta. Ensimmäisessä laskentavaiheessa määritetään koestustilanteen arvojen mukainen kokonaislämmönsiirtokerroin eli U-arvo. Toisessa laskentavaiheessa U-arvo ekstrapoloidaan onnettomuustilanteeseen. RR-lämmönvaihtimelle selvitetään ekstrapoloidun U-arvon mukaan teho onnettomuustilanteessa. Kolmannessa laskentavaiheessa määritetään hätälämmönsiirtoketjun eli TF-lämmönvaihtimen koestuksen osalta korkein meriveden lämpötila, jolla saadaan onnettomuustilanteessa määritetty lämpöteho siirrettyä mereen. Ennen edellä mainittuja laskentavaiheita suoritetaan mittausvirheisiin liittyvää laskentaa, jolla huomioidaan mittauksissa esiintyvät satunnaisvirheet. Laskentavaiheissa hyödynnetään arvoja, joissa on mittausvirhe huomioitu. Laskenta-välilehti laskentavaiheineen on esitetty liitteessä 3.

Laskenta-välilehdellä lähes kaikki arvot ovat joko linkitetty muista soluista tai muilta välilehdiltä tai muodostuvat soluihin luotujen kaavojen tai Excelin funktioiden kautta, minkä vuoksi laskentavälilehtien lukuarvoihin ei työkalua päivitetäessä tarvitse tehdä muutoksia.

5.1 Mittausvirheen huomiointi

Mittausvirheellä kuvataan eroa mitatun arvon sekä todellisen arvon välillä. Mittausvirhe voi aiheutua muun muassa mittalaitteen virheellisestä viretyksestä, mittaustuloksen virheellisestä tulkinnasta, mittauselektronikan ikääntymisestä tai ympäristöön liittyvistä tekijöistä, kuten lämpötilan tai kosteuden vaikutuksesta mittalaitteiston toimintaan. Lisäksi mittauksissa esiintyy tuntemattomista tekijöistä aiheutuvia satunnaisvirheitä, joiden ratkaisemiseksi hyödynnetään usein todennäköisyyslaskentaa. (Unacademy 2024.)

Keskeisen raja-arvolauseen mukaan otannan keskiarvo jakautuu normaalijakauman mukaan, kun tarkkaillaan riittävän suurta otantajoukkoa (Scribbr 2024). Tilanteissa, joissa otoskoko on pieni tai otoksen keskihajontaa ei tiedetä, voidaan soveltaa t-jakaumaa, joka korkeammilla vapausasteilla kuvaa likimääräisesti normaalijakaumaa, kuvan 14 mukaisesti. Kuvassa sinisellä on esitetty normaalijakauman kuvaaja ja vihreällä t-jakauman kuvaaja, jonka vapausasteen df kasvaessa, kuvaajan korkeus kasvaa muistuttaen muodoltaan normaalijakauman kuvaajaa. Vapausaste t-jakaumassa määritellään vähentämällä otoskoosta arvo 1. (Medium 2021.)



Kuva 14. Normaalijakauman ja t-jakauman vertailu (Medium 2021)

Virhetarkastelu suoritettiin koestuksessa mitatuille sisääntulo- ja ulosmenolämpötilojen sekä massavirtauksien arvoille. Virhetarkastelu aloitettiin määrittämällä mittausten otoskoko eli mittausten lukumäärä. Kuten kuvasta 14 voidaan havaita, vapausasteen kasvattamisella esimerkiksi 20:sta 50:een on vähäinen vaikutus laskennan lopputuloksen kannalta. Todellisessa koestustilanteessa lämpötilan osalta ei aina päästä stationääritilanteeseen, jolloin mitatun lämpötilan arvo muuttuu jatkuvasti koestuksen aikana eikä mittausarvoja tämän vuoksi määritellä koestuksissa useamman mittauksen keskiarvona. Mittausvirhettä ei myöskään määritetä koestuksen aikana, vaan tämä suoritetaan erillisillä mittauskokeilla. Tämän vuoksi otoskoko ei määritetä erikseen esimerkiksi koestuskohtaisesti, vaan otoskoolle määritettiin arvo, jolla huomioidaan mittausvirhe riittävällä tarkkuudella. Otoskoko lisättiin Lähtötietoja-välilehdelle päivitettäväksi arvoksi ja solu linkitettiin Laskenta-välilehdelle.

Mittaustuloksiin liittyy aina epävarmuus, jota kuvataan vaihteluvälillä, johon mittaustulos kaikkine virheineen tietyllä varmuudella osuu. Todennäköisyyden arvoksi on virtausmittauksiin liittyvässä standardissa esitetty 95 % (SFS-EN ISO 5167-1: 2003, 17). Tämä määritettiin luottamustason arvoksi virtausmittausten lisäksi myös lämpötilamittauksille.

T-jakauman kriittinen arvo laskettiin hyödyntämällä Excelin funktiota "`=T.KÄÄNT.2S()`". Funktion sulkujen sisään syötettiin ensin arvo 1, josta vähennettiin luottamustason desimaaliluku eli 0,95 ja kaksoispisteen jälkeen syötettiin vapausaste vähentämällä otoskoosta arvo 1. Esimerkiksi otoskoolla 20 ja luottamustasolla 95 % saatiin t-jakauman kriittiseksi arvoksi 2,09. T-jakauman kriittinen arvo on taulukkoarvo, mutta päivitettävyyden parantamiseksi sen ratkaiseminen suoritettiin funktion avulla.

Lähtötiedot-välilehdelle oli määritetty nykyisen kunnonvalvontatyökalun tietokannan perusteella lämpötilan mittaustarkkuus Celsiusasteina sekä massavirtauksen mittaustarkkuus prosenttiarvoina lähtötiedoissa määritellystä mittausalueesta. Massavirtauksen mittaustarkkuus selvitettiin kertomalla prosenttiarvo mittausalueen arvolla. Mittaustarkkuus viittaa siihen, kuinka lähellä mit-

taustulokset ovat todellista arvoa (Precisa 2024). Mittauksen keskivirhe laskettiin lämpötilalle yhtälön 32 ja massavirtaukselle yhtälön 33 mukaan, hyödyntäen lähtötietojen mittaustarkkuuksien arvoja.

$$S_T = \frac{\text{otoskoko}}{T_{\text{mitt_tarkk}}} \quad (32)$$

$$S_{q_m} = \frac{\text{otoskoko}}{q_{m,\text{mitt_tarkk},\%} \cdot q_{m,\text{mitt_alue}}} \quad (33)$$

joissa	S	keskivirhe	[°C tai kg/s]
	$T_{\text{mitt_tarkk}}$	mittaustarkkuus	[°C]
	$q_{m,\text{mitt_tarkk},\%}$	mittaustarkkuus	[%]
	$q_{m,\text{mitt_alue}}$	mittausalue	[kg/s]

Lopuksi selvitettiin virhemarginaali kertomalla keskivirhe t-jakauman kriittisellä arvolla. Virhemarginaalin arvo lisättiin koestuksen mittausravoon tai vähennettiin mittausravosta sen mukaan, mikä muuttaa laskennan lopputulosta konservatiivisempaan suuntaan, jotta saadaan varmistettua epävarmuuksien huomiointi riittävällä varmuudella. Säteilyturvakeskuksen säädöskokoelman antaman määritelmän mukaan konservatiivisella analyysimenetelmällä tarkoitetaan analyysitapaa, jossa huomioidaan laskentaan sekä alkuoletuksiin liittyvät epävarmuudet siten, että analysoitavan alkutapahtuman seuraukset ovat hyvällä varmuudella lievempiä kuin analyysin tulos osoittaa (Stuklex s.a).

Massavirtauksen kohdalla virhemarginaalin tulos jokaisessa tilanteessa vähennetään koestustilanteen arvosta, mikä pienentää laskettua lämpötehon arvoa sekä näin ollen U-arvoa konservatiivisempaan suuntaan. Lämpötilan mittausvirheen huomiointi riippuu laskentatilanteesta. Esimerkiksi koestustilanteen lämpötehoa laskettaessa hyödynnettiin sisääntulo- ja ulosmenolämpötilojen välistä erotusta yhtälön 34 mukaisesti. Lämpötilojen erotuksen tulee olla mahdollisimman pieni, jotta lämpötehon arvosta saadaan mahdollisimman pieni U-arvon laskentaa varten. U-arvon laskennassa puolestaan hyödynnet-

tiin logaritmistä lämpötilaeroa yhtälön 36 mukaisesti, jolloin logaritmissen lämpöeron tulee jakajana olla mahdollisimman suuri, jotta U-arvon tulos saadaan mahdollisimman konservatiiviseksi.

Osassa lämmönvaihtimista (TH, TQ, TG) ei ole erillistä TF-puolen massavirran mittausta, jolloin massavirran määrittäminen suoritetaan laskennallisesti. Laskennan yksinkertaistamiseksi työssä hyödynnettiin stationääritilanteen kaavoja. Stationääritilanteessa lämmönvaihtimen tehon sen kylmällä ja kuumalla puolella voidaan todeta olevan yhtä suuret, kun lämpövirta pysyy vakiona ja oletetaan, ettei lämmönvaihtimessa tapahdu lämpövuotoa eikä lämmönvaihtimeen varastoidu lämpöä. TF-puolen massavirtauksen laskennassa hyödynnettiin yhtälön 34 mukaista lämpötehon laskentakaavaa, jossa teho lämmönvaihtimen molemmille puolille määritettiin yhtä suuriksi. Alaindeksi A kuvaa Lähtötiedot-välilehdellä esiintyvää *Virtaus A*:ta eli tässä tapauksessa lämmönvaihtimen kuumalla puolella virtaavaa TH-, TQ- tai TG-boorivettä ja alaindeksi B puolestaan *Virtaus B*:tä eli kylmän puolen välijäähdytyspiirin TF-virtausta. TF-puolen massavirran laskemiseksi, yhtälö muodostettiin lopulta yhtälön 35 mukaiseen muotoon.

$$\Phi = q_{m,A} \cdot c_{p,A} \cdot \Delta T_A = q_{m,B} \cdot c_{p,B} \cdot \Delta T_B \quad (34)$$

$$q_{m,B,laskettu} = \frac{q_{m,A} \cdot c_{p,A} \cdot (T_{A,in} - T_{A,out})}{c_{p,B} \cdot (T_{B,out} - T_{B,in})} \quad (35)$$

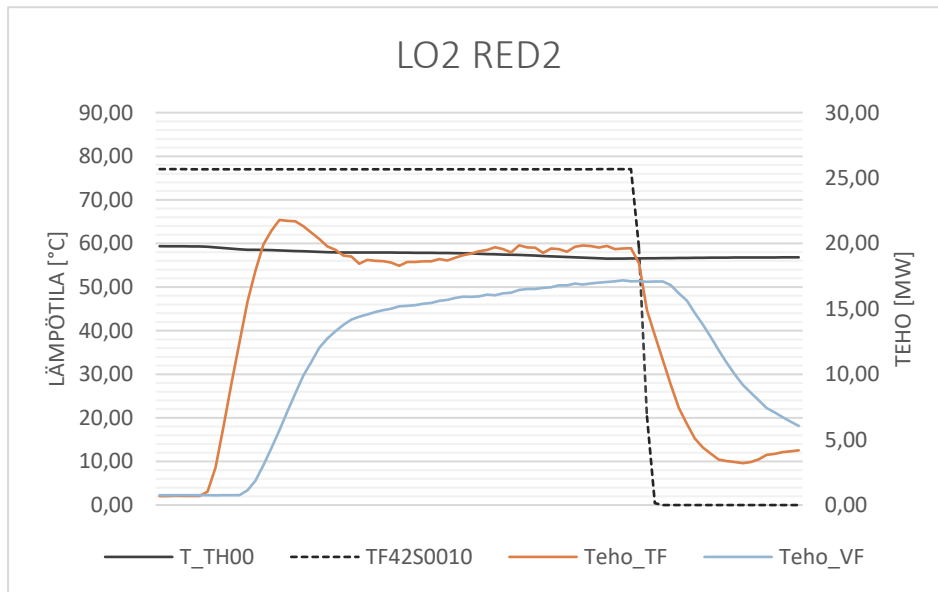
joissa	Φ	lämpöteho	[W]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°C)]
	T	lämpötila	[°C]

TF-virtauksen laskennallisessa määrittämisessä hyödynnettiin mittausarvoja eli arvoja, joissa virhetarkastelua ei ollut suoritettu. Mittausvirheen huomiointi tehtiin vähentämällä virhemarginaali lasketusta tuloksesta. Ominaislämpökapasiteetit on laskettu mitattujen keskilämpötilojen perusteella sovitepolynomeja (yhtälö 31) hyödyntäen.

