



PAINEHÄVIÖ LÄMPÖPUTKILÄMMÖNVAIHTIMESSA
PRESSURE DROP IN HEAT PIPE HEAT EXCHANGER

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Miika Aho

Tarkastajat: TkT Harri Eskelinen

TkT Katriina Mielonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Miika Aho

Painehäviö lämpöputkilämmönvaihtimessa

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

47 sivua, 12 kuvaa, 12 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: TkT Harri Eskelinen ja TkT Katriina Mielonen.

Avainsanat: Lämpöputki, Painehäviö, Virtaussimulaatio, Solidworks

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin lämpöputkitekniikan käyttöä lämmönvaihtimissa ja lämmöntalteenottojärjestelmissä. Tutkimus painotettiin painehäviön laskemiseen, sekä painehäviöön vaikuttavien tekijöiden kartoittamiseen. Tutkimuksessa mallinnettiin Solidworks- ohjelmistolla kuusi toisistaan poikkeavaa lämmönvaihtimen geometriaa, joille suoritettiin yhteensä 28 virtausanalyysia ohjelmiston Flow Simulation- moduulilla. Tutkimuksessa selvitettiin laitteiston geometrian vaikutusta laitteistossa syntyvän painehäviön suuruuteen. Geometrian lisäksi tutkittiin myös virtaavan aineen ominaisuuksien, kuten lämpötilan ja virtausnopeuden vaikutusta painehäviöön.

Tutkimuksessa havaittiin, että virtaavan aineen ominaisuudet, sekä virtausnopeus vaikuttavat painehäviöön huomattavasti enemmän kuin laitteiston geometria tai lämpöputkien sijoittelu. 25–33% painehäviöstä syntyy ennen laitteistoa sijaitsevassa kartiossa ja laitteiston jälkeisessä kartiossa, joissa virtaus laajenee ennen lämmönvaihtimeen ja supistuu takaisin alkuperäiseen virtaustilavuuteen. Lämpötilaa nostettaessa painehäviön suuruus kasvaa lähes täydellisesti ensimmäisen asteen suoran tavoin.

Lämpöputkitekniologiaa voidaan käyttää erittäin laajasti eri sovellutuksissa. Lämpöputkilämmönvaihtimen avulla voidaan luoda erittäin kilpailukykyinen ratkaisu teollisuuden hukkalämmön hyödyntämiseen eri teollisuuden aloilla. Merkittävintä teknologian hyödyntämisessä on sen tuomat edut fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen. Jo pienikokoisella laitteistolla voidaan vähentää merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja näin ollen vuositasolla voidaan välttyä jopa 164 tonnin hiilidioksidipäästöiltä. Korkean energianhinnan vuoksi laitteistoinvestoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä polttoainekustannuksissa ja samalla vähentää hiilidioksidipäästöjä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Miika Aho

Pressure drop in heat pipe heat exchanger

Bachelor's thesis

2022

47 pages, 12 figures, 12 tables and 6 appendices

Examiners: D.Sc. Harri Eskelinen. and D.Sc. Katriina Mielonen

Keywords: Heat pipe, Pressure drop, Flow analysis, Solidworks

The use of the heat pipe technology in heat exchangers and in waste heat recovery systems is investigated in this bachelor's thesis. The main objective of this thesis is to find a way to calculate the pressure drop in the fluid flow through the heat pipe heat exchanger and to find factors that affect the pressure drop. Methods used in this research are theoretical calculations of the pressure drop and flow simulations with Solidworks Flow Simulation . For flow simulation analysis six different HPHE geometries were created. In addition to the geometry of the heat exchanger, different flow features were investigated such as the temperature and effects of the mass flow value. The total number of flow simulations in this research was 27.

The main results indicate that the properties of the fluid, such as temperature and the value of the mass flow, affected more on the value of the pressure drop than the geometry of the heat exchanger. 25-33% of the pressure drop occurs on the expansion part before heat exchanger and contraction part after the heat exchanger. However, almost all of this pressure drop occurs on the expansion part.

Heat pipe technology can be used widely in different applications. With the heat pipe heat exchanger it is possible to create a competitive solution for a waste heat recovery system in many industries and to reduce the use of fossil fuels and therefore reduce carbon emissions. With the small-sized heat pipe heat exchanger companies can reduce up to 164 tons of carbon dioxide emissions in a year. Because of the high price of the energy, companies can avoid fuel cost and be part of emission reduction.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A_c	virtauksen poikkipinta-ala	[m^2]
c	virtausnopeus	[m/s]
D	lämpöputken halkaisija	[m]
d	putken sisähalkaisija	[m]
k	pinnankarheus	[μm]
l	putken pituus	[m]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
p	paine	[Pa]
Δp	painehäviö	[Pa]
S_D	putkien diagonaalinen etäisyys toisistaan	[m]
S_L	putkien pitkittäinen etäisyys toisistaan	[m]
S_T	putkien poikittaissuuntainen etäisyys	[m]
V	keskimääräinen virtausnopeus	[m/s]
V_{max}	suurin virtausnopeus	[m/s]

Kreikkalaiset

γ	laajentumis- ja kaventumiskulma	[$^\circ$]
μ	viskositeetti	[kg/ms]
ρ	tiheys	[kg/ m^3]

Dimensiottomat luvut

A_1	poikittainen pinta-ala
A_2	diagonaalinen pinta-ala
f	kitkakerroin
N_L	Putkirivien määrä
P_L	putkien pitkittäissuuntaisen etäisyyden suhde putken halkaisijaan
P_T	putkien poikittaissuuntaisen etäisyyden suhde putken halkaisijaan
Re	Reynoldsin luku
$Re_{D,max}$	Reynoldsin luku
ζ	painehäviökerroin
λ	kitkahäviökerroin
χ	korrelaatiokerroin

Alaindeksit

1	sisäänvirtaus
2	ulosvirtaus
tot	kokonais

Lyhenteet

HP	Lämpöputki (Heat pipe)
HPHE	Lämpöputkilämmönvaihdin (Heat pipe heat exchanger)
WHRS	Hukkalämmön hyödyntämisjärjestelmä (Waste heat recovery system)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	8
1.1	Tutkimuksen tausta	8
1.2	Tutkimusongelma.....	9
1.3	Tavoitteet.....	9
1.4	Tutkimuskysymykset	9
1.5	Tutkimusmenetelmät	10
1.6	Rajaukset.....	10
2	Lämpöputkilämmönvaihdin ja lämmöntalteenottojärjestelmät.....	11
2.1	Lämpöputki	11
2.2	Lämpöputkilämmönvaihdin	14
2.3	Lämmöntalteenottojärjestelmät.....	16
3	Tutkimusmenetelmät	17
3.1	Virtaussimulaation reunaehtojen määrittäminen.....	19
3.2	Virtausanalyysi HPHE:n painehäviöstä	21
3.3	Teoreettinen laskenta HPHE:n painehäviöstä	23
4	Tulokset	30
4.1	Reunaehtojen määrittäminen.....	30
4.2	Virtausanalyysin tulokset HPHE:n painehäviöstä Solidworks-ohjelmistolla	32
4.3	Yhteenveto tuloksista	37
5	Pohdinta.....	38
5.1	Vertailu ja yhtymäkohdat aiempaan tutkimukseen	38
5.2	Reliabiliteetti ja validiteetti	39
5.3	Virhetarkastelu	40
5.4	Avaintulokset	41
5.5	Keskeiset johtopäätökset.....	42
5.6	Tulosten yleistettävyyden ja hyödynnettävyyden	43

5.7	Jatkotutkimusaiheet.....	43
6	Yhteenveto.....	44
	Lähteet	46

Liitteet

Liite 1. Virtausanalyysin tulokset: Geometria 1

Liite 2. Geometria 2

Liite 2.1 Virtausanalyysin tulokset: Geometria 2

Liite 3. Geometria 3

Liite 3.1 Virtausanalyysin tulokset: Geometria 3

Liite 4. Geometria 4

Liite 4.1 Virtausanalyysin tulokset: Geometria 4

Liite 5. Geometria 5

Liite 5.1 Virtausanalyysin tulokset: Geometria 5

Liite 6. Geometria 6

Liite 6.1 Virtausanalyysin tulokset: Geometria 6

1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä käsitellään lämpöputkilämmönvaihtimen (HPHE) käyttöä lämmöntalteenottojärjestelmissä (WHRS). Työ on painotettu käsittelemään HPHE:n syntyvää painehäviötä kuuman puolen virtauksessa. Painehäviön lisäksi työssä käsitellään HPHE:n toimintaperiaatetta sekä WHRS-investoinnin hyötyjä. Kandidaatintyö suoritetaan yritykselle South-West Supply Oy. South-West Supply on vuonna 2015 perustettu yritys, joka luo toimintavarmoja, vaivattomasti huollettavia ja kustannustehokkaita energiaratkaisuja eri teollisuuden ja tuotannon aloille (South-West Supply 2021).

1.1 Tutkimuksen tausta

Lämpöputkea (HP) pidetään yhtenä tehokkaimmista passiivisesti toimivista lämmönsiirriteknologioista (Jouhara et al. 2017, 730). Yilmaz, Sara & Karsli (2001, 279) toteavat, että tehokkain tapa vähentää energian kysyntää on käyttää energiaa tehokkaammin. Lämpöputkilämmönvaihdinta on Delpech et al. (2018, 656) mukaan tutkittu ja sovellettu hukkalämmöntalteenotossa teollisuuden savukaasuista useilla teollisuuden aloilla, kuten teräs-, ruoka- ja kuljetusteollisuudessa.