5.2 Laskentavaihe 1: U-arvon määrittäminen koestustilanteessa

Ensimmäisessä laskentavaiheessa laskettiin koestustilanteen arvojen mukaan lämmönvaihtimen U-arvo. Laskennoissa käytettiin sellaisia lämpötilan ja massavirtauksen arvoja, joissa mittausvirhe oli huomioitu.

Laskenta aloitettiin selvittämällä lämpöteho molemmille puolille lämmönvaihtinta yhtälön 34 mukaisesti. Lämpöhäviöt, virtausprofiilien erot sekä esimerkiksi mittauksiin liittyvät virheet ja epätarkkuudet voivat aiheuttaa eroja kuumen ja kylmän puolen lämpötehojen välillä. Eroa esimerkiksi hätälämmönsiirtoketjun koestustilanteen arvoilla laskettaessa aiheuttaa myös se, ettei koestustilanteessa ehditä saavuttamaan kylmän ja kuumen puolen välille tasapainotilaa muun muassa TTKE:n aiheuttamien lämpötilarajoitusten vuoksi. Ero on havaittavissa alla esitetystä kuvaajasta (kuva 15), johon on laskettu Loviisa 2 -laitosyksikön hätälämmönsiirtoketjun koestuksessa mitattujen TF-lämmönvaihtimen virtaus- ja lämpötilamittausten perusteella lämpötehot TF- ja VF-puolille. Sinisellä on kuvattu VF-puolen teho ja oranssilla TF-puolen teho. Musta ehyt viiva kuvaa koestuksessa lämmitettävän ja tämän jälkeen jäähdytettävän hätävesisäiliön lämpötilaa ja musta katkoviiva TF-puolen sulkuventtiilin auki-kiinni tilaa. Kuvaajasta voidaan havaita, ettei tasapainotilaa lämmönvaihtimen kylmän ja kuumen puolen välille saavuteta koestuksen aikana ja VF-puolen lämpötila jatkaa nousuaan koestuksen päättymiseen ja TF-puolen sulkuventtiilin sulkemiseen asti. Kuten aiemmin mainittiin, työssä hyödynnettiin kuitenkin stationääritilanteen yhtälöitä laskennan yksinkertaistamiseksi.



Kuva 15. Häätälämmönsiirtoketjun koestusarvojen perusteella tehty kuvaaja

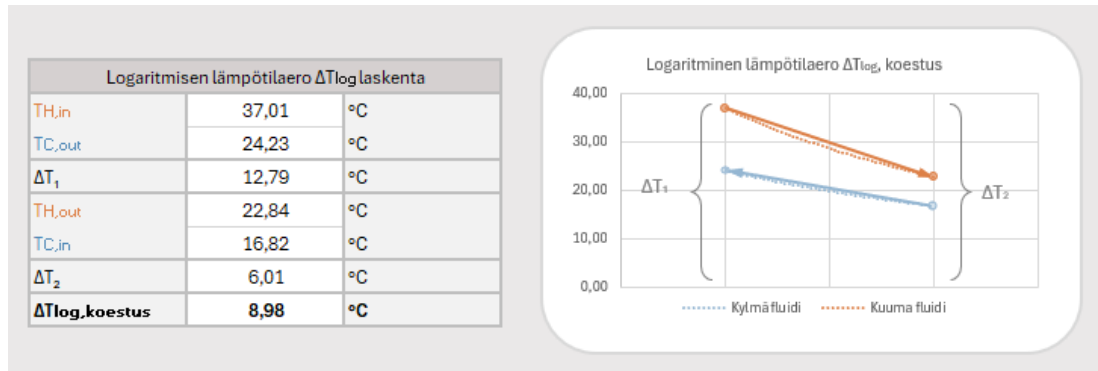
Koestustilanteen U -arvon laskennassa hyödynnettiin logaritmistä lämpötila-eroa, U -arvoa sekä lämmönsiirtopinta-alaa hyödyntävää lämpötehon laskenta-kaavaa, josta ratkaistiin lämmönvaihtimen U -arvo yhtälön 36 mukaisesti. Samaa lämmönsiirtopinta-alaa hyödynnettiin putkilämmönvaihtimissa sekä vaippa- että putkipuolen laskennoissa.

$$\Phi = UA\Delta T_{log} \Rightarrow U_{koestus} = \frac{\Phi}{A\Delta T_{log}} \quad (36)$$

jossa	Φ	lämpöteho	[W]
	U	lämmönläpäisykerroin, U -arvo	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]

Yhtälössä esiintyvä logaritminen lämpötilaero lämmönvaihtimelle laskettiin yhtälön 28 mukaisesti. Laskenta-välilehdelle luotiin funktiot logaritmissen lämpötilaeron laskemiseksi, jolloin laskennan toimivuuden kannalta ei ole merkitystä, kummalla puolella lämmönvaihdinta kylmä ja kuuma fluidi virtaa, vaan laskenta tunnistaa lämmönvaihtimen kuuman ja kylmän puolen lukuarvojen suuruuksien mukaan. Kuuman puolen sisääntulolämpötilan arvon laskentatyökalu valitsee koestuksen sisääntulolämpötilan mittavirhekorjatuista arvoista hyödyntäen Excelin "=MAKS()"-funktioita ja puolestaan kylmän puolen sisääntulolämpötilan hyödyntäen "=MIN()"-funktioita. Ulostulolämpötilat laskentatyökalu

valitsee hyödyntäen ”=INDEKSI()”, ”=VASTINE()”- sekä ”=MIN()”- tai ”=MAKS()”-funktioita, jolloin laskenta tunnistaa, mikä ulostulolämpötila vastaa aiemmin valitun sisäänmenolämpötilan arvoa. Logaritmissen lämpötilan laskentataulukosta luotiin kuvaaja havainnollistamaan logaritmissa lämpötilojen käyttäytymistä vastavirtalämmönvaihtimessa (kuva 16).



Kuva 16. Laskentatyökalun Laskenta-välilehdelle tehty logaritmissen lämpötilaeron laskentataulukko ja kuvaaja

5.3 Laskentavaihe 2: U-arvon ekstrapolointi onnettomuustilanteeseen

Laskennan seuraavassa vaiheessa ekstrapoloitiin U-arvo onnettomuustilannetta vastaavaksi. Laskenta aloitettiin määrittämällä Prandtlin luku yhtälön 7 mukaisesti erikseen suunnittelu-, koestus- ja referenssitilanteen arvoja käyttäen. Laskenta suoritettiin sekä kylmälle että kuumalle puolelle lämmönvaihdinta.

U-arvon ekstrapoloinnissa hyödynnettiin korjauskertoimia, jotka määritettiin kahden eri vertailtavan tilanteen (suunnittelu, koestus, referenssi) konvektiivisten lämmönsiirtokertoimien välille. Vertaamalla suunnitteluarvojen eli tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen ja koestustilanteen mukaisia arvoja, saatiin selvitettyä lämmönsiirtopinnalle kerääntyvän, lämmönsiirtokerrointa heikentävän likaantuneisuuden osuus. Likaantuneisuutta kuvaava korjauskerroin lisättiin laskennoissa sille puolelle lämmönvaihdinta, jonka arvioitiin likaantuvan herkemmin. Tässä työssä tarkasteltavissa lämmönvaihtimissa virtaa joko puhdas prosessivesi, jota jäähdytetään merivedellä tai vaihtoehtoisesti boorivesi, jota jäähdytetään puhtaan välipiirin vedellä. Likaantuvuus oletettiin lämmönvaihtimesta riippuen sille puolelle, jossa virtaa merivesi tai boorivesi. Toinen korjauskerroin laskettiin suunnitteluarvojen ja referenssitilanteen arvojen välille

ottamaan huomioon onnettomuusanalyysin mukaiset arvot, joihin ei koestuksissa esimerkiksi lämpötilarajoitusten vuoksi päästä. Tämä korjauskerroin lisättiin molemmille puolille lämmönvaihdinta.

5.3.1 Korjauskertoimen määrittäminen

Korjauskertoimien määrittämiseksi putkilämmönvaihtimelle, hyödynnettiin Nusseltin luvun yhtälöä (yhtälö 8) sekä Dittus-Boelterin korrelaatiokaavaa (yhtälö 11). Edellä mainittujen yhtälöiden oikeat puolet merkittiin yhtä suuriksi ja tästä ratkaistiin konvektiivisen lämmönsiirron osuus yhtälön 37 mukaisesti.

$$h = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \cdot \frac{\lambda}{D_h} \quad (37)$$

jossa	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² C)]
	Re	Reynoldsin luku	[-]
	Pr	Prandtin luku	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]
	D_h	hydraulinen halkaisija	[m]

Korjauskerroin muodostettiin kahden eri tilanteen välille, yhtälön 38 mukaisesti. Tässä työssä alaindeksi a kuvaa suunnittelutilannetta ja alaindeksi b tilanteesta riippuen referenssi- tai koestutilannetta.

$$x_{a \rightarrow b, \text{putki}} = \frac{h_b}{h_a} = \frac{0,023 \cdot \left(\frac{4q_{m,b}}{\pi D_h \mu_b}\right)^{0,8} \cdot (Pr_b)^n \cdot \frac{\lambda_b}{D_h}}{0,023 \cdot \left(\frac{4q_{m,a}}{\pi D_h \mu_a}\right)^{0,8} \cdot (Pr_a)^n \cdot \frac{\lambda_a}{D_h}} \quad (38)$$

jossa	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	D_h	hydraulinen halkaisija	[m]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	Pr	Prandtin luku	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]

Hydraulisen halkaisijan D_h voitiin todeta pysyvän muuttumattomana tilanteesta riippumatta ja näin ollen supistuvan laskennoista pois. Myös muut kertojat ilman alaindeksiä a tai b pysyvät muuttumattomina tilanteesta riippumatta, jolloin lauseke supistui yhtälön 39 mukaiseen muotoon.