Yilmaz et al. (2001, 279) painottavat artikkelissaan, että lämmönsiirto ja lämmönsiirrinlaitteistojen suunnittelu ovat keskeinen ongelma energian säästämässä. Honting et al. (2017, 50) painottavat artikkelissaan hukkalämmöntalteenoton tärkeyttä energian säästämässä. Voidaankin siis päätellä, että hyödyntämällä HPHE teknologiaa WHRS laitteistossa voidaan energiatehokkuutta parantaa useilla eri teollisuuden aloilla. Tehokkaamman energianhyödyntämisen myötä Delpech et al. (2018) artikkelissa käsitellyn lämpöputkilämmönvaihtimen avulla tuotetulla energialla vähennettiin arviolta noin 164 tonnin edestä hiilidioksidipäästöjä.

1.2 Tutkimusongelma

Tutkimusongelmana on selvittää lämpöputkilämmönvaihtimen höyrystymispuolen virtauksessa syntyvä painehäviö ja painehäviön suuruuteen vaikuttavat ilmiöt. Tutkimuskohteena on lämpöputkilämmönvaihdin, jonka avulla voidaan hyödyntää hukkalämpöä kuumasta savukaasusta eri teollisuuden aloilla.

Tutkimusongelmana perustuu tiedon puuttumiseen laitteen geometrian, virtaavan aineen ominaisuuksien sekä lämpöputkien sijoittelun vaikutuksiin laitteistossa syntyvän painehäviön suuruuteen. Tutkittavia tekijöitä ovat virtaavan aineen lämpötila sekä virtaavan aineen virtausnopeuden suuruuden vaikutus painehäviöön.

1.3 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on suorittaa teoreettinen laskenta lämpöputkilämmönvaihtimessa syntyvästä painehäviöstä. Teoreettisen laskennan lisäksi Solidworks- ohjelmiston avulla suoritetaan yksinkertaisia virtaussimulaatioita erilaisille HPHE:n geometrioille. Virtaussimulaatioiden tavoitteena on nimetä laitteistossa syntyvään painehäviöön vaikuttavat ilmiöt.

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on käsitellä lämpöputkitekniikan hyötyjä esille, jotta hukkalämpöä hyödynnettäisiin tulevaisuudessa entistä tehokkaammin ja laajemmalla mittakaavassa. Tavoitteen täyttämiseksi tutkimuksessa käsitellään perusteet lämpöputkitekniologiasta, tekniikan sovellutuksista sekä tekniikan tuomista eduista verrattuna perinteisiin tekniologioihin.

1.4 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mikä on lämpöputki?
- Millaisissa sovellutuksissa lämpöputkilämmönvaihdinta voidaan hyödyntää?

- Miten lämpöputkilämmönvaihtimen painehäviö voidaan laskea?
- Mitkä tekijät vaikuttavat lämpöputkilämmönvaihtimessa syntyvään painehäviöön?

1.5 Tutkimusmetodit

Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään lämpöputkitekniologiaa, lämpöputkilämmönvaihdinta sekä lämpöputkilämmönvaihtimen käyttöä hukkalämmön talteenottojärjestelmissä. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi laitteistossa syntyvän painehäviön suuruudesta suoritetaan teoreettinen laskenta.

Tutkimuksessa suoritetaan virtausanalyyskejä erilaisille HPHE:n geometrioille. Geometriat mallinnetaan Solidworks-ohjelmistolla ja virtaussimulaatiot suoritetaan Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulilla. Tutkimustuloksia verrataan Delpech et al. (2018) esittämiin tutkimustuloksiin HPHE:n painehäviöstä.

1.6 Rajaukset

Tutkimuksessa ei huomioida todellisessa laitteistossa tapahtuvan lämmönsiirron vaikutusta virtaukseen. Virtausanalyysi suoritetaan adiabaattisena. Adiabaattisessa prosessissa prosessin taserajojen ylitse ei siirry lämpöä (Whitman 2019, 202). Adiabaattisen prosessin lisäksi virtaus määritetään isotermiseksi. Isotermisessä prosessissa lämpötila on vakio (Whitman 2019, 123).

Virtausanalyysissa virtaavana aineena käytetään sijasta ilmaa, joka oletetaan ideaalikaasuksi. Ilman aineominaisuuksien tarkasteluun hyödynnetään Anon (2010) esittämää taulukkoa kuivan ilman aineominaisuuksista 1 bar paineessa.

2 Lämpöputkilämmönvaihdin ja lämmöntalteenottojärjestelmät

Tässä luvussa käsitellään aiempaa kirjallisuutta aiheeseen liittyen ja luodaan teoreettinen pohja tutkimukselle. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään lämpöputkien ja lämpöputkilämmönvaihtimien taustaa sekä niiden käyttöä lämmöntalteenottojärjestelmissä. Lisäksi tarkastellaan näiden tuomia hyötyjä eri teollisuuden aloilla.

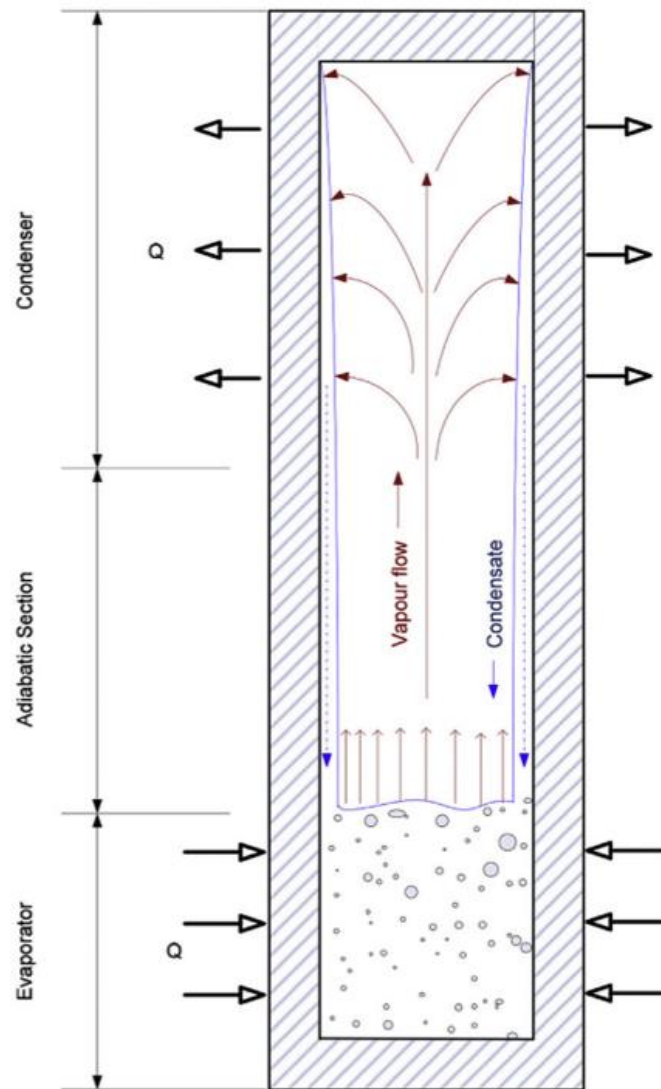
2.1 Lämpöputki

Lämpöputken alkuperäisen toimintaperiaatteen esitti R.S. Gauler vuonna 1942, kuitenkin fyysisen lämpöputken kehitti G.M Grover vuonna 1962 (Kaya et al. 2021, 467). Faghri (2016) mukaan lämpöputken toimintaperiaatteen Gauler kehitti vasta vuonna 1944 ja Grover uudelleen suunnitteli ja patentoi lämpöputken vasta vuonna 1964. Lämpöputken avulla suuri määrä lämpöä voidaan kuljettaa pienen poikkipinta-alan lävitse ilman ylimääräisen energian lisäämistä järjestelmään, mitä voidaan pitää lämpöputkitekniologian etuutena perinteisiin lämmönsiirtoteknologioihin verrattuna (Faghri 2016, 1).

Lämpöputki on esimerkki erittäin tehokkaasta lämmönsiirrinteknologiasta, joka toimii passiivisesti. Lämpöputki kykenee siirtämään suuren määrän lämpöä suhteellisen pitkälle matkalle ilman liikkuvia osia hyödyntäen veden olotilanmuutosta ja höyryn diffuusiota (Jouhara et al. 2017, 730). Kun lämpöputket toimivat ilman ulkoista energianlähdettä passiivisesti luonnollisen lämmönjohtumisen avulla on lämpöputkien kokonaislämmönsiirtokapasiteetti ja tehokkuus on yleisesti pienempi kuin lämpöputkilla, joihin ulkoisen energianlähteen avulla luodaan pakotettu johtuminen (Faghri 2016, 690).

Lämpöputken rakenne jaetaan nimellisesti kahteen alueeseen, höyrytimeen ja lauhduttimeen (Zohuri 2016, 4). Lämpöputken rakenne koostuu tyhjiöputkesta, joka on osittain täytetty työaineella, joka esiintyy kahdessa olomuodossa, kaasuna sekä nesteinä (Jouhara et al. 2017, 730). Työaine höyrystyy, kun lämpöputken höyrystinalueelle tuodaan lämpöä (Zohuri

2016, 4). Faghriin (2016) mukaan monissa lämpöputkissa on höyrystin- ja lauhdutinalueen lisäksi myös adiabaattinen alue, joka erottaa Zohurin (2016) esittämät alueet toisistaan. Lämpöputken rakenne on esitetty kuvassa 1.



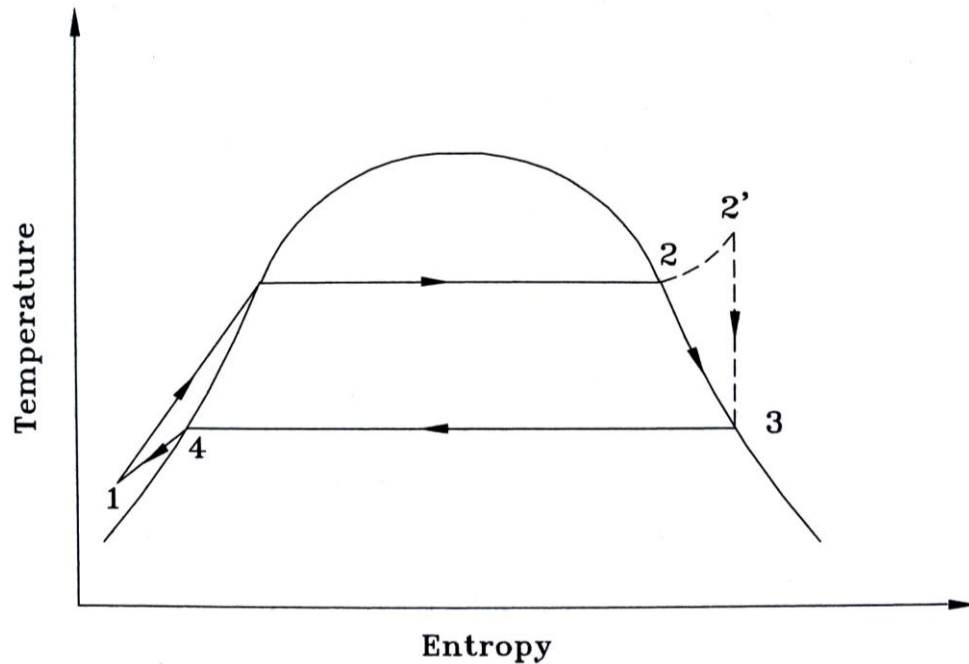
Kuva 1. Lämpöputken toimintaperiaate (Jouhara et al. 2017, 735).

Lämpöputken materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi kuparia, ruostumatonta terästä, nikkeliä, alumiinia tai titaania. Työaineena puolestaan voidaan puolestaan käyttää esimerkiksi vettä, heliumia, vetyä, tolueenia, metanolia tai ammoniakkia. (Shabgard et al. 2015, 140.) Zohuri (2016) listaa Shabgard et al. (2015) artikkelissa mainittujen työaineiden lisäksi, että

myös metalleja, joiden sulamispiste on alhainen, voidaan käyttää lämpöputkissa työaineina. Tällaisia metalleja ovat Zohuri (2016) mukaan cesium, kalium ja elohopea. Laajin käyttöaste työaineena on vedellä, jolla on hyvät termodynaamiset ominaisuudet, kuten korkea höyrystymislämpötila sekä pintajännitys. Vesi on myös turvallinen käsiteltävä työaine lämpöputkien valmistuksessa, mikä on hyödyllistä (Faghri 2016, 26).

Nestemäisen metallin käyttämisellä lämpöputken työaineena, voidaan saavuttaa tuhatkertainen lämmönsiirtoteho verrattuna tehokkaimpiin kiinteisiin metallijohteisiin, hopeaan ja kupariin (Zohuri 2016, 2). Lämpöputken työaineen valinnassa on otettava huomioon käyttökohteen lämpötila, sillä jokaisella työaineella on tietty lämpötila-alue, jossa lämpöputkea voidaan käyttää (Faghri 2016, 22). Lämpöputken materiaalin valinnan määrittävä tekijä on työaineen ja lämpöputken materiaalin yhteensopivuus (Zohuri 2016, 150). Työaineen ja materiaalin yhteensopimattomuus voi aiheuttaa kemikaalisen reaktion tai lämpöputkeen voi syntyä galvaaninen kenno (Faghri 2016, 23).

Höyrystinalueelle tuotu lämpö johtuu lämpöputken seinämän lävitse, jolloin lämmön vaikutuksesta lämpöputken sisältämä työaine höyrystyy. Höyrystyessään työaineen höyryn paine nousee, mikä pakottaa höyryn adiabaattisen alueen lävitse lämpöputken lauhdutinalueelle, jossa höyrystynyt työaine tiivistyy takaisin nesteeksi. Tiivistyessään työaine vapauttaa siihen sitoutuneen energian. Tiivistynyt työaine kulkeutuu takaisin höyrystymisalueelle lämpöputken rakenteesta riippuen, joko kapilaarisesti tai painovoiman vaikutuksesta. (Faghri 2016, 3; Zohuri 2016, 2; Mantelli 2020, 1.) Lämpöputken termodynaaminen kierto on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Lämpöputken termodynaaminen kierto lämpötila - entropia diagrammina (Faghri 2016, 8).

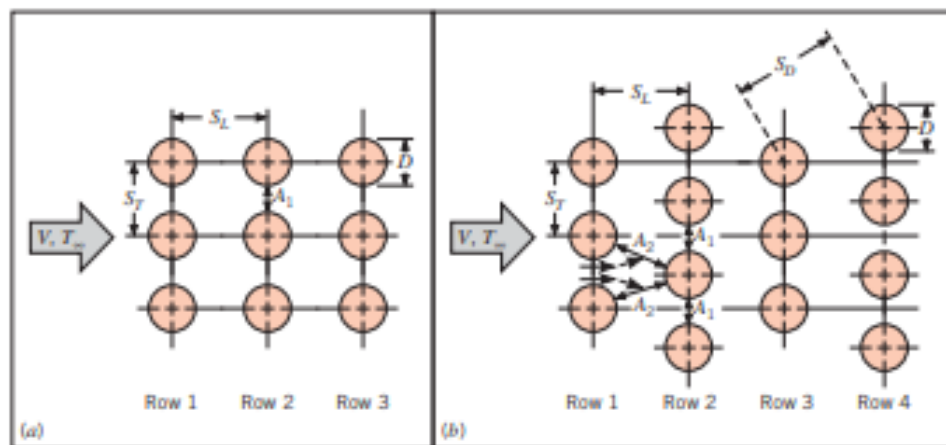
Kuvassa 2 esitetystä lämpötila – entropia diagrammista 1–2 pisteiden välillä tapahtuu lämmöntuonti lämpöputken höyrystymisosaan, 2-3 pisteiden välillä höyrystyvä työaine kulkeutuu lämpöputken lauhdumisalueelle, 3-4 pisteiden välillä höyrystynyt työaine tiivistyy takaisin nesteeksi vapauttaen työaineeseen sitoutuneen energian lämpöputken lauhdutin alueella ja 4-1 pisteiden välillä nesteeksi tiivistynyt työaine kulkeutuu takaisin lämpöputken höyrystymisosaan. (Faghri 2016, 8).

2.2 Lämpöputkilämmönvaihdin

Lämpöputkilämmönvaihtimien sovellukset voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan. Ensimmäinen sovellutus on hukkalämmön talteen ottaminen prosessista ja uudelleen käyttäminen joko samassa tai toisessa prosessissa. Toisessa sovelluksessa hukkalämmön avulla esilämmitetään ilmaa, jota käytetään lämmitykseen. Kolmannessa sovelluksessa lämpöputkilämmönvaihtimen avulla hyödynnetään hukkalämpöä ilmastointilaitteissa, missä normaalisti lämpötilat ovat suhteellisen matalat. (Zohuri 2016, 341.)

Lämpöputkilämmönvaihtimen merkittävänä etuina perinteisiin lämmönvaihtimiin verrattuna voidaan pitää lämpöputken lähes isotermistä ominaisuutta ja mahdollisuutta parempaan tiivistykseen vuotojen minimoimiseksi (Faghri, 2016, 57). Korkean lämmönsiirtokapasiteetin vuoksi laitteiston kokoa voidaan pienentää, mikä vähentää laitteiston kuljetuskustannuksia (Zohuri 2016, 1; Faghri 2016, 57). Laitteiston pienen koon vuoksi lämpöputkilämmönvaihtimen soveltuu käytettäväksi osana kompaktia lämmöntalteenottojärjestelmää, joka ei tarvitse ulkopuolista energiaa, lämmönvaihtimen aiheuttama painehäviö on pieni sekä lämmönvaihtimen on helposti asennettavissa olemassa olevaan putkistoon (Faghri 2016, 57).

Lämpöputkilämmönvaihtimilla voidaan siirtää lämpöä kaasusta kaasuun, kaasusta nesteeseen sekä nesteestä nesteeseen ja lämpöputkilämmönvaihtimia voidaan hyödyntää laajasti aina lämmöntalteenottojärjestelmistä tietokoneen prosessorien viilennykseen (Faghri 2016, 683-688). Lämpöputkien sijoittelu HPHE:ssä jaetaan pääsääntöisesti kahteen eri kategoriaan. Putket voidaan sijoittaa laitteistoon suorissa riveissä tai portaittain (Incropera 2007, 431). Kuvassa 3 on esitetty yleisimmät lämpöputkien sijoittelutavat lämpöputkilämmönvaihtimessa.



Kuva 3. Lämpöputkien sijoittelu. (a) Riveittäin. (b) Porrastettuna. (Incropera 2007, 431).

Lämpöputkilämmönvaihtimen suunnittelussa tärkeintä on maksimoida lämmönvaihtimen lämmönsiirtokapasiteettia ja tehokkuutta samalla kun minimoidaan laitteen kustannusta, kokoa, painoa sekä painehäviötä. Suunnittelussa on myös tärkeää estää kylmän ja kuuman

virtauksen sekoittumista. Esimerkiksi siivekkeiden käytöllä voidaan lisätä lämmönsiirron pinta-alaa, jolloin lämmönsiirtyminen on tehokkaampaa. Lisäksi laitteen tehokkuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla putkien sijoittelua. Riveittäin sijoitetut lämpöputkirivit synnyttävät turbulenssia, jolloin lämmön siirtyminen tehostuu jokaisen putkirivin jälkeen. Toisaalta porrastetusti sijoitellut lämpöputkirivit sekoittavat virtausta tehokkaammin, jolloin lämmönsiirron saavuttamiseksi tarvitaan vähemmän lämpöputkia. (Faghri 2016, 688-689.)