$$x_{a \rightarrow b, \text{putki}} = \frac{\left(\frac{q_{m,b}}{\mu_b}\right)^{0,8} \cdot (Pr_b)^n \cdot \lambda_b}{\left(\frac{q_{m,a}}{\mu_a}\right)^{0,8} \cdot (Pr_a)^n \cdot \lambda_a} \quad (39)$$

jossa	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	Pr	Prandtin luku	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]

Yhtälö yksinkertaistettiin lopuksi yhtälön 40 mukaiseen muotoon. Tällä pyrittiin helpottamaan Excelissä luettavuutta sekä parantamaan päivitettävyyttä.

$$x_{a \rightarrow b, putki} = \left(\left(\frac{q_{m,b}}{q_{m,a}} \right) \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} \right) \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{Pr_b}{Pr_a} \right)^n \cdot \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a} \right) \quad (40)$$

jossa	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	Pr	Prandtlin luku	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]

Vastaavaan tapaan levylämmönvaihtimelle määriteltiin korjauskerroin hyödyn-
täen levylämmönvaihtimelle tarkoitettua korrelaatiokaavaa (yhtälö 10). Kor-
jauskertoimen yhtälö saatiin yhtälön 41 mukaiseen muotoon.

$$x_{a \rightarrow b, levy} = \left(\left(\frac{q_{m,b}}{q_{m,a}} \right) \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} \right) \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{Pr_b}{Pr_a} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a} \right) \quad (41)$$

jossa	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	Pr	Prandtlin luku	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°C)]

5.3.2 U-arvon ekstrapolointi korjauskertoimien avulla

U-arvon ekstrapolointi toteutettiin määrittämällä U-arvo termisten resistanssien avulla ja virittämällä tämä korjauskertoimien avulla. Ensimmäinen korjauskerroin määritettiin suunnittelu- ja referenssitilanteen välille, millä viritettiin tehdaspuhdas lämmönvaihdin onnettomuusolosuhteisiin. Toinen korjauskerroin laskettiin suunnittelu- ja koestustilanteen välille. Tällä huomioitiin lämmönvaihtimen likaantuneisuus ja määritettiin lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky koestushetkellä, tietyssä likaisuusasteessa. U-arvon ekstrapolointi jaettiin kah-
teen erilliseen laskentatapaan riippuen, tarkastellaanko levy- vai putkilämmön-
vaihdinga.

Levylämmönvaihtimien osalta U-arvon ekstrapolointi suoritettiin hyödyntämällä yhtälöä 24. Suunnittelu- ja referenssitilan välinen korjauskerroin $x_{s \rightarrow r}$ lisättiin molemmille puolille lämmönvaihdinta. Likaisuutta kuvaava korjauskerroin $x_{s \rightarrow k}$ puolestaan lisättiin ainoastaan likaantuvammalle puolelle eli jäähdyttävälle merivesipuolelle. Lopulta laskenta saatiin yhtälön 42 mukaiseen muotoon. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen alaindeksi c kuvaa lämmönvaihtimen kylmää puolta ja h kuumaa puolta. Korjauskertoimen alaindeksi s kuvaa suunnittelutilannetta, k koestustilannetta ja alaindeksi r referenssitilannetta.

$$U_{ekstr.,levy} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c \cdot x_{c,s \rightarrow r} \cdot x_{c,s \rightarrow k}} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_h \cdot x_{h,s \rightarrow r}} \right)} \quad (42)$$

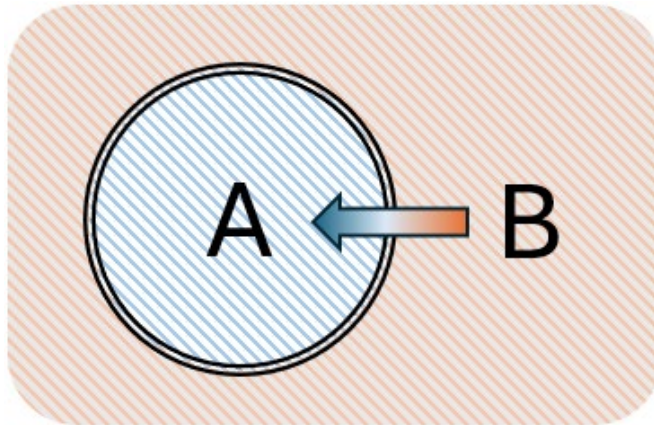
jossa	$U_{ekstr.}$	ekstrapoloitu U-arvo	[W/(m ² °C)]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	L	levyn paksuus	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]

Putkilämmönvaihtimien osalta laskennassa hyödynnettiin yhtälöä 27, jossa U-arvo määritetään putken ulkopuolen lämmönsiirtopinta-alan mukaisesti. TF-putkilämmönvaihtimissa (kuva 17) lämpö virtaa vaippapuolelta putkipuolelle, kun taas muissa putkilämmönvaihtimissa eli TH-, TQ- ja TG-lämmönvaihtimissa lämpö virtaa toiseen suuntaan eli putkipuolelta vaippapuolelle (kuva 18). Virtaussuunnalla ei kuitenkaan todettu olevan vaikutusta laskentaan, sillä johtumisen osuuden voitiin todeta pysyvän muuttumattomana, riippumatta siitä, mihin suuntaan lämpö virtaa. Tämä voidaan havaita sylinterin seinämän läpi siirtyvän lämpövirran tiheyden määrittävistä yhtälöistä 3 ja 16, joissa lämmön virtaussuunta huomioidaan ainoastaan määrittämällä lämpötilaero yhtälön osoittajaan. Yhtälön nimittäjä pysyy muuttumattomana, jolloin terminen resistanssi ei ota huomioon virtaussuuntaa. Likaantuvamman virtauksen voitiin molemmissa tilanteissa todeta olevan *Virtaus A:n* puolella eli TF-putkilämmönvaihtimessa merivesipuolella ja TH-, TQ- ja TG-lämmönvaihtimissa boorivesipuolella. Tällöin samaa laskentaperiaatetta (yhtälö 43) voitiin käyttää kaikille koestettaville putkilämmönvaihtimille. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen

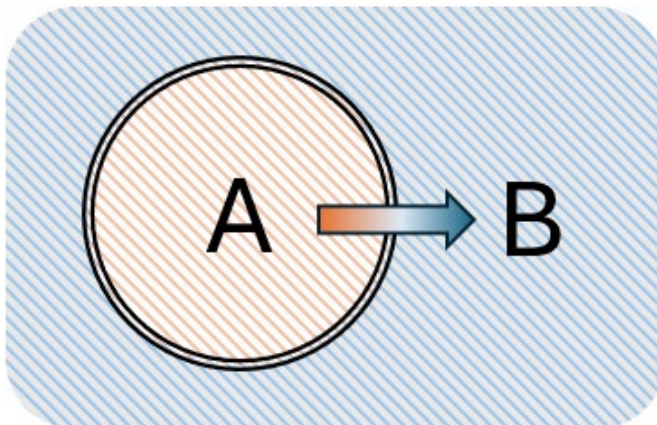
alaindeksi A kuvaa "Virtaus A":ksi nimettyä lämmönvaihtimen puolta eli putkilämmönvaihtimilla putkipuolta ja alaindeksi B puolestaan "Virtaus B":tä eli putkilämmönvaihtimilla vaippapuolta.

$$U_{ekstr.,putki} = \frac{1}{\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \cdot \frac{1}{h_A \cdot x_{A,s \rightarrow r} \cdot x_{A,s \rightarrow k}} + \frac{r_{ulko}}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \right) + \frac{1}{h_B \cdot x_{B,s \rightarrow r}} \right)} \quad (43)$$

jossa	$U_{ekstr.}$	ekstrapoloitu U-arvo	[W/(m ² °C)]
	r	säde	[m]
	h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² °C)]
	$x_{a \rightarrow b}$	korjauskerroin	[-]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/(m°°C)]



Kuva 17. Virtaussuunta TF-putkilämmönvaihtimilla



Kuva 18. Virtaussuunta TH-, TQ- ja TG-lämmönvaihtimilla

5.4 Laskentavaihe 3: Meriveden maksimilämpötilan määrittäminen

Hätälämmönsiirtoketjun laskennan viimeinen vaihe suoritettiin ainoastaan TF-lämmönvaihtimien kohdalla, kun koestetaan hätälämmönsiirtoketjua. Puhtaan välijäähdytyspiirin on pystyttävä suunnitteluperusteisessa onnettomuustilanteessa siirtämään reaktorista vapautuva jälkilämpöteho meriveteen ylittämättä puhtaan välijäähdytyspiirin lämmönvaihtimien jälkeistä korkeinta sallittua hyväksymisrajaa. TF-piirille on määritetty tämä maksimilämpötila, jotta varmistetaan, että hätäjäähdytysjärjestelmien pumppuhuoneen jäähdytys pysyy riittävänä. (Fortum Power & Heat Oy, 2019.) Laskennassa määritettiin korkein meriveden lämpötila, jolla saadaan onnettomuustilanteessa siirrettyä reaktorin jälkilämpöteho lopulliseen lämpönieluun, ylittämällä järjestelmille asetettua lämpötilarajoitusta. Laskennassa hyödynnettiin kolmea lämpötehon yhtälöä, jotka käsittävät kokonaistehon laskennan (yhtälö 44) sekä kuuman (yhtälö 45) ja kylmän (yhtälö 46) puolen lämpötehojen laskennan.

$$\phi_{tot} = UA\Delta T_{log} \quad (44)$$

jossa	ϕ_{tot}	kokonaislämpöteho	[W]
	U	lämmönläpäisykerroin, U-arvo	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]

$$\phi_{TF} = q_{m,TF}c_p(T_{TF,in} - T_{TF,out}) \quad (45)$$

$$\phi_{VF} = q_{m,VF}c_p(T_{VF,out} - T_{VF,in}) \quad (46)$$

jossa	ϕ	lämpöteho	[kW]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°°C)]
	T	lämpötila	[°C]

Hätälämmönsiirtoketjun koestustilanteessa ei päästä stationääriseen tilanteeseen TTKE-rajoitusten vuoksi, mutta laskenta suoritettiin aiempien laskentojen

tapaan tällä olettamalla laskennan yksinkertaistamiseksi. Tilan ollessa stati-onäärinen, voitiin kokonaistehon sekä kuuman ja kylmän puolen tehojen olet-taa olevan yhtä suuret yhtälön 47 mukaisesti. Tehon arvon voitiin todeta ole-van yhtä suuri kuin suunnitteluperusteisessa onnettomuustilanteessa mereen siirrettävän analyysiperusteisen lämpötehon arvon.

$$\phi_{tot} = \phi_{TF} = \phi_{VF} = \phi_{mereen} \quad (47)$$

jossa ϕ lämpöteho [kW]

Lämmönsiirtimien kokonaistehon eli onnettomuustilanteen analyysiperustei-sen lämpötehon ϕ_{mereen} ja TF-puolen hyväksymisrajan mukaisen ulostuloläm-pötilan $T_{TF,out}$ lisäksi yhtälöiden 44, 45 ja 46 tekijöistä tiedossa olivat lämmön-vaihtimien lämmönsiirtopinta-alat, luvussa 5.1 laskettu ekstrapoloitu U-arvo, referenssitilanteen mukaiset massavirran arvot sekä referenssitilanteen keski-lämpötilojen mukaan lasketut kylläisen veden ominaislämpökapasiteetit. Las-kennoissa tuli selvittää TF-puolen sisäänvirtauslämpötila $T_{TF,in}$ sekä VF-puolen sisään- ja ulosvirtauslämpötilat $T_{VF,in}$ ja $T_{VF,out}$. TF-puolen ulosvirtauslämpötilan määrittämiseksi hyödynnettiin yhtälöä 45, josta ratkaistiin $T_{TF,in}$ yhtälön 48 mu-kaan.