2.3 Lämmöntalteenottojärjestelmät

Zohurin (2016) mukaan on olemassa useita teknologioita, joiden avulla voidaan hyödyntää hukkalämpöä savukaasuista tai lämpimästä vedestä. Teollisuuden lämmöntalteenoton näkökulmasta puoleensavetäviä ominaispiirteitä lämpöputkilämmönvaihtimelle on Zohurin (2016) mukaan laitteiston yksinkertainen toimintaperiaate, laitteistossa ei tapahdu ollenkaan aineiden sekoittumista kuumen ja lämpimän puolen välillä sekä laitteisto on helppo puhdistaa.

Kaya et al. (2021) mukaan useissa maissa noin 26 % teollisuuden energiankäytöstä ei ole tehokkaasti hyödynnetty, koska energiaa valuu hukkaan kuumen kaasun tai kuumen nesteen muodossa. Hukkalämmön hyödyntämisen avulla voidaan vähentää valmistuskustannuksia merkittävästi eri teollisuuden aloilla. Hukkalämmön talteenottojärjestelmä vähentää myös fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tukee näin ollen kestävästä kehitystä. (Abdelkareem et al. 2022, 2.)

Tässä työssä tullaan käsittelemään virtausanalyysin sekä teoreettisen laskennan avulla Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyä lämpöputkilämmönvaihdinta lämmöntalteenottojärjestelmässä. Tutkimuksessa käytetyn lämpöputkilämmönvaihtimen tehoksi ilmoitetaan 99.3 kW, jolloin tutkimuskohteen vuotuisen käyntituntimäärän ollessa 8700 tuntia kyetään teoreettisesti vuodessa palauttamaan energiaa 864 MWh edestä (Delpech et al. 2018, 659-664). 864 MWh vastaa noin 110 tuhatta kuutiota poltettua maakaasua, ja näin ollen lämpöputkilämmönvaihtimella tuotetun energian avulla pystytään vähentämään noin 164 tonnin

edestä hiilidioksidipäästöjä vuodessa (Delpech et al. 2018, 664). Lämpöputkilämmönvaihtimen elinkaari voi olla jopa yli 20 vuotta, mutta investoinnin takaisinmaksuaika on tyypillisesti alle 2 vuotta (Delpech et al. 2018, 658). Voidaan kuitenkin sanoa, että hyödynnetyn energian määrä on riippuvainen lämpöputkilämmönvaihtimen tehosta, sekä tuntimäärästä, jolloin laite on käytössä.

Suomessa lämpöputkilämmönvaihtimen avulla hyödynnetään hukkalämpöä prosessihöyryn tuotannossa Terrafame Oy:n vetylaitoksissa. Vetylaitosten lämmöntalteenotossa teknologian käyttö on uutta, vaikka teknologiaa on aiemmin hyödynnetty voimalaitoksissa. Hyödynnettävän energian määrä on riippuvainen käyttöasteesta, parhaimmillaan teknologian avulla talteenotto vastaa viiden megawatin energiantuotanto tehoa. Laitteistoinvestoinnille myönnettiin työ- ja elinkeinoministeriön uuden teknologian tuki. (Terrafame 2020.)

3 Tutkimusmenetelmät

HPHE:n aiheuttamaa painehäviötä tarkastellaan virtausanalyysin avulla. Virtausanalyysi suoritetaan adiabaattisessa ympäristössä. Adiabaattisessa prosessissa prosessin taserajojen ylitse ei siirry lämpöä (Whitman 2019, 202). Prosessi määritetään myös isotermiseksi. Isotermisessä prosessissa lämpötila on vakio (Whitman 2019, 123). Tutkimuksesta ei käsitellä lämmönsiirron vaikutusta laitteistossa syntyvän painehäviön suuruuteen.

Tutkimuksessa käytetään ohjelmistona Solidworks 2020- versiota. Ohjelmiston Flow Simulation -moduulin avulla voidaan suorittaa analyysejä kappaleelle erityyppisillä rasituksilla, kuten paineella ja lämpötiloilla. Näiden ilmiöiden ymmärtäminen on tärkeää varsinkin lämmönsiirtimien suunnittelussa (Olaru 2020, 41).

Tutkimuksessa käsitellään painehäviön syntymistä kuuden toisistaan poikkeavan HPHE:n geometrian avulla. Geometrian lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan lämpötilan sekä

virtausnopeuden vaikutusta painehäviön suuruuteen. Tutkimuksessa käytetyt geometriat perustuvat Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyyn geometriaan. Tutkimuksessa lämpöputkilämmönvaihtimen geometria 1 pyrkii jäljittelemään täysin Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyä laitteistoa. HPHE:n geometrioiden muutokset verrattuna Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyyn laitteistoon on esitetty taulukossa 1.

Tutkimuksessa suoritetaan myös teoreettinen laskenta Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitetylle laitteistolle. Teoreettinen laskenta suoritetaan Incropera (2007) esittämällä laskentakaavoilla. Tutkimuksessa pyritään jäljittelemään triangulaatiota vertailemalla Delpech et al. (2018) mukaisia tutkimustuloksia Incropera (2007) teoreettisilla laskukaavoilla saavutettaviin tuloksiin, sekä tässä tutkimuksessa saavutettaviin virtausanalyysin tuloksiin.

Taulukko 1. Lämpöputkilämmönvaihtimien geometrioihin tehdyt muutokset ja niiden vaikutukset geometrioihin. Delpech et al. (2018) mukainen geometria 1 on esitetty kappaleessa 3.1 ja geometriat 2-6 on esitetty liitteissä 2-6.

	Geometrian muutos	Vaikutus geometriaan
Geometria 1	Alkuperäinen vertailugeometria	-
Geometria 2	Laitteiston korkeutta kasvatettu	Laitteiston poikkipinta-ala kasvaa
Geometria 3	Laitteiston korkeutta vähennetty	Laitteiston poikkipinta-ala pienentyy
Geometria 4	Laitteiston leveyttä kasvatettu	Lämpöputkien määrä rivissä kasvaa
Geometria 5	Laitteiston pituutta kasvatettu	Lämpöputkirivien määrä kasvaa
Geometria 6	Lämpöputkien halkaisijaa sekä lämpöputkien etäisyyttä muutettu	Laitteen leveys sekä pituus pienentyvät

Geometrioiden 4 ja 5 avulla voidaan tarkastella geometrian muutoksen lisäksi lämpöputkien määrän vaikutusta painehäviöön. Geometrian 6 avulla voidaan tarkastella geometrian muutoksen lisäksi myös lämpöputkien sijoittelun vaikutusta painehäviön syntymiseen.

3.1 Virtaussimulaation reunaehtojen määrittäminen

Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulilla suoritettavien virtaussimulaatioiden reunaehdoille suoritetaan reliabiliteettitarkastelu toteuttamalla virtaussimulaatio putken painehäviöstä. Putken painehäviö voidaan laskea teoreettisesti Butcher (2007) esittämien laskentakaavojen avulla. Simulaation tarkoituksena on saada vertailukohde Solidworks-ohjelmiston Flow simulation -moduulilla selvitettyyn painehäviöön. Virtaussimulaation tuloksia verrataan teoreettisen laskennan tuloksiin, jolloin tulosten luotettavuutta voidaan tarkastella. Mallinnetun putken tekniset tiedot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Virtaussimulaation reunaehtojen määrittämisessä käytetyn putken tekniset tiedot.

Putken materiaali	Teräs
Putken sisähalkaisija D [m]	0.050
Putken pituus l [m]	10

Solidworks-ohjelmistolla mallinnettuun geometriaan luodaan Flow Simulation -moduulin Wizard -toiminnolla uusi virtausanalyysi. Wizard- toiminnon avulla virtausanalyysille asetetaan lähtötiedot, jotka ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Virtaussimulaatioon syötettävät lähtötiedot.

Analyysityyppi	Sisäinen
Virtaava aine	Ilma
Virtaustapa	Laminaarinen ja turbulентinen
Rakenteen lämpöterminen ominaisuus	Adiabaattinen rakenne
Materiaalin pinnankarheus [μm]	46
Paine p [Pa]	101 325
Lämpötila T [K]	293.2

Lähtötietojen lisäksi virtaussimulaatioon täytyy määrittää reunaehdot virtaukselle. Reunaehtojen avulla määritetään ohjelmistoon virtauksen sijainti, virtauksen nopeus tai massa-virta. Virtaussimulaatioissa käytetyt reunaehdot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Virtaussimulaatioon reunaehtojen sijainti, tyyppi sekä ominaisuus.

Sijainti	Tyyppi	Määritelty ominaisuus
Virtaus sisään	Virtausnopeus V	5.1 [m/s]
Virtaus ulos	Paineen vapautuminen ilmanpaineeseen p	101 325 [Pa]

Reunaehtojen lisäksi ohjelmistoon määritetään kaksi tavoitetta, tässä tapauksessa tavoitteiksi halutaan sekä sisään-, että ulosvirtauksen staattinen paine. Tavoitteista voidaan muodostaa ohjelmistoon laskentakaava, joka määrittellään laskemaan paine-ero sisään- ja ulosvirtauksen välillä.