$$T_{TF,in} = \frac{\left(\frac{\phi_{mereen}}{q_{m,TF,ref}} + T_{TF,out} \cdot c_{p,ref} \right)}{c_{p,ref}} \quad (48)$$

jossa	T	lämpötila	[°C]
	ϕ	lämpöteho	[kW]
	q_m	massavirta	[kg/s]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°C)]

VF-puolen sisäänmeno- ja ulostulolämpötilat määritettiin muodostamalla yhtä-löpari yhtälöistä 44 ja 46. Näistä jälkimmäinen määritettiin Laskenta-välileh-delle nimellä *Yhtälö 1* ja ensimmäinen nimellä *Yhtälö 2*. Sisäänmenolämpötila merkittiin muuttujaksi T_x ja ulostulolämpötila muuttujaksi T_y . Molemmat solut merkittiin yhteisellä solualueen nimellä "muuttujasolut". Yhtälöparin lasken-

nassa hyödynnettiin Excelin Ratkaisin-apuohjelmaa (Solver). Apuohjelman toiminnan vuoksi yhtälöt tuli muuttaa muotoon, jossa yhtälöiden ratkaisuna on nolla. *Yhtälö 1* saatiin yhtälön 49 mukaiseen muotoon ja *Yhtälö 2* puolestaan yhtälön 50 mukaiseen muotoon.

$$0 = q_{m,koestus,VF} \cdot c_p \cdot T_y - q_{m,koestus,VF} \cdot c_p \cdot T_x - \phi_{mereen} \quad (49)$$

joissa	q_m	massavirta	[kg/s]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°C)]
	T_y	muuttujasolu, ulostulolämpötila	[°C]
	T_x	muuttujasolu, sisäänmenolämpötila	[°C]
	ϕ	lämpöteho	[kW]

$$0 = U_{ekstr} \cdot A \cdot \frac{((T_{TF,in} - T_y) - (T_{TF,out} - T_x))}{\ln\left(\frac{(T_{TF,in} - T_y)}{(T_{TF,out} - T_x)}\right)} - \phi_{mereen} \quad (50)$$

joissa	U_{ekstr}	ekstrapoloitu U-arvo	[W/(m ² °C)]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	T	lämpötila	[°C]
	T_y	muuttujasolu, ulostulolämpötila	[°C]
	T_x	muuttujasolu, sisäänmenolämpötila	[°C]
	ϕ	lämpöteho	[W]

Excelin yläpalkin Tiedot-välilehdeltä löytyvään Ratkaisin-apuohjelmaan asetettiin tavoitteeksi, että *Yhtälö 1*:n arvoksi halutaan luku nolla, muuttamalla muuttujasolujen arvoja. Reunaehdoksi määriteltiin, että myös *Yhtälö 2*:n arvon tulee olla nolla. Ratkaisumenetelmäksi valittiin *GRG Nonlinear*, jota hyödynnetään epälineaaristen ratkaisinongelmien ratkaisemiseksi. Painamalla *Ratkaise*-näppäintä, ratkaisee apuohjelma yhtälöryhmän edellä mainittujen ehtojen mukaisesti. Tulokseksi saatiin jäähdytteen ulostulolämpötila $T_{VF,in}$ sekä tärkeämpänä muuttujana korkein meriveden lämpötila $T_{VF,in}$, jolla saadaan siirrettyä onnettomuustilanteen lämpöteho mereen ilman, että TF-piirin ulostulolämpötila nousee sallittua lämpötilaa korkeammaksi.

6 YHTEENVETO TYÖN TULOKSISTA

Opinnäytetyössä kehittämistehtävänä oli luoda Loviisan voimalaitoksella käytössä olevalle koestettavien lämmönvaihtimien kunnonvalvontaohjelmalle vaihtoehtoinen laskentatyökalu Excel-taulukkolaskentaohjelmaa hyödyntäen. Opinnäytetyössä luotiin käyttäjän näkökulmasta yksinkertainen laskentatyökalu, taustalla toimiva laskenta on selkeästi dokumentoitu sekä helposti tarkistettavissa ja päivitettävissä.

Laskentatyökalun kehittämisessä keskityttiin siihen, että laskenta perustuu kirjallisuudesta löytyvään teoriaan ja laskentamenetelmiin. Tällä tavoin laskennoissa käytettyjen yhtälöiden oikeellisuus voidaan todentaa alan kirjallisuutta hyödyntäen.

6.1 Laskentatyökalun jatkokehitys

Tässä työssä toteutetussa U-arvon ekstrapoloinnissa keskeisenä tekijänä ovat tehdaspuhtaalle lämmönvaihtimelle määritetyt konvektiiviset lämmönsiirtoker-toimet. Laskentatyökalun luotettavan käytön kannalta on välttämätöntä, että kyseinen arvo on ajan tasalla. Tämän vuoksi jatkokehityksenä ehdotetaan, että jokaiselle koestettavalle lämmönvaihtimelle määritetään esimerkiksi pro-sessisimulaatiojärjestelmää hyödyntäen tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen konvektiiviset lämmönsiirtoker-toimet h_{suun} , molemmille puolille lämmönvaihdinta. Määrittäessä tulee hyödyntää esimerkiksi toimittajien alkuperäisiä asiakirjoja, joista ilmenee tehdaspuhtaan lämmönvaihtimen sisään- ja ulosvir-tauslämpötilat sekä massavirtaukset. Konvektiivisten lämmönsiirtoker-toimien määrityksen jälkeen tulee nykyisistä lähtöarvoista poikkeavat arvot päivittää Lähtötietoja-välilehden h_{suun} -sarakkeeseen. Konvektiivisten lämmönsiirtoker-toimien määritys tulee mahdollisten laitosmuutosten myötä toteuttaa uudelleen.

Lähtötietoja-välilehden lämmönvaihtimia koskevat tiedot on kopioitu nykyisen LVKUNVAL-laskentaohjelman tietokannasta. Laskennan tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi suositeltavaa on, että näiden arvojen ajantasaisuus tarkistetaan. Myös näiden tietojen päivitys tulee tehdä Lähtötietoja-välilehdelle mahdollisten laitosmuutosten myötä.

6.2 Työn arviointi

Opinnäytetyössä onnistuttiin kehittämään laskentatyökalu, jolla korjattiin nykyiseen laskentaohjelmaan liittyvät ongelmat, kuten dokumentoinnin puutteellisuus ja tämän myötä laskennan haastava tarkistettavuus sekä ohjelman hankala päivitettävyyden ja käyttö. Excel-taulukkolaskentaohjelmaa käyttämällä laskennan luettavuudesta saatiin nykyistä helpompaa.

Uusi laskentatyökalu luotiin käyttäjän kannalta nykyistä selkeämmäksi niin, että käyttäjän tarvitsee koestustietoja syöttääkseen sekä tuloksia tarkastellakseen käsitellä ainoastaan yhtä taulukkolaskentaohjelman välilehteä, jossa esillä on ainoastaan koestuksen kannalta oleelliset tiedot. VBA-ohjelmoinnin avulla lisättiin toimintoja, joilla saatiin laskentatyökalu käyttäjän kannalta mahdollisimman sujuvatoimiseksi ja helppokäyttöiseksi. Laskentatyökalun käyttäjän käyttöohje on esitetty liitteessä 1.

Laskentatyökaluun lisättiin erilaisia käyttöä helpottavia ja laskentaa sujuvoittavia toimintoja sekä kitkettiin sen käyttöön liittyviä ongelmia hyödyntäen VBA-ohjelmoinnin lisäksi laskentasoluihin lisättyjä ehto- ja vertailufunktioita. Ohjelmointikielen käyttö sekä solujen funktiot voivat lisätä haastetta laskentatyökalun päivittäjälle, mutta tätä pyrittiin helpottamaan soluja sekä solualueita nimeämällä, jolloin sekä ohjelmointikielen että soluissa kaavarivillä esiintyvien funktioiden lukeminen helpottuu. Esimerkki solujen nimeämislogiikasta on esitetty liitteessä 4. Ohjelmointikielen lukemista helpotettiin lisäämällä ohjelmointikoodin sekaan kommentteja, joissa kerrotaan jokaisen VBA-ohjelmoinnilla toteutetun toiminnon tavoitteet. VBA-ohjelmoinnin avulla toteutetuista toiminoista on kirjoitettu tarkemmin päivittäjän ja tarkastajan käyttöohjeeseen, joka on esitetty liitteessä 2. Excel-tiedoston Laskenta-välilehdelle lisättiin laskennassa esiintyvät yhtälöt näkyviin sekä muita laskentavaiheiden seuraamista helpottavia lisätietoja. Tällä mahdollistettiin se, että laskennan vaiheita voidaan tarkastaa myös ilman erillisen käyttöohjeen lukemista. Esimerkki Laskenta-välilehdelle lisätyistä yhtälöistä ja lisätiedoista on esitetty liitteessä 4.

Excel-taulukkolaskentaohjelman voitiin kaikin puolin todeta olevan soveltuva ohjelma uuden laskentatyökalun toteuttamiseksi, sen mahdollistaessa selkeän laskenta-alustan lisäksi paljon erilaisia toimintoja. VBA-ohjelmoinnin sekä laskentasoluihin lisättyjen funktioiden avulla koestukseen liittyvä laskentaprosessi saatiin toimimaan molempien laitossyksiköiden sekä kaikkien koestettavien lämmönvaihtimien osalta yhdellä yhteisellä välilehdellä ja toisaalta tietojen siirtävän sujuvasti välilehdeltä toiselle käyttäjän syöttämien koestustietojen mukaan.

Opinnäytetyön kautta pääsi syventymään lämmönvaihtimiin liittyvään teoriaan sekä laskentaan. Toisaalta työ opetti sen, että opitut tiedot ja taidot ovat vasta pieni osa lämmönsiirrosta. Laskentatyökalun tekeminen syvensi Excel-taulukkolaskentaohjelman käyttöön liittyviä taitoja ja opetti uutena taitona VBA-ohjelmoinnin ja ohjelmointikielen käytön sekä siihen liittyvän tiedonhaun periaatteet. Näiden taitojen avulla jatkossa on mahdollista ratkoa Excelin toimintoihin liittyviä erilaisia haasteita ja ongelmia.

LÄHTEET

Alfa Laval. 2004. The theory behind heat transfer. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/alfa_laval_heating_and_cooling_hub_the_theory_behind_heat_transfer.pdf [viitattu 8.8.2024].

Alfa Laval. 2019. Tiivisteelliset levylämmönvaihtimet. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/instruction-manuals/instruction-manual-alfa-laval-clipline-and-frontline-finnish.pdf> [viitattu 8.8.2024].

Sandberg, J. 2004. Säteily- ja ydinturvallisuus, osa 5. Hämeenlinna: Karisto. E-kirja. Saatavissa: <https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja5-2-ydinturvallisuus-ydinvoimalaitostekniikan-perusteita.pdf> [viitattu 19.9.2024].

Fortum. 2024a. Energiantuotantomme. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotanto/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto-tehokkaampaa-sahkontuotantoa> [viitattu 25.5.2024].

Fortum. 2024b. Loviisan ydinvoimalaitoksen yleisesitys: Vakaata ja puhdasta sähköä Suomen tarpeisiin, pitkälle tulevaisuuteen. PDF-dokumentti. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum. 2024c. Toimintamme perusta ja strategia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/strategia> [viitattu 25.5.2024].

Fortum. 2024d. Voimalaitoksen toiminta. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotanto/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/voimalaitoksen-toiminta> [viitattu 25.5.2024].

Fortum Power & Heat Oy. 2019. FSAR 9.2.2.1 Puhdas välijäähdytyspiiri TF10. Sisäinen asiakirja.

Fortum Power & Heat Oy. 2021. FSAR 01.2 Laitoksen yleiskuvaus. Sisäinen asiakirja.

Fortum Power & Heat Oy. 2022. Yleiskuvaus: TG Polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmä. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum Power & Heat Oy. 2023a. Turvallisuustekniset suunnitteluperusteet. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum Power & Heat Oy. 2023b. Yleiskuvaus: RR Primääripiirin seisontajäähdytysjärjestelmä. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum Power & Heat Oy. 2023c. Yleiskuvaus: Vara-RR Primääripiirin seisontajäähdytysjärjestelmä. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum Power & Heat Oy. 2023d. Yleiskuvaus: XU Terässuojakuoren ulkopuolinen ruiskutusjärjestelmä. Sisäinen koulutusmateriaali.

Fortum Power & Heat Oy. 2024. Loviisa 1: Turvallisuustekniset käyttöehdot. Sisäinen asiakirja.

Incropera, F., DeWitt, P., Bergman, T. & Lavine A. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. painos. New York: John Wiley & Sons, Inc. PDF-tiedosto. Saatavissa: <https://hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf> [viitattu 8.10.2024].

IQS Directory. s.a. Shell and Tube Heat Exchangers. WWW-sokumentti. Saatavissa: <https://www.iqsdirectory.com/articles/heat-exchanger/shell-and-tube-heat-exchangers.html> [viitattu 7.6.2024].

Medium. 2021. The Normal Distribution vs. Student's T-distribution. WWW-dokumentti. Päivitetty 28.5.2021. Saatavissa: <https://tjkyner.medium.com/the-normal-distribution-vs-students-t-distribution-322aa12ffd15> [viitattu 28.8.2024].

Peacesoftware s.a. Online calculation of properties of water and steam. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.peacesoftware.de/einige-werte/wasser_dampf_e.html [viitattu 18.8.2024].

Precisa. 2024. What is the Difference between Accuracy and Precision Measurements. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.precisa.com/article/what-is-the-difference-between-accuracy-and-precision-measurements/> [viitattu 28.8.2024].

Fichot, F., Seiler, J.M., Trambauer, K. & Mueller, C. 2012. In-Vessel Core Degradation: Radiation Heat Transfer. Teoksessa Seghal B. R. (toim.) Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology. Academic Press; 1st edition

SFS-EN ISO 5167-1. 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular crosssection conduits running full. Part 1: General principles and requirements.

STUK. s.a. Ydinturvallisuusohjeet. Säteilyturvakeskus WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://stuk.fi/yvl-ohjeet> [viitattu 31.5.2024].

STUK. 2023. Säteilyturvakeskuksen arvio Loviisan ydinvoimalaitoksen käytön jatkamisesta vuosista 2027 (LO1) ja 2023 (LO2) eteenpäin. Säteilyturvakeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://stuk.fi/documents/150192312/163651389/STUK-Loviisa-k%C3%A4ytt%C3%B6lupa-turvallisuusarvio-2023.pdf/2e282e0d-643c-807c-b74c-263c7109ea62/STUK-Loviisa-k%C3%A4ytt%C3%B6lupa-turvallisuusarvio-2023.pdf?t=1685608557709> [viitattu 29.7.2024].

Stuklex. s.a. Määritelmät. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stuklex.fi/maaritelmat> [viitattu 12.9.2024].

Stuklex. 2019. Ydinvoimalaitosten käyttötoiminta. YVL A.6. WWW-dokumentti. Päivitetty 15.6.2019. Saatavissa: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-6> [viitattu 31.5.2024].

Unacademy. 2024. Classification Of Measurement Errors. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://unacademy.com/content/upsc/study-material/mathematics/classification-of-measurement-errors/> [viitattu 28.8.2024].

Werner Sölken. 2024. Heat Exchangers TEMA Design. WWW-dokumentti. https://www.wermac.org/equipment/heatexchanger_part5.html [viitattu 9.6.2024].

Käyttöohje: Laskentatyökalun käyttäjälle

Avaa Koestusten_laskenta-Excel-tiedosto. Tiedostossa aukeaa automaattisesti Koestustietojen syöttö -välilehti, johon koestettavan lämmönvaihtimen tiedot sekä koestuksessa mitatut arvot syötetään. Päivämäärä ja kellonaika päivittyvät sivulle automaattisesti.

Täytä Koestustietojen syöttö -välilehden tiedot seuraavasti (kuva 1):

Kuva 1. Koestustietojen syöttäminen

1. Valitse alasvetovalikoista seuraavat tiedot: laitos, järjestelmä, redundanssi sekä koestukseen osallistuva lämmönvaihdin/-vaihtimet.

Laitos: LO1, LO2

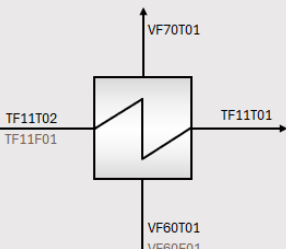
Järjestelmä: TH, TQ, TG, TF, XU, RR

Redundanssi: RED 1, RED 2, Tyhjä valinta

Koestettavat lämmönvaihtimet: Lämmönvaihtimien käyttöpaikkatunnukset (TF 2 kpl, muut 1 kpl)

Redundanssin sekä lämmönvaihtimien käyttöpaikkatunnuksien alasvetovalikoiden vaihtoehdot päivittyvät edellisten alasvetovalikoiden valintojen perusteella.

Kun redundanssi on valittu, päivittyvät mittausten tunnuksat SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT -taulukon sekä välilehdellä olevaan lämmönvaihtimien periaatekuvaan, kuvan 2 esimerkin mukaisesti.



VALITSE ALASVETOVALIKOISTA:	
Laitos	LO2
Järjestelmä	TF
Redundanssi	RED 1
Koestettavat lämmönvaihtimet (max. 2)	

SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT:		VF	
VF60T01			°C
VF70T01			°C
VF60F01			kg/s
		TF	
TF11T02			°C
TF11T01			°C
TF11F01			kg/s

Kuva 2. Mittaustunnusten päivittyminen alasettovalikoiden valintojen mukaan

2. Täytä koestuksessa mitatut lämpötilojen ja virtausmittausten arvot SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT -taulukoon.

Mikäli lämpötilan arvot syötetään virheellisesti niin, etteivät ne ole vastavirtalämmönsiirtimelle realistisia, varoittaa laskentatyökalu tästä kuvan 3 mukaisesti.

SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT:	VF		
RR30T01	50,00	°C	RR ulostulolämpötilan tulee olla VF sisäänmenolämpötilaa suurempi
RR30T04	20,00	°C	
RLXXF01	120,00	kg/s	VF ulostulolämpötilan tulee olla VF sisäänmenolämpötilaa suurempi
		RR	
VF63T01	40,00	°C	
VF63T02	45,00	°C	
VF63F01	100,00	kg/s	

Kuva 3. Virheellisten lämpötilan arvojen syöttäminen

3. Paina LASKE-painiketta saadaksesi tulokset. Mikäli LASKE-painiketta painaessa jokin SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT -taulukon soluista on valittuna painiketta painaessa, tulee LASKE-painiketta painaa toisen kerran laskennan aktivoitumiseksi.

- Koestettaessa TH-, TQ-, TG- ja XU-lämmönvaihtimia, saadaan tulokseksi U-arvo onnettomuustilanteessa [$W/(m^2\text{°C})$].
- Koestettaessa RR-lämmönvaihdinta, saadaan tulokseksi lämpöteho onnettomuustilanteessa.
- Koestettaessa TF-lämmönsiirintä (häätälämmönsiirtoketju), saadaan tulokseksi lämmönsiirtokyky [$W/(m^2\text{°C})$] sekä korkein meriveden lämpötila, jolla saadaan siirrettyä DBA-tilanteessa siirrettävä lämpöteho merivedeen ilman, että välijäähdytyspiirin lämmönvaihtimen jälkeinen lämpötila ylittää sallitun lämpötilan ylärajan.

→ Huom. Jos hätälämmönsiirtoketjun koestukseen (TF-lämmönsiirtimen koestus) liittyvän meriveden maksimilämpötilan laskeamisen kanssa on Excelin Ratkaisin-apuohjelman toimintaan liittyviä ongelmia, niin Excel varoittaa tästä kuvan 4 mukaisesti. Paina hyperlinkistä, jolloin näkymä siirtyy Laskenta-välilehden "Laskentavaihe 3"-kohtaan (kuva 5). Toimi ohjeiden mukaisesti muuttamalla *Solver x:n* tai *Solver y:n* arvoa manuaalisesti. Siirry takaisin Koestustietojen syöttö -välilehdelle ja paina uudelleen LASKE-painiketta.

TULOKSET:		
	5 644,21	W/(m ² °C)
	33,8	°C

Ilmeni virhe. Tarkista laskenta Laskenta-välilehdeltä (Laskentavaihe 3).

Kuva 4. Varoitus Ratkaisin-apuohjelman ongelmasta Koestustietojen syöttö -välilehdellä

LASKENTAVAIHE 3: HÄTÄLÄMMÖNSIIRTOKETJU (vain TF-lämmönvaihtimen koestuksessa); KORKEIMMAN SALLITUN MERIVEDEN LÄMPÖTILAN (TVF,in) MÄÄRITYS		
TF,N ONNETTOMUUSTILANTEESSA		
Φ _{mereen}	32 000 000	W
Φ _{mereen}	32 000	kW
TF _{,in}	62,15	°C
Yhtälo 1	39652,98	
Yhtälo 2	#LUKU!	
Kun painetaan Koestustietojen syöttö -välilehdellä Laske-näppäintä, yhtälöiden 1 ja 2 arvojen tulee olla 0, jotta laskenta toimii		
TVF _{,out (solver y)}	75,8	°C
TVF _{,in (solver x)}	33,8	°C
Muuta T _{VF,out (solver y)} -solan arvo T _{TF,in} -solan arvoa pienemmäksi ja paina uudelleen LASKE-painiketta.		

Kuva 5. Ohjeistus Ratkaisin-apuohjelmaan liittyvän ongelman korjaamiseksi

4. Lisää tarvittaessa lisätietoja koestuksesta *Kirjaa lisätietoja koestuksesta (valinnainen)* -kenttään. Kirjaus tallentuu Tulosarkisto-välilehdelle.