Virtausanalyysin tuloksia verrataan teoreettisiin kaavoin laskettavaan painehäviöön. Painehäviö Δp putken virtauksessa voidaan laskea seuraavasti

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho c^2 \quad (1)$$

jossa λ on kitkahäviökerroin, l on putken pituus [m], d on putken halkaisija [m], ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3] ja c on virtausnopeus [m/s] (Butcher 2007, 2). Kitkahäviökerroin λ laminaariselle virtaukselle voidaan laskea seuraavasti

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

jossa Re on Reynoldsin luku (Butcher 2007, 3).

Turbulenttisen virtauksen tapauksessa kitkakerroin λ voidaan laskea seuraavasti

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re} + \frac{k}{3.7d} \right) \quad (3)$$

jossa k on materiaalin pinnankarheus [μm] (Butcher 2007, 3).

Reynoldsin luku voidaan laskea seuraavasti

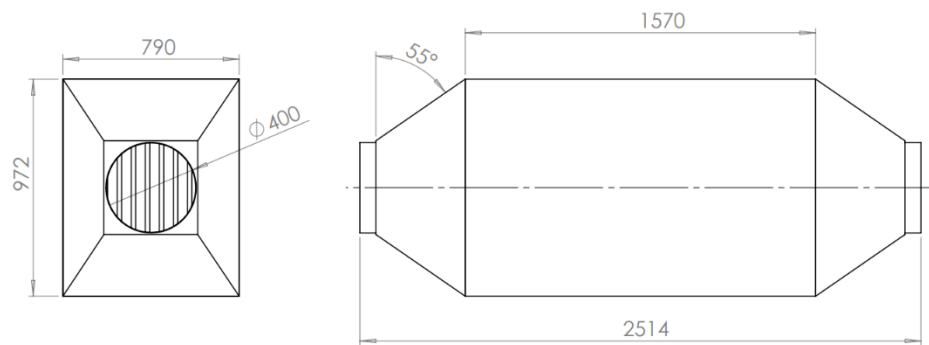
$$Re = \frac{\rho cd}{\eta} \quad (4)$$

jossa η on virtaavan aineen viskositeetti [kg/ms] (Butcher 2007, 2).

3.2 Virtausanalyysi HPHE:n painehäviöstä

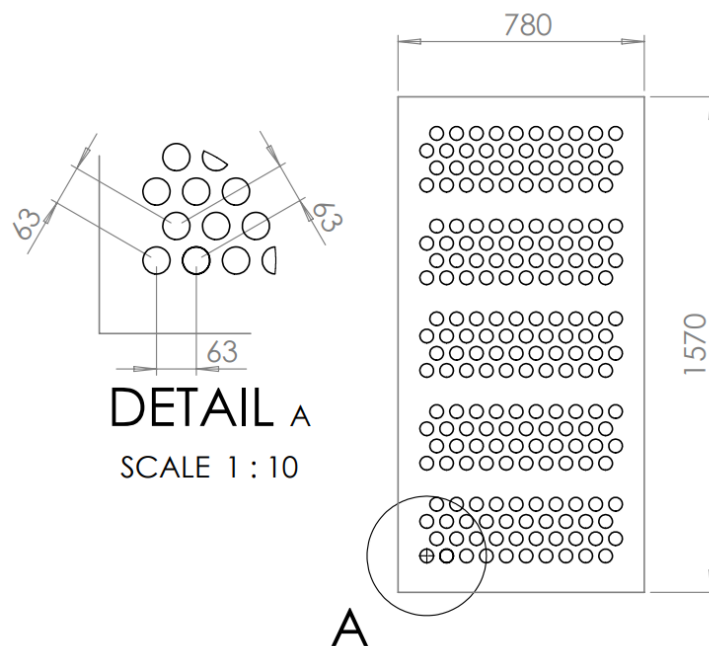
Virtaussimulaatiot suoritetaan jokaiselle HPHE:n geometrialle samoilla reunaehdoilla. Virtausanalyysissä hyödynnetään Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyjä virtausparametrejä. Poiketen aiemmasta tutkimuksesta virtausanalyysi suoritetaan HPHE:lle, jonka lämpöputket eivät ole siivitettyjä.

Tässä tutkimuksessa käsitellään ainoastaan porrastetusti sijoiteltuja lämpöputkia lämmönvaihtimessa (kuva 3, (b)). Virtaussimulaatiota varten mallinnettu Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyyn laitteistoon perustuva geometria 1 on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Virtaussimulaatiota varten mallinnettu Delpech et al. (2018) tutkimuksen mukainen geometria 1.

Mallinnetussa geometriassa 1 on hyödynnetty Delpech et al. (2018) esitettyä lämpöputkien sijoittelua. Delpech et al. (2018) esitetty lämpöputkien sijoittelu on myös Incropera (2007) esittämän sijoittelutavan mukainen. Lämpöputkien sijoittelu virtaussimulaatiota varten mallinnetussa HPHE:ssä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Putkien sijoittelu geometriassa 1.

Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitetystä geometriasta poiketen tässä tutkimuksessa tutkitaan ainoastaan lämpöputkilämmönvaihtimia, joiden putkia ei ole varusteltu siivekkeillä. Taulukossa 5 on esitetty kuuden toisistaan poikkeavan virtaussimulaatioita varten mallinnettujen lämpöputkilämmönvaihtimien mitat sekä lämpöputkien lukumäärät sekä sijoittelu laitteistossa.

Taulukko 5. Virtausanalyysia varten mallinnettujen lämpöputkilämmönvaihtimien tekniset mitat, lämpöputkien määrät sekä lämpöputkien väliset etäisyydet.

	Geometria 1	Geometria 2	Geometria 3	Geometria 4	Geometria 5	Geometria 6
Putkien kokonaismäärä	200	200	200	300	280	200
Putkien määrä rivissä	10	10	10	15	10	10
Rivien lukumäärä	20	20	20	20	28	20
Putken halkaisija D [mm]	43	43	43	43	43	31
S_T [mm]	63	63	63	63	63	46
S_D [mm]	63	63	63	63	63	46
Lämpöputken korkeus [mm]	962	1500	600	962	962	962
Laitteen leveys [mm]	780	780	780	1095	780	610
Laitteen syvyys [mm]	1570	1570	1570	1570	2160	1230

3.3 Teoreettinen laskenta HPHE:n painehäviöstä

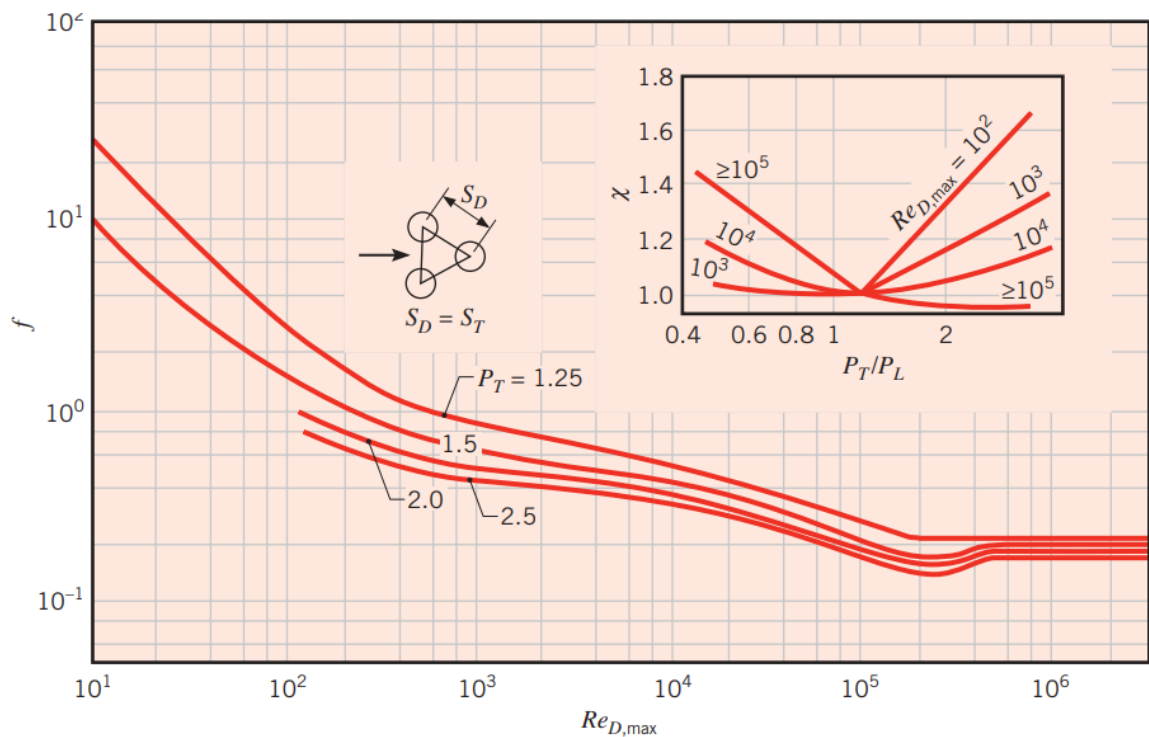
Virtausanalyysin lisäksi Delpech et al. (2018) esittämälle geometrialle suoritetaan teoreettinen laskenta painehäviön suuruudesta Incropera (2007) esittämillä laskentakaavoilla. Laitteiston laajennukselle sekä supistukselle lasketaan painehäviö Butcher (2007) esittämillä laskentakaavoilla.

Painehäviö Δp_1 virtaukselle porrastettujen putkirivien lävitse voidaan laskea seuraavasti

$$\Delta p_1 = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{\max}^2}{2} \right) f \quad (5)$$

jossa N_L on lämpöputkirivien määrä, χ on korrelaatiokerroin, ρ on tiheys [kg/m^3], V_{\max} on suurin virtausnopeus [m/s] ja f on kitkakerroin (Incropera 2007, 434).