5. Paina TALLENNA TULOSARKISTOON -painiketta tallentaaksesi tiedot Tulosarkisto-välilehdelle. Tulosarkistoon tallentuvat seuraavat tiedot:

- Päivämäärä ja aika
- Alasvetovalikoiden tiedot
- Mittaustunnukset mitta-arvoineen
- Tulokset
- Lisätiedot koestuksesta

Tulosarkisto-välilehdelle tallennettuja tietoja voidaan lajitella ja rajata otsikkokenttiin lisättyjen suodattimien avulla. Näin voidaan tarkastella esimerkiksi tietynä ajankohtana tai tietyllä laitoksella tai lämmönvaihtimella tehtyjä koestuksia. Huomioi, että taulukon suojaus tulee poistaa tietojen lajittelua tai suodattamista varten (*Tarkista > Poista taulukon suojaus*).


6. Mikäli laskenta halutaan toistaa uusilla koestustiedoilla, voit tyhjentää kaikki kentät painamalla TYHJENNÄ KENTÄT -painiketta. Muussa tapauksessa voit tallentaa ja sulkea tiedoston, jolloin Koestustietojen syöttö -välilehti aukeaa automaattisesti tyhjänä, kun tiedosto seuraavalla kerralla avataan.

Käyttöohje: Laskentatyökalun tarkastajalle/päivittäjälle

LASKENTATYÖKALUN TARKASTAMIEN

Excel-tiedoston kaikki välilehdet ovat suojattu, joten kaavoja tarkastelua tai solujen muokkaamista varten tulee valita *Tarkista > Poista taulukon suojaus*. Suojaus menee itsestään takaisin päälle, mikäli jokin makro (esim. Koestustietojen syöttö -välilehden painikkeet) aktivoidaan tai tiedosto avataan uudelleen. Vaihtoehtoisesti asiakirjan voi halutessaan tarkastelun jälkeen suojata painamalla *Tarkista > Suojaa taulukko > OK*.

Laskenta-välilehdellä laskenta etenee pääasiassa välilehden vasemmassa reunassa (pl. mittausten virhetarkastelu). Päälaskennan oikealla puolella on esimerkiksi laskennassa hyödynnettäviä kertoimia ja välivaiheiden laskentoja, kuten logaritmisien lämpötilaeron laskenta tai sovitepolynomien kertoimia, jotka ovat linkitetty päälaskentaan. Laskenta-välilehti koostuu ensin taulukosta, jossa on koestettavan lämmönvaihtimen laskennassa käytettäviä lähtötietoja. Tämän jälkeen on lämpötila- ja virtausmittauksen virhetarkasteluun liittyvä laskenta, minkä jälkeen on laskentavaiheet 1-3. Laskentavaiheessa 1 lasketaan koestustilanteen lämmönsiirtokapasiteetti. Laskentavaiheessa 2 lasketaan onnettomuustilanteen lämmönsiirtokapasiteetti. Laskentavaiheessa 3 selvitetään korkein mahdollinen meriveden lämpötila, jolla saadaan siirrettyä DBA-tilanteessa lämpöteho mereen, ylittämättä TF-lämmönvaihtimen jälkeistä maksimilämpötilaa. Laskentavaihe 3 koskee ainoastaan TF-lämmönvaihtimen (hätälämmönsiirtoketju) koestusta. Jokaisen laskentavaiheen tulos on korostettu täyttämällä tulossolu vihreällä sävyllä.

Laskenta-välilehdellä olevassa laskennassa käytettyjä yhtälöitä voidaan tarkastella painamalla C-sarakkeen yläpuolella olevaa -merkkiä, jolloin yhtälöt ilmestyvät näkyviin B-sarakkeeseen. Tällä on pyritty mahdollistamaan laskennan tarkastaminen suoraan Excel-tiedostoa hyödyntäen, ilman erillisen ohjetiedoston käyttöä. Taulukon suojaus tulee poistaa yhtälöiden tarkastelua varten. Laskenta-välilehdelle on lisätty erillinen POISTA TAULUKON SUOJAUS -painike suojauksen poistamiseksi.

Solujen ja solualueiden nimeämisellä on pyritty helpottamaan kaavojen lukemista ja laskentojen tarkastamista. Solujen nimiä voidaan tarkastella, valitsemalla *Kaavat > Nimien hallinta*.

Huomioi, että Laskenta- ja Lähtötietoja-välilehtien taulukoissa vasemman puoleinen virtaus on nimetty *Virtaus A*:ksi ja oikeanpuoleinen *Virtaus B*:ksi. Koestustietojen syöttö -välilehden SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT -taulukon yläosaan laskentatyökalu hakee Lähtötietoja-välilehdeltä Virtaus A:n tiedot ja taulukon alaosaan Virtaus B:n tiedot. Termit A ja B esiintyvät solujen nimeämiskäytännössä. Esimerkiksi solun nimi "dT_A_koestus" kuvaa Virtaus A:n (esim. TF-lämmönvaihtimella VF-puolen virtaus) koestustilanteen mukaisten ulostulo- ja sisäänmenolämpötilojen eroa.

LASKENTATYÖKALUN PÄIVITTÄMINEN

Lähtöarvojen päivitys tehdään Lähtötietoja-välilehdeltä tai Sovitepolynomit-välilehdeltä. Laskenta-välilehden lähes kaikki arvot ovat joko linkitetty muista soluista, muilta välilehdiltä tai muodostuvat soluihin luotujen kaavojen tai Excelin funktioiden kautta, minkä vuoksi laskentavälilehtien lukuarvoihin ei työkalua päivitettäessä tarvitse lähtökohtaisesti tehdä muutoksia.

Mikäli muutoksia tehdään, on tärkeää huomioida, että putkilämmönvaihtimilla *Virtaus A* kuvaa aina lämmönvaihtimen putkipuolta ja *Virtaus B* puolestaan vaippapuolta. Levylämmönvaihtimilla puolestaan *Virtaus A* kuvaa aina lämmönvaihtimen kylmää puolta ja *Virtaus B* kuumaa puolta. Näin laskentalogiikka ja solujen väliset linkitykset toimivat oikein. Ennen muutosten tekemistä on myös tarkistettava, sisältääkö solu kaavoja, ehtoja (valitse muokattava solu ja valitse: *Aloitus > Ehdollinen muotoilu > Sääntöjen hallinta*) tai onko soluun käytetty kelpoisuussääntöjä (*Tiedot > Datatyökalut: Tietojen kelpoisuuden tarkastaminen*), jotta varmistetaan, että muutokset päivitetään tarvittaessa myös näihin. Muutoksia tehdessä tulee myös varmistaa, vaikuttaako kyseinen muutos VBA-ohjelmointikoodin (*Kehitystyökalut > Visual Basic*) toimintaan.

Solujen nimiä voidaan tarvittaessa muuttaa valitsemalla *Kaavat > Nimien hallinta* ja valitsemalla solu, jonka nimeä muutetaan. Päivitetty nimi muuttuu tällöin automaattisesti kaikkiin soluihin, joihin se on linkitetty. Huomioi, ettei solun nimi vaihdu VBA-ohjelmointikoodiin, jolloin vaihdettu solun nimi tulee manuaalisesti muuttaa, mikäli se esiintyy ohjelmointikielessä. Taulukon suojaus tulee poistaa ennen solujen nimeämistä.

Soluissa on käytetty pääasiassa "=XHAKU()"-funktiota tietojen hakemiseksi toisista soluista tai toisilta välilehdiltä. Useissa soluissa haku toteutetaan niin, että haettavan tiedon pitää täyttää useampi kriteeri. Esimerkiksi Laskenta-välilehden ensimmäiseen taulukkoon laskentatyökalu hakee tiedot sekä laitoksen (LO1/LO2) että järjestelmän (TH/TQ/TG/TF/XU/RR) perusteella Lähtötietoja-välilehdeltä.

Useissa soluissa on käytetty "=JOS()"-funktiota esimerkiksi siihen, että laskenta tunnistaa, koestetaanko putki- vai levylämmönvaihdinta sekä siihen, että laskenta tunnistaa, kumpi on lämmönvaihtimen kylmä ja kumpi kuuma puoli.

Muilla laskennassa esiintyvillä funktioilla on luotu toimintoja, joilla mahdollistetaan yhteinen Laskenta-välilehden käyttö molempien laitosten kaikkien lämmönvaihtimilla.

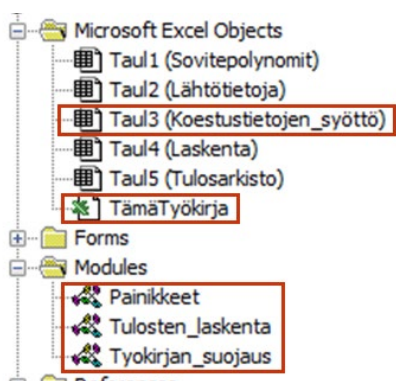
Koestustietojen syöttö -välilehden alasvetovalikoiden tiedot laskentatyökalu hakee Lähtötietoja-välilehdeltä tietojen kelpoisuuden tarkastamissääntöjä hyödyntäen (*Tiedot > Tietojen kelpoisuuden tarkastaminen*). *Koestettavat lämmönvaihtimet* -alasetovalikko poikkeaa muista alasvetovalikoista sillä, että tässä voidaan valita useampi vaihtoehto tai tarvittaessa poistaa tehtyjä valintoja. Tämä on toteutettu makrojen avulla.

VBA-ohjelmointi

Laskentatyökalussa on hyödynnetty Excelin VBA-ohjelmointikieltä (Visual Basic for Applications) tiettyjen toimintojen toteuttamiseksi. Laskentatyökalun solut on nimetty kaavojen sekä makrojen koodin luettavuuden helpottamiseksi. Lisäksi ohjelmakoodin joukkoon on lisätty kommentteja, joissa kerrotaan, mikä tavoite milläkin makrolla on.

Makroja pääsee tarkastelemaan ja muokkaamaan seuraavan Excel-tiedostossa olevan polun takaa: *Kehitystyökalut > Visual Basic*.

Makroja on lisätty kuvaan 6 punaisella korostettujen otsikoiden alle. Makrojen toiminnot on listattu otsikoittain kuvan alapuolelle.



Kuva 6. Makrot

a) Microsoft Excel Objects: Taul3 (Koestustietojen_syöttö)

Tämän otsikon alta löytyvät Koestustietojen syöttö -välilehdelle liittyvien toimintojen makrot.

Näitä toimintoja ovat:

- Mahdollisuus valita useampi lämmönvaihdin ja poistaa valintoja Koestustietojen syöttö -välilehden *Koestettavat lämmönvaihtimet* -alasetoalikkosta. Tätä hyödynnetään hätälämmönsiirtoketjun (TF) koestuksessa, jossa koestetaan kahta lämmönsiirintä rinnakkain.
 - Huom. Luettavuuden helpottamiseksi makroissa esiintyvät solut ovat nimetty, jolloin solujen siirtäminen ei normaalisti vaikuta makrojen toimintaan. Ainoa poikkeus on tässä makrossa esiintyvä "\$H\$8" (kuva 7), joka kuvaa solua, jossa Koestustietojen syöttö -välilehden Koestettavat -lämmönvaihtimet -alasetoalikko sijaitsee. Mikäli tämän solun siirretään, tulee soluosoite päivittää makroon.

```

Option Explicit

'Koestustietojen syöttö -välilehden Koestettavat lämmönvaihtimet -al

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

Dim oldValue As String
Dim newValue As String

Application.EnableEvents = True
On Error GoTo Exitsub
If Target.Address = "$H$8" Then
    If Target.SpecialCells(xlCellTypeAllValidation) Is Nothing Then
        GoTo Exitsub
    ElseIf Target.Value = "" Then
        GoTo Exitsub
    End If
End If

```

Kuva 7. Taul7 (Koestustietojen syöttö) -makron päivitys

- Koestustietojen syöttö -välilehdellä tiettyjen solujen valinnan tai arvon tyhjeneminen, mikäli koestuksen tietoja muutetaan:
 - Tulokset-taulukon solut tyhjenevät, mikäli laitosta, järjestelmää, redundanssia, koestettavia lämmönvaihtimia tai koestuksen mitausarvoja muutetaan.
 - Koestettavat lämmönvaihtimet -alasvetovalikon valinta tyhjenee, mikäli redundanssia muutetaan.
 - Koestettavat lämmönvaihtimet -alasvetovalikon sekä Redundanssi-alasvetovalikon valinnat tyhjenevät, mikäli valittua järjestelmää muutetaan.

b) Microsoft Excel Objects: Tämä työkirja

Tämän otsikon alta löytyvät koko työkirjan toimintaan liittyvät makrot.