Porrastetusti sijoitettujen putkirivien tapauksessa kitkakerroin f ja korrelaatiokerroin χ voidaan lukea kuvaajasta, joka on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kitkakerroin f ja korjauskerroin χ , porrastetusti sijoitettujen lämpöputkien tapauksessa (Incropera 2007,435).

Suurin nopeus virtaukselle voi esiintyä, joko poikittaisella pinnalla A_1 tai diagonaalilla pinnalla A_2 . Pinta-alat A_1 ja A_2 on esitetty kuvassa 3. Jos suurin virtausnopeus esiintyy pinnalla A_1 , voidaan suurin virtausnopeus V_{max} laskea seuraavasti

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (6)$$

jossa S_T on putkien poikittaissuuntainen etäisyys [m] ja D on putken halkaisija [m] ja V on keskimääräinen virtausnopeus [m/s] (Incropera 2007, 433).

Putkien sijoittelu voi johtaa geometriaan, jossa suurin virtausnopeus esiintyy poikkipinta-alalla A_2

$$2(S_D - D) < (S_T - D) \quad (7)$$

jossa S_D on putkien diagonaalinen etäisyys toisistaan [m] (Incropera 2007, 433).

Jos suurin virtausnopeus esiintyy pinnalla A_2 , suurin virtausnopeus V_{max} voidaan laskea seuraavasti (Incropera 2007, 434):

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (8)$$

Reynoldin luku virtaukselle voidaan laskea seuraavasti

$$Re_{D,max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (9)$$

Jossa μ on virtaavan aineen viskositeetti [kg/ms] (Incropera 2007, 433).

Aineen massavirta \dot{m} voidaan laskea seuraavasti

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (10)$$

jossa A_c on virtauksen poikkipinta-ala [m^2] ja u_m on keskimääräinen virtausnopeus (Incropera 2007, 471).

Aineen virtausnopeus V voidaan laskea seuraavasti

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} \quad (11)$$

Kuvassa 5 esitettyyn korjauskertoimen χ laskennassa tarvittavat termit P_T ja P_L voidaan laskea seuraavasti

$$P_T = \frac{S_T}{D} \text{ ja } P_L = \frac{S_L}{D} \quad (12)$$

jossa S_L on putkien pitkittäinen etäisyys toisistaan [m] (Incropera 2007, 471).

Incropera (2007) esittämässä laskentakaavoissa ei huomioida painehäviötälämmönvaihtimen osioissa, jossa virtaustilavuus laajenee ennen porrastettuja lämpöputkia ja supistuu takaisin alkuperäiseen tilavuuteen porrastettujen lämpöputkien jälkeen. Painehäviö Δp_2 voidaan laskea laajentuvalla osalla seuraavasti

$$\Delta p_2 = \zeta \frac{1}{2} \rho c_1^2 \quad (13)$$

jossa c_1 on aineen virtausnopeus ennen laajennusta [m/s] ja ζ on painehäviökerroin (Butcher 2007, 21).

Painehäviö Δp_3 voidaan laskea laajentuvalla osalla seuraavasti

$$\Delta p_3 = \zeta \frac{1}{2} \rho c_2^2 \quad (14)$$

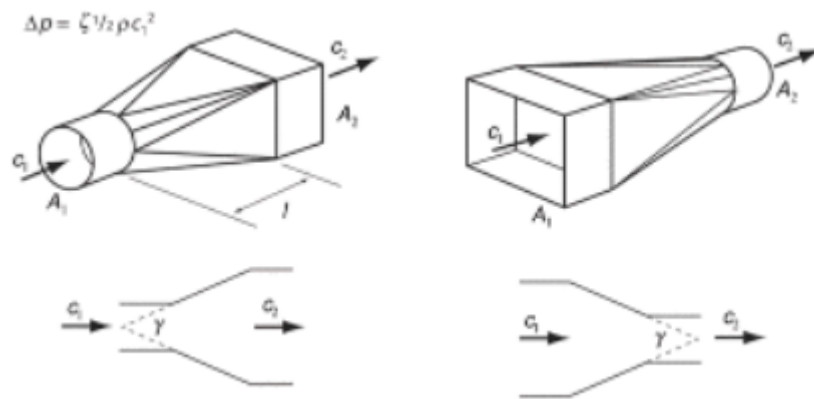
jossa c_2 on virtausnopeus supistuksen jälkeen [m/s] (Butcher 2007, 21).

Laitteiston kokonaispainehäviö voidaan Δp_{tot} laskea seuraavasti

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \quad (15)$$

Painehäviön laskentaan supistuksissa ja laajennuksissa sovelletaan sarjaan kytkettyjen putkien massavirran määritelmää. Sarjaan kytkettyjen putkien massavirta on vakio (Granger 2012, 521). Granger (2012) esittämän määritelmän perusteella voidaan johtaa Incropera (2007) esittämästä massavirran m laskentakaavasta (10) laskentakaava (11), jonka avulla voidaan laskea virtausnopeudet c_1 ja c_2 .

Painehäviökertoimen laskemiseen tapauksessa, jossa laajentuminen tapahtuu putkesta suorakulmion muotoiseen kanavaan ei ole Butcherin (2007) mukaan viimeaikaista tutkimusta. ASHRAE:n mukaan painehäviökertoimet pätevät niin siirryttäessä ympyränmuotoisesta suorakulmaiseen kuin suorakulmaisenmuotoisesta ympyränmuotoiseen geometriaan, ja tilanteissa, jossa kaventumiskulma $\gamma > 30^\circ$ painehäviökertoimet ovat hyvin samantyyppisiä kuin symmetrisen laajentumisen kertoimet ympyrän muotoisesta ympyränmuotoiseen (Butcher 2007, 4–60). Geometriat laajennukselle, sekä supistukselle on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Laajeneminen putkesta suorakulmioon (vas.). Supistuminen suorakulmiosta putkeen (oik.). (Butcher 2007, 60).

Butcherin (2007) mukaan on oletettavaa, että symmetrisen ja epäsymmetrisen laajentumisen tai supistuksen tapauksessa painehäviökertoimen ζ arvot saattavat olla suuremmat kuin ympyränmuotoisissa tapauksissa. Painehäviökertoimet symmetriselle ympyränmuotoiselle laajennukselle turbulenttisen virtauksen tapauksessa on esitetty kuvassa 8 (Butcher 2007, 30).

Divergence angle, γ	Area ratio, A_2 / A_1							
	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.44	3.0	4.0
40°	0.058	0.095	0.13	0.17	0.20	—	0.38	0.55
30°	0.055	0.082	0.104	0.14	0.17	0.168*	0.31	0.49
20°	0.050	0.072	0.091	0.11	0.125	—	0.21	0.40

Kuva 8. Symmetrisen laajentumisen painehäviökertoimen ζ arvot eri kaventumiskulman γ arvoilla (Butcher 2007, 30).

Painehäviökertoimet symmetriselle ympyränmuotoiselle supistukselle turbulenttisen virtauksen tapauksessa on esitetty kuvassa 9 (Butcher 2007, 4-31).

Ratio, A_1/A_2	Convergence angle, γ							
	15°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
2	0.05	0.05	0.06	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
4	0.04	0.04	0.06	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
6	0.04	0.04	0.06	0.07	0.18	0.28	0.36	0.42
10	0.05	0.05	0.07	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Kuva 9. Symmetrisen supistuksen painehäviökertoimen ζ arvot eri suppenemiskulman γ arvoilla (Butcher 2007, 30).

Delpech et al. (2018) tutkimuksen mukaiselle lämmönvaihtimen geometrialle suoritetaan virtausanalyysi hyödyntämällä lämpötilaa lukuun ottamatta tutkimuksessa esitettyjä virtausparametrejä. Virtausanalyysin tarkoitus on tarkastella lämpötilan vaikutusta laitteistossa syntyvään painehäviöön. Virtaavana aineena käytetään muiden virtaussimulaatioiden tavoin ilmaa. Lämpötilat sekä ilman aineominaisuudet lämpötilan mukaan, joilla virtaussimulaatiot suoritetaan, on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Virtaussimulaatiossa lämpötilan vaikutukseen painehäviön suuruuteen käytettävät lämpötilat ja ilman aineominaisuudet lämpötilan mukaisesti. Ilman aineominaisuudet (Anon 2010, 172).

Lämpötila T [°C]	Tiheys ρ [kg/m ³]	Viskositeetti μ [10 ⁻⁶ kg/ms]
20	1.1885	18.205
200	0.7359	26.046
400	0.5172	33.284

Teoreettisesti virtaavan aineen lämpötila vaikuttaa ilman aineominaisuuksiin, kuten tiheyteen sekä viskositeettiin (Anon 2010, 173). Tiheys vaikuttaa teoreettisesti sekä Reynoldisin lukuun kaavassa (9), että virtausnopeuden V laskentaan kaavassa (11).

4 Tulokset

Tässä kappaleessa suoritetaan reunaehtojen määrittäminen sekä teoreettinen laskenta. Lisäksi virtaussimulaation tulokset esitetään tässä kappaleessa. Virtaussimulaation tulokset on listattu geometrian sekä virtausnopeuden lisäksi myös lämpötilan vaikutuksesta.

4.1 Reunaehtojen määrittäminen

Reunaehtojen määrittäminen suoritettiin Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulin avulla toteutettuna virtausanalyysinä putken painehäviön laskennasta. Virtausanalyysin tuloksia verrataan teoreettiseen laskentaan putken painehäviöstä. Taulukossa 7 on putken painehäviön laskennassa, sekä virtaussimulaatiossa käytetyt alkuarvot.

Taulukko 7. Lähtötiedot putken painehäviön laskentaan sekä virtausanalyysiin. Ilman ominaisuudet (Anon 2010, 173) Teräsputken pinnankarheus (Anon 2010, 1058).

Virtaava aine	Ilma
Lämpötila T [°C]	20
Tiheys ρ [kg/m ³]	1.1885
Viskositeetti η [Pa×s]	18.205
Virtausnopeus w [m/s]	5.1
Teräsputken pinnankarheus k [mm]	0.04

Reynoldsin luku Re voidaan laskea kaavalla (4) seuraavasti

$$Re = \frac{1.1885 \frac{kg}{m^3} \times 5.1 \frac{m}{s} \times 0.050 m}{18.205 \times 10^{-6} \frac{kg}{ms}} = 16647.5$$

$Re > 3000$, joten virtaus on turbulენტtista (Butcher 2007, 3). Kitkakerroin λ voidaan laskea kaavalla (3) seuraavasti

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{16647.5} + \frac{0.04}{3.7} \right) \Rightarrow \lambda = 0.0286$$

Putken painehäviö Δp voidaan laskea kaavalla (1) seuraavasti

$$\Delta p = 0.0286 \times \frac{10 m}{0.050 m} \times \frac{1}{2} \times 1.1885 \frac{kg}{m^3} \times \left(5.1 \frac{m}{s} \right)^2 = 88.4 Pa$$

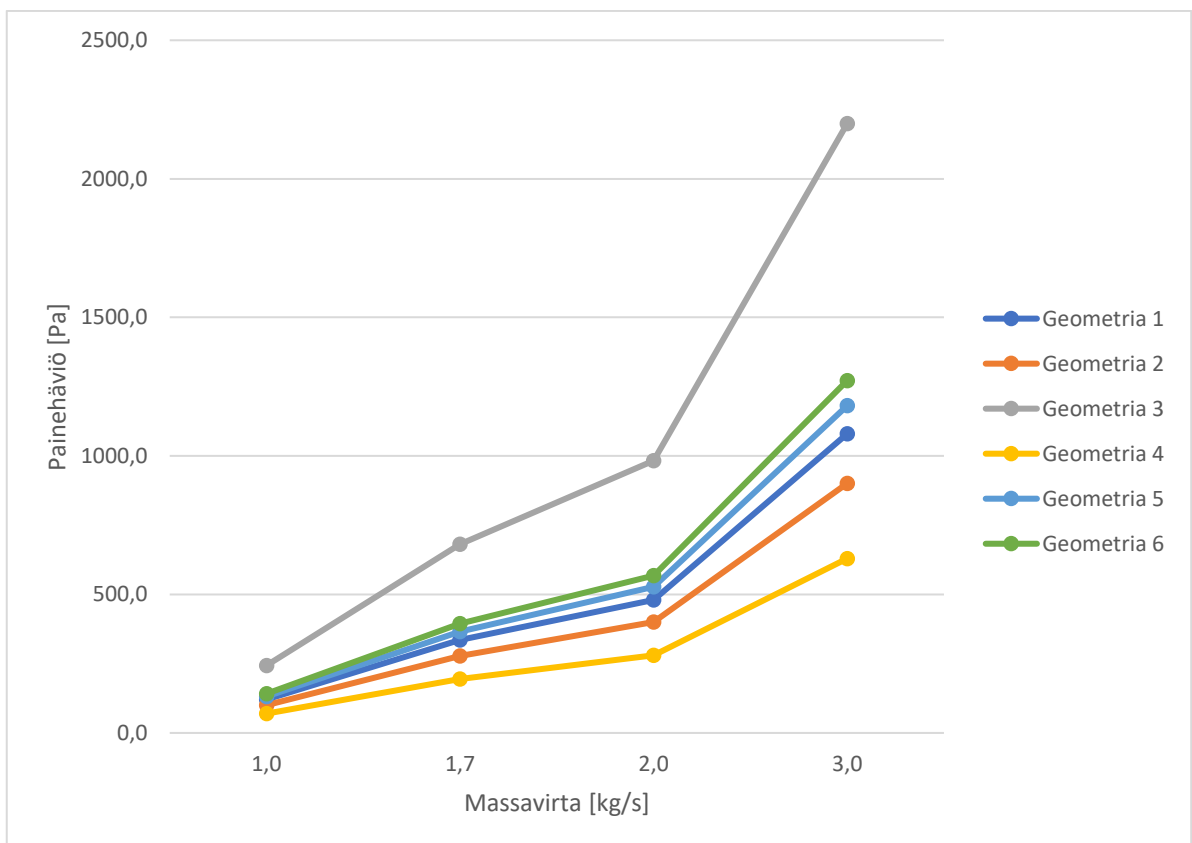
Virtausanalyysin tulokset putken painehäviöstä sekä teoreettisen laskennan tuloksesta on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Tulokset reunaehtojen määrittämisestä.

	Virtausanalyysi massa- virta	Virtausanalyysi vir- tausnopeus	Teoreettinen laskenta
Painehäviö Δp [Pa]	82.6	83.1	88.4
Suhteellinen virhe [%]	6.6	6.0	-

4.2 Virtausanalyysin tulokset HPHE:n painehäviöstä Solidworks-ohjelmistolla

Virtausanalyysi suoritettiin Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulilla kuudelle erilaiselle HPHE:n geometrialle putken painehäviön avulla määritellyillä reunaehdoilla. Geometrian muutosten lisäksi jokaiselle geometrialle suoritettiin virtaussimulaatio erisuuruisilla massavirran arvoilla. Massavirran suuruus vaihtelee 1–3 kg/s välillä, minkä lisäksi virtausanalyysi on suoritettu Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitetyllä massavirran arvolla, jonka arvoksi ilmoitettiin 6000 kg/h. Virtaussimulaation tulokset koottiin taulukkoon, jossa X-akselilla on ilmoitettu massavirran suuruus ja Y-akselilla painehäviön suuruus. Virtaussimulaation tuloksista muodostettu viiva- diagrammi on esitetty kuvassa 10 ja virtaussimulaation tulokset painehäviön Δp suuruudesta on esitetty numeerisesti taulukossa 9.



Kuva 10. Virtaussimulaation tulokset painehäviöstä. Painehäviön käyrän kulmakerroin kasvaa huomattavasti, kun massavirtaa kasvatetaan 2 kilogrammasta-, 3 kilogrammaan sekunnissa.

Taulukko 9. Virtaussimulaation tulokset esitettynä numeerisesti.

Painehäviö Δp [Pa]	Massavirta \dot{m} [kg/s]			
	1,0	1,7	2	3
Geometria 1	121,0	335,4	479,9	1079,6
Geometria 2	100,2	278,0	400,7	900,6
Geometria 3	243,5	681,2	982,2	2199,2
Geometria 4	69,8	194,4	279,8	629,5
Geometria 5	131,7	365,9	526,9	1181,2
Geometria 6	141,6	394,7	567,9	1271,7

Suoritetaan teoreettinen laskenta Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettylle geometrialle tutkimuksessa esitetyillä lämpötermisillä alkuarvoilla Incropera (2007) esittämien laskenta-kaavojen avulla. Taulukossa 10 on esitetty teoreettisessa laskennassa käytetyt alkuarvot.

Taulukko 10. Teoreettisessa laskennassa käytetyt alkuarvot. Ilman aineominaisuudet (Anon 2010, 173).

Virtaava aine	Ilma
Lämpötila T [°C]	204
Tiheys ρ [kg/m ³]	0.7359
Viskositeetti μ [10 ⁻⁶ kg/ms]	26.046
Rivimäärä N_L	20
$S_T = S_D$ [mm]	63
Massavirta \dot{m} [kg/h]	6000

Ilman virtausnopeus V voidaan laskea kaavalla (7) seuraavasti

$$V = \frac{\frac{6000 \text{ kg}}{3600 \text{ s}}}{0.7359 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (0.962 \text{ m} \times 0.780 \text{ m})} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Suurimman virtausnopeuden sijainti voidaan selvittää kaavalla (3) seuraavasti

$$2 \times (63 \text{ mm} - 43 \text{ mm}) < (63 \text{ mm} - 43 \text{ mm}) = 40 \text{ mm} < 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{Epätosi}$$

Kaavan (3) tulos on epätosi, joten suurin virtausnopeus V_{max} esiintyy poikkipinta-alalla A_1 ja voidaan laskea kaavalla (2) seuraavasti

$$V_{max} = \frac{63 \text{ mm}}{63 \text{ mm} - 43 \text{ mm}} \times 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9.5 \text{ m/s}$$

Jolloin Reynoldsin luku voidaan laskea kaavalla (5) seuraavasti

$$Re_{D,max} = \frac{0.7359 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.043 \text{ m}}{26.046 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}} = 11\,550.9$$

Korrelaatiokerrointa χ ja kitkakerrointa f varten tarvittavat termit P_T ja P_L voidaan laskea kaavalla (9) seuraavasti

$$P_T = \frac{63 \text{ mm}}{43 \text{ mm}} = 1.5 \text{ ja } P_L = \frac{54.6 \text{ mm}}{43 \text{ mm}} = 1.3, \quad \text{jolloin } \frac{P_T}{P_L} = 1.15$$

$$\Rightarrow \chi = 1.0 \text{ ja } f = 0.46$$

Painehäviö Δp_1 voidaan laskea kaavalla (1) seuraavasti.

$$\Delta p_1 = 20 \times 1.0 \left(\frac{0.7359 \frac{kg}{m^3} \times \left(9.5 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \right) \times 0.46 = 305.5 Pa$$