Näitä toimintoja ovat:

- Koestustietojen syöttö -välilehden aukeaminen oletuksena, kun tiedosto avataan.
- Koestustietojen syöttö -välilehden alasvetovalikoiden valintojen sekä koestustietojen syöttö -taulukon solujen tyhjeneminen, kun tiedosto avataan.
- Laskenta-välilehden sovittaminen (sarakkeet A–T) sekä Koestustietojen syöttö -välilehden sovittaminen (sarakkeet A–O) kuvaruutuun, jolloin työkirjan auetessa näkymä pysyy samana, vaikka työkirjan avaisi erikokoisilla näytöillä.

c) Modules: Painikkeet

Tämän otsikon alta löytyvät Koestustietojen syöttö -välilehden LASKE-painikkeen, TALLENNA TULOSARKISTOON -painikkeen ja TYHJENNÄ KENTÄT -painikkeiden toimintoihin liittyvät makrot sekä Laskenta-välilehden POISTA TAULUKON SUOJAUS -painikkeen toimintaan liittyvät makrot.

LASKE

-painikkeen toimintoja ovat:

- Tulosten laskenta -moduulissa olevien makrojen aktivoiminen.

TALLENNA

TULOSARKISTOON

-painikkeen toimintoja ovat:

- Rivin lisääminen Tulosarkisto-välilehdelle, otsikkorivin jälkeen seuraavalle riville, jotta uudet tulokset tallentuvat joka kerta tulosarkiston ylimmälle riville.
- Koestustietojen syöttö -välilehdeltä päivämäärän ja ajan, laitoksen, järjestelmätunnuksen, redundanssin, mittaustunnusten, koestuksen mittaustulosten sekä laskentojen tulosten siirtäminen Tulosarkisto-välilehdelle.

TYHJENNÄ KENTÄT

-painikkeen toimintoja ovat:

- Koestustietojen syöttö -välilehden alasetovalikoiden sekä SYÖTÄ KOESTUSTIEDOT -taulukon mittaustietojen tyhjentäminen.

POISTA TAULUKON

SUOJAUS

-painikkeen toimintoja ovat:

- Laskenta-välilehden taulukon suojauksen poistaminen (huom. suojaus aktivoituu automaattisesti)

d) Modules: Tulosten_laskenta

Tämän otsikon alta löytyvät Koestustietojen syöttö -välilehden Tulokset-taulukon toimintaan liittyvät makrot. Tämän moduulin makroja ei ole liitetty suoraan painikkeisiin, vaan makrot käynnistetään käyttämällä Koestustietojen syöttö -välilehden LASKE-painiketta (Painikkeet-moduuli).

Tulosten laskenta -moduulin toimintoja ovat:

- Lämmönsiirtokyvyn / onnettomuustilanteen tehon laskentatuloksen tuominen Laskenta-välilehdeltä Koestustietojen syöttö -välilehden Tulokset-taulukkoon.
 - Mikäli koestetaan TH-, TQ-, TG-, TF- tai XU-lämmönvaihdinta, ilmestyy Tulokset-taulukkoon ekstrapoloitu U-arvo
 - Mikäli koestetaan RR-lämmönvaihdinta, ilmestyy Tulokset-taulukkoon onnettomuustilanteen teho

- TH-, TQ- ja TG-lämmönvaihtimien koestuksissa TF-puolen massavirta selvitetään laskennallisesti. Lasketun arvon tuominen Laskenta-välilehdeltä Koestustietojen syöttö -välilehdelle, mikäli koestetaan TH-, TQ- ja TG-lämmönvaihtimia.
- Ratkaisin-apuohjelman (*Solver*) käynnistäminen, mikäli koestetaan TF-lämmönvaihtinta. Selvitetään korkein mahdollinen meriveden lämpötila, jolla saadaan siirrettyä DBA-tilanteessa lämpöteho mereen, ylittämättä TF-lämmönvaihtimen jälkeistä maksimilämpötilaa.
 - Ratkaisin-apuohjelma tarjoaa ponnahdusikkunan joka kerta ratkaisun tehdessään. Tämän ponnahdusikkunan kuittaus on toteutettu makroilla.
 - Ratkaisin-apuohjelma saattaa muuttaa Excel-työkirjan laskennan automaattisesta manuaaliseksi, jolloin laskentatyökalu ei toimi toivotusti. Laskennan muuttaminen takaisin automaattiseksi on toteutettu makroilla.
 - Laskenta-välilehden "Laskentavaihe 3" otsikon alla oleva laskenta liittyy meriveden maksimilämpötilan laskentaan (kuva X). On havaittu, että mikäli ratkaisimella ratkaistavan muuttujan eli $T_{VF,out}$ (*solver y*) -solun arvo on suurempi kuin $T_{TF,in}$ -solun arvo, saattaa ratkaisin-apuohjelma jumittua, jolloin yhtälöiden 1 ja 2 arvoksi tulee jotain muuta kuin 0. Vastaavasti, mikäli ratkaisimella ratkaistavan muuttujan eli $T_{VF,in}$ (*solver x*) -solun arvo on suurempi kuin $T_{TF,out(max)}$ -solun arvo, saattaa ratkaisin-apuohjelma jumittua. Tämän estämiseksi on makrojen avulla luotu ohjelmointikoodi, joka muuttaa muuttujasolujen lukuarvot 10 yksikköä $T_{TF,in}$ ja $T_{TF,out(max)}$ -solujen arvoja pienemmiksi. Mikäli tämä ei jostain syystä toimi, saa käyttäjä Koestustietojen syöttö -välilehdelle ilmoituksen siitä, että laskennoissa on ilmennyt virhe ja käyttäjän tulee manuaalisesti muuttaa muuttujasolujen arvoja ohjeistuksen (kuva 8 ja 9) mukaisesti. Koestustietojen syöttö -välilehden ilmoituksessa on hyperlinkki, jota painamalla käyttäjä siirtyy suoraan Laskenta-välilehdelle *Laskentavaihe 3*:een.

LASKENTAVAIHE 3: HÄTÄLÄMMÖNSIIRTOKETJU (vain TF-lämmönvaihtimen koestuksessa): KORKEIMMAN SALLITUN MERIVEDEN LÄMPÖTILAN (TFV,in) MÄÄRITYS

TFV,in ONNETTOMUUSTILANTEESSA		
Φmereen	32 000 000	W
Φmereen	32 000	kW
TTF,in	60,68	°C

Mereen siirrettävä lämpöteho TF10		
Φmereen	32,00	MW

TF10-lämmönvaihtimen maksimi ulostulolämpötila		
TTF,out(max)	42,00	°C

Yhtälö 1 0,00

Yhtälö 2 0,00

Kun painetaan Koestustietojen syöttö -välilehdellä Laska-näppäintä, yhtälöiden 1 ja 2 arvot tulee olla 0, jotta laskenta (TF) toimii oikein.

TVF,out (solver y)	50,4	°C
TVF,in (solver x)	31,9	°C

Kuva 8. Laskentavaihe 3, kun laskenta onnistunut (yhtälöiden 1 ja 2 tulos on 0)

LASKENTAVAIHE 3: HÄTÄLÄMMÖNSIIRTOKETJU (vain TF-lämmönvaihtimen koestuksessa); KORKEIMMAN SALLITUN MERIVEDEN LÄMPÖTILAN (TVF,in) MÄÄRITYS

TF _{F,IN} ONNETTOMUUSILANTEESSA			Mereen siirrettävä lämpöteho TF10		
Φ _{mereen}	32 000 000	W	Φ _{mereen}	32,00	MW
Φ _{mereen}	32 000	kW			
TF _{F,IN}	60,68	°C			
TF10-lämmönvaihtimen maksimi ulostulolämpötila					
Yhtälö 1	18432,52		TF _{F,out(max)}	42,00	°C
Yhtälö 2	#LUKU!				
Kun painetaan Koestustietojen syöttö -välilehdellä Laske-näppäintä, yhtälöiden 1 ja 2 arvojen tulee olla 0, jotta laskenta (IF) toimii oikein.					
TVF _{F,out} (solver y)	61,0	°C	Muuta T_VF,out (solver y) -solan arvo T_TF,in-solan arvoa pienemmäksi ja paina uudelleen LASKE-painiketta.		
TVF _{F,in} (solver x)	31,9	°C			

LASKENTAVAIHE 3: HÄTÄLÄMMÖNSIIRTOKETJU (vain TF-lämmönvaihtimen koestuksessa); KORKEIMMAN SALLITUN MERIVEDEN LÄMPÖTILAN (TVF,in) MÄÄRITYS

TF _{F,IN} ONNETTOMUUSILANTEESSA			Mereen siirrettävä lämpöteho TF10		
Φ _{mereen}	32 000 000	W	Φ _{mereen}	32,00	MW
Φ _{mereen}	32 000	kW			
TF _{F,IN}	60,68	°C			
TF10-lämmönvaihtimen maksimi ulostulolämpötila					
Yhtälö 1	-30082,73		TF _{F,out(max)}	42,00	°C
Yhtälö 2	#LUKU!				
Kun painetaan Koestustietojen syöttö -välilehdellä Laske-näppäintä, yhtälöiden 1 ja 2 arvojen tulee olla 0, jotta laskenta (IF) toimii oikein.					
TVF _{F,out} (solver y)	51,0	°C	Muuta T_VF,in (solver x) -solan arvo T_TF,out-solan arvoa pienemmäksi ja paina uudelleen LASKE-painiketta.		
TVF _{F,in} (solver x)	50,0	°C			

Kuva 9. Laskentavaihe 3, jos laskennassa esiintyy virhe

Modules: Työkirjan_suojaus

Tämän otsikon alta löytyy koko työkirjan suojaukseen liittyvät toiminnot "unprotect" ja "protect". Toiminnolla suojataan työkirjan kaikki välilehdet lukuun ottamatta Koestustietojen syöttö -välilehden seuraavia osioita:

- Alasvetovalikon tiedot (*laitos, järjestelmä, redundanssi ja lämmönvaihtimet*).
- *Syötä koestustiedot* -taulukon syötettävien mittauslukemien kirjauskentät (6 kpl).
- *Kirjaa lisätietoja koestuksesta (valinnainen)* -kentän kirjoituskenttä.

Lukitus tai lukituksen poistaminen tehdään klikkaamalla hiiren oikealla painikkeella solua tai soluja ja valitsemalla *Muotoile solut... > Suojaus* ja valitsemalla "Lukitse".

Jokaisen makrokoodin alussa on termi "unprotect" ja lopussa "protect", mikä sallii makrojen käytön työkirjan suojauksesta huolimatta.

Laskentatyökalun Laskenta-välilehti

LÄMPÖTILAMITTAUKSEN VIRHETARKASTELU	
Otoskoko	20
Luottamustaso (confidence level)	95 %
T-jakauman kriittinen arvo	2,09

	VF	TF	
Keskivirhe (S)	0,09	0,09	°C
Virhemarginaali	0,19	0,19	°C

Koestuksen mittausarvot			
	VF	TF	
T _{in} ,mitattu	8,00	40,00	°C
T _{out} ,mitattu	20,00	15,00	°C

T _{in} ,virhekorjattu (ΔT)	8,19	39,81	°C
T _{out} ,virhekorjattu (ΔT)	19,81	15,19	°C

T _{in} ,virhekorjattu (ΔT _{log})	7,81	39,81	°C
T _{out} ,virhekorjattu (ΔT _{log})	20,19	15,19	°C

VIRTAUSMITTAUKSEN VIRHETARKASTELU	
Otoskoko	20
Luottamustaso (confidence level)	95 %
T-jakauman kriittinen arvo	2,09

	VF	TF	
q _m ,mitt_tarkk	12,00	16,00	kg/s
Keskivirhe (S)	2,68	3,58	kg/s
Virhemarginaali	5,62	7,49	kg/s

Koestuksen mittausarvot			
	VF	TF	
q _m ,mitattu (tai laskettu)	420,00	350,00	kg/s

q _m ,virhekorjattu	414,38	342,51	kg/s
-------------------------------	--------	--------	------

Laskettu TF (virtaus B) massavirta (käytetään, jos Koestustietojen syöttö -välilehdelle ei ole syötetty mittausarvoa: TH, TQ, TG)		
ΔT _{keski,A,koestus,mitattu}	14,00	°C
ΔT _{keski,B,koestus,mitattu}	27,50	°C
c _{p,A,koestus,mitattu}	4,19	kJ/kg°C
c _{p,B,koestus,mitattu}	4,18	kJ/kg°C

q _m ,B,laskettu	202,13	kg/s
----------------------------	--------	------

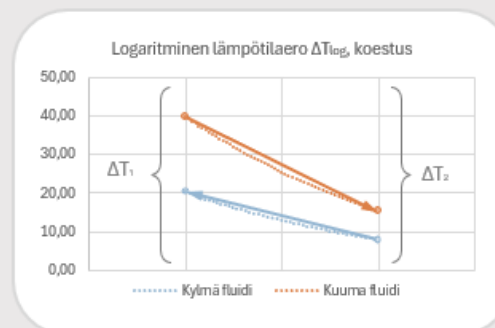
LASKENTAVAIHE 1: KOESTUSTILANTEEN KOKONAISLÄMMÖNSIIRTOKERTOIMEN MÄÄRITYS

U-ARVON MÄÄRITYS			
Koestusarvot			
	VF	TF	
ΔT _{koestus,virhekorjattu}	11,63	24,63	°C
ΔT _{log,koestus,virhekorjattu}	12,52		°C

Φ _{tot,koestus}	20,19	35,26	MW
	20 192 013	35 260 238	W

U _{koestus}	2 304,65	4 024,50	W/(m ² °C)
----------------------	----------	----------	-----------------------

Tarkastellaan pienempää U-arvoa	2 304,65	W/(m ² °C)
---------------------------------	----------	-----------------------



Logaritmisen lämpötilaero ΔT _{log} laskenta		
TH,in	39,81	°C
TC,out	20,19	°C
ΔT ₁	19,63	°C
TH,out	15,19	°C
TC,in	7,81	°C
ΔT ₂	7,37	°C
ΔT _{log,koestus}	12,52	°C

LASKENTAVAIHE 2: U-ARVON EKSTRAPOLOINTI ONNETTOMUUSTILANTEeseen

KESKILÄMPÖTILAN MÄÄRITYS							
	Koestusarvot		Suunnitteluarvot		Onnettomuusanalyysin arvot		
	VF	TF	VF	TF	VF	TF	
	Tkeski,virhekorjattu	14,00	27,50	30,00	40,00	25,00	
c_p (Tkeski)	4,191	4,180	4,180	4,178	4,182	4,178	kJ/kg°C
c_p (Tkeski)	4 191,43	4 180,45	4 179,51	4 178,22	4 181,69	4 178,22	J/kg°C

PRANDTLIN LUVUN MÄÄRITYS							
	Koestusarvot		Suunnitteluarvot		Onnettomuusanalyysin arvot		
	VF	TF	VF	TF	VF	TF	
	μ	0,00118	0,00084	0,00079	0,00065	0,00089	
λ	0,588	0,611	0,615	0,630	0,607	0,630	W/m°C
Pr	8,40	5,72	5,37	4,29	6,10	4,29	

KONV. LÄMMÖNSIIRTOKERTOIMIEN KORJAUSKERTOIMET: Dittus-Boelterin korrelaatiokaava putkelle, turbulenttinen			VF	TF
Xsuun—koestus	<i>Koestusarvot jaettuna suunn.arvoilla</i>		0,806	0,832
Xsuun—ref	<i>Ref.arvot jaettuna suunnitteluarvoilla</i>		0,867	1,022

Lämmönsiirtoalojen suhde Z_2	1,00
--------------------------------	------

U-ARVON EKSTRAPOLOINTI			
	Levyllämmön- vaihtimet	Putkilämmön- vaihtimet	
Konvektio, virtaus A -puoli	0,00010	0,00010	(m ² °C)/W
Johtuminen	0,00003	0,00000	(m ² °C)/W
Konvektio, virtaus B -puoli	0,00007	0,00007	(m ² °C)/W
U-arvo, ekstr., vaihtoehdot	4 876,91	5 784,33	W/(m ² °C)

U-arvo, ekstrapoloitu	4 876,91	W/m ² °C
------------------------------	-----------------	---------------------

U-arvo, hyväksymiskriteeri	3 000,00	W/(m ² °C)
----------------------------	----------	-----------------------

Teho onnettomuus-tilanteessa (RR)		MW
-----------------------------------	--	----

KYLLÄISEN VEDEN OMINAISUUKSIEN SOVITEPOLYNOMIEN KERTOIMET			
Kerroin	μ [kg/ms]	λ [W/mK]	c_p [kJ/kgK]
Polynomi1	2,86359E-11	5,59969E-10	2,03063E-09
Polynomi2	-8,28821E-09	-1,18231E-07	-5,21242E-07
Polynomi3	9,3379E-07	-1,50294E-06	5,75532E-05
Polynomi4	-5,40485E-05	0,001955028	-0,002584702
Polynomi5	0,001772204	0,560827884	4,217684397

Korrelaatiokaava on voimassa, jos $Pr: 0,6 \leq Pr \leq 60$

Korrelaatiokaavan eksp. ja kertoimet	
ReekspONENTTI	0,80
Preksp.lämmitys	0,33
Preksp.jäähdytys	0,33

LÄMMÖNJOHTAVUUS	
Keskilämpötila [°C]	32,50
AISI 304, ruostumaton teräs	
Kulmakerroin	0,015
Vakio	14,67
λ [W/mK]	15,16
ASTM B265 Titaani	
Tekijä 1: a	3,54724E-05
Tekijä 2: b	-0,02
Tekijä 3: c	22,38
λ [W/mK]	21,76

LASKENTAVAIHE 3: HÄTÄLÄMMÖNSIIRTOKETJU (vain TF-lämmönvaihtimen koestuksessa): KORKEIMMAN SALLITUN MERIVEDEN LÄMPÖTILAN (TVF,in) MÄÄRITYS

T _{TF,in} ONNETTOMUUSTILANTEESSA		
Φ_{mereen}	28 000 000	W
Φ_{mereen}	28 000	kW
T _{TF,in}	57,64	°C

Mereen siirrettävä lämpöteho TF10		
Φ_{mereen}	28,00	MW

TF10-lämmönvaihtimen maksimi ulostulolämpötila		
T _{TF,out(max)}	40,00	°C

Yhtälö 1	0,00
Yhtälö 2	0,00

Kun painetaan Koestustietojen syöttö -välilehdellä Laske-näppäintä, yhtälöiden 1 ja 2 arvojen tulee olla 0, jotta laskenta toimii oikein (VAIN TF)

T _{VF,out} (solver y)	48,8	°C
T _{VF,in} (solver x)	32,7	°C

Esimerkki Laskenta-välilehden yhtälösarakkeesta (B) sekä solujen nimeämisestä

x_suunref_A : $f_x = (((q_{m_A_ref}/q_{m_A_suunn}) * (dyn_viskositeetti_A_suunn/dyn_viskositeetti_A_ref))^{\text{Re_eksp}} * ((Pr_VF_ref/Pr_A_suunn)^{\text{Pr_eksp_lämm}} * (lammonjoht_A_ref/lammonjoht_A_suunn))$

KONV. LÄMMÖNSIIRTOKERTOIMIEN KORJAUSKERTOIMET: Dittus-Boelterin korrelaatiokaava putkelle, turbulenttinen		VF	TF
Xsuun-koestus	Koestusarvot jaettuna suunn.arvoilla	1,010	0,133
Xsuun-ref	Ref.arvot jaettuna suunnitteluarvoilla	1,018	1,062

Lämmönsiirtoalojen suhde Z₂ 1,18

U-ARVON EKSTRAPOINTI			
	Levylämmön- vaihtimet	Putkilämmön- vaihtimet	
Konvektio, virtaus A -puoli	0,00014	0,00016	(m ² °C)/W
Johtuminen	0,00083	0,00010	(m ² °C)/W
Konvektio, virtaus B -puoli	0,00016	0,00016	(m ² °C)/W
U-arvo, ekstr., vaihtoehdot	891,22	2 370,42	W/(m ² °C)

U-arvo, ekstrapoloitu	2 370,42	W/m ² °C
------------------------------	-----------------	---------------------

U-arvo, hyväksymiskriteeri	1 000,00	W/(m ² °C)
----------------------------	----------	-----------------------

Teho onnettomuus-tilanteessa (RR) MW

$\Phi_{RR} = U_{ekstr} \cdot A \Delta T_{log}$

$x_{a \rightarrow b} = \left(\frac{q_{m,b}}{q_{m,a}} \right) \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{Pr_b}{Pr_a} \right)^n \cdot \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a} \right)$
 $Z_{2,putki} = \frac{D_{ulko}}{d_{sisä}} = \frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \text{ tai } Z_{2,levy} = 1$
 Levylämmönvaihtimien ekstrapoloitu U-arvo:
 $U_{ekstr.} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_A \cdot x_{A,s \rightarrow r} \cdot x_{A,s \rightarrow k}} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_B \cdot x_{B,s \rightarrow r}} \right)}$
 Putkilämmönvaihtimien ekstrapoloitu U-arvo:
 $U_{ekstr} = \frac{1}{\left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \cdot \frac{1}{h_A \cdot x_{A,s \rightarrow r} \cdot x_{A,s \rightarrow k}} + \frac{r_{ulko}}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{r_{ulko}}{r_{sisä}} \right) + \frac{1}{h_B \cdot x_{B,s \rightarrow r}} \right)}$