Teoreettinen laskenta suoritetaan geometrialle 1, jonka laajennuksen laajentumiskulma $\gamma = 70^\circ$. Butcherin (2007) esittämässä taulukossa painehäviökerrointa ei ole ilmoitettu kyseiselle laajentumiskulmalle. Painehäviön laskentaan hyödynnetään Delpech et al. (2018) esittämiä arvoja painehäviökertoimista. Painehäviökertoimet laajennukselle ja supistukselle on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Painehäviökertoimet laajennuksessa sekä supistuksessa (Delpech et al. 2018, 659)

	Painehäviökerroin ζ
Laajennus	0.755
Supistus	0.08

Soveltamalla Grangerin (2012) esittämää massavirran määritelmää sarjaan kytkettyjen putkien tapauksessa voidaan virtausnopeus c_1 laskea kaavalla (11) seuraavasti

$$c_1 = \frac{\frac{6000}{3600} kg/s}{0.7359 \frac{kg}{m^3} \times \frac{\pi}{4} \times (0.4m)^2} = 18 m/s$$

Oletetaan, että massavirta \dot{m} vakio koko laitteen lävitse, jolloin $c_1 = c_2$. Laajennuksen painehäviö Δp_1 voidaan laskea kaavalla (13) seuraavasti

$$\Delta p_2 = 0.755 \times \frac{1}{2} \times 0.7359 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(18 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 92.2 \text{ Pa}$$

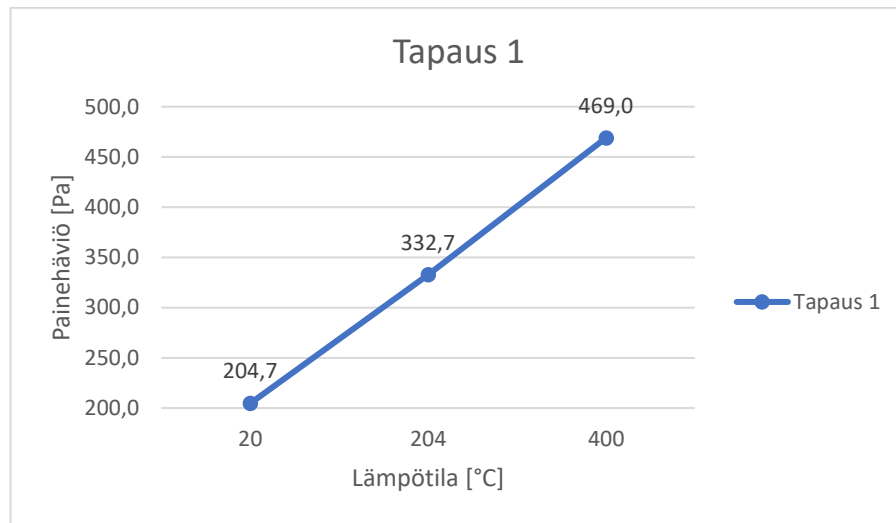
Supistusosan painehäviö Δp_2 voidaan laskea kaavalla (14) seuraavasti

$$\Delta p_2 = 0.08 \times \frac{1}{2} \times 0.7359 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(18 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 9.8 \text{ Pa}$$

Laitteistossa syntyvä kokonaispainehäviö Δp_{tot} voidaan laskea kaavalla (15) seuraavasti

$$\Delta p_{tot} = 306 \text{ Pa} + 92.2 \text{ Pa} + 9.8 \text{ Pa} = 408 \text{ Pa}$$

Lämpötilan vaikutusta HPHE:n painehäviön syntymisessä tutkittiin suorittamalla geometrialle 1 virtausanalyysi kolmessa eri lämpötilassa. Lämpötilaa tutkittiin sekä korkeammassa, että matalammassa lämpötilassa, kuin Delpech et al. (2018) tutkimuksessa. Virtausanalyysin parametreinä hyödynnettiin lämpötilaa lukuun ottamatta Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyjä virtausparametreja. Tulokset lämpötilan vaikutuksesta virtausanalyysin avulla tutkittuun painehäviöön eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Lämpötilan vaikutus painehäviön suuruuteen geometrian 1 mukaisella HPHE:n geometrialla. Virtaavan aineen lämpötilan noustessa myös painehäviön Δp arvo kasvaa.

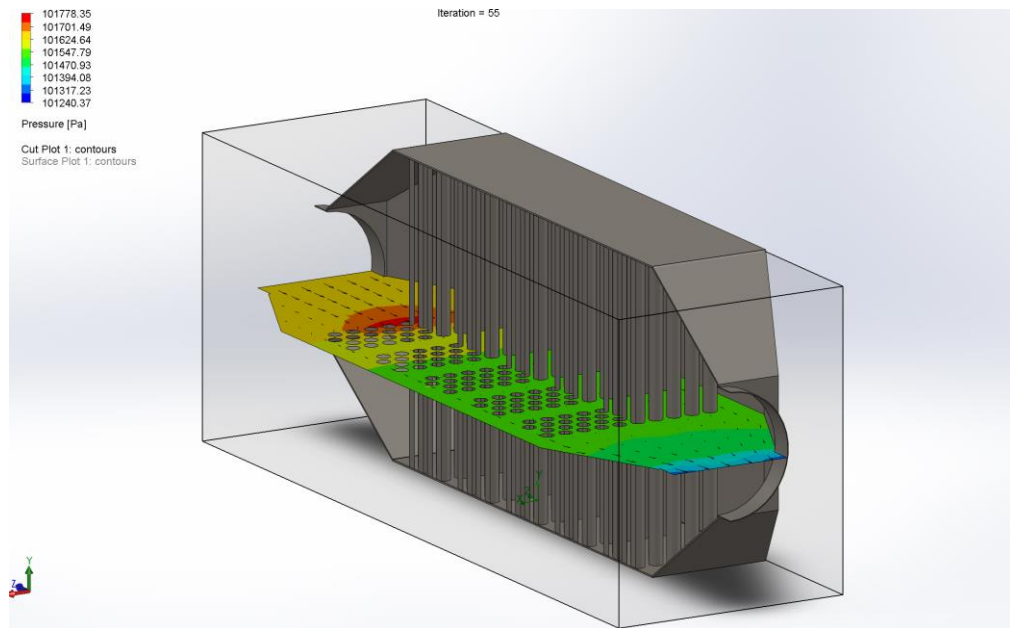
4.3 Yhteenveto tuloksista

Taulukossa 12 on esitetty Delpech et al. (2018) esittämä painehäviö lämpöputkilämmönvaihtimen virtauksessa, teoreettisen laskennan tulos painehäviön suuruudesta, sekä virtausanalyysin tulos painehäviön suuruudesta Delpech et al. (2018) esittämälle geometrialle.

Taulukko 12. Tutkimustulosten yhteenveto HPHE:n painehäviöstä

	Delpech et al. (2018)	Teoreettinen laskenta	Virtaussimulaatio
Painehäviö Δp [Pa]	294.0	408.0	335.4
Suhteellinen virhe [%]	-	38.8	14.1

Kuvassa 12 on esitetty poikkileikkauksen virtausjakauma, jossa värijakauma kuvastaa painetta virtauksesta lämpöputkilämmönvaihtimen lävitse. Poikkileikkaus on geometrian 1 mukaisesta laitteistosta Delpech et al. (2018) esittämällä virtausparametreillä.



Kuva 12. Painevaihtelu virtaussimulaatiossa geometrialle 1. Lämpötila $T = 204^{\circ}\text{C}$ ja massavirta $\dot{m} = 6000 \text{ kg/h}$. Kuvasta on huomattavissa punaisena sekä oranssina värinä esiintyvä painekeskittymä ensimmäisen putkirivin keskivaiheilla.

5 Pohdinta

Tässä tutkimuksessa suoritettiin kirjallisuuskatsaus aiempien tutkimusten perusteella lämpöputkista, lämpöputkilämmönvaihtimista sekä niiden käytöstä lämmöntalteenottojärjestelmissä. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi tutkimuksessa suoritettiin virtausanalyyskejä eri HPHE:n geometrioille Solidworks-ohjelmiston Flow simulation -moduulin avulla. Virtausanalyysit ovat perustuneet, joko täysin tai osittain Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyyn laitteistoon. Virtausanalyysien lisäksi painehäviö laskettiin teoreettisesti kirjallisuudessa esitettyjen laskentakaavojen avulla.

5.1 Vertailu ja yhtymäkohdat aiempaan tutkimukseen

Lämpöputkia ja niiden eri sovellutuksia sekä mahdollisuuksia on tutkittu hyvin laajasti eri teollisuuden ja teknologioiden osa-alueilla. Aiemmissä tutkimuksissa on pääsääntöisesti keskitytty tutkimaan lämpöputkilämmönvaihtimien soveltuvuutta erityyppisiin

sovellutuksiin. Näin ollen aiemmissa tutkimuksissa painehäviön laskenta on hyvin pieni osa tutkimusta, tai asiaa ei ole käsitelty ollenkaan.

Tässä tutkimuksessa suoritettujen virtausanalyysien ja teoreettisen laskennan tuloksien vertailun mahdollistamiseksi hyödynnettiin Delpech et al. (2018) esittämää geometriaa vertailu-geometriana. Tutkimuksesta hyödynnettiin myös ilmoitetut virtausparametrit sekä teoreettiseen laskentaan, että Solidworks -ohjelmistolla suoritettussa virtausanalyysissä.

Kun tarkastellaan HPHE:n painehäviöstä saatuja tuloksia, voidaan havaita suuriakin eroavaisuuksia. Suurin eroavaisuus painehäviössä on Delpech et al. (2018) tutkimustulosten ja Incropera (2007) esittämien laskentakaavojen avulla suoritettussa teoreettisessa laskennassa. Suhteellinen eroavaisuus näiden kahden tutkimustuloksen välillä on 38.8 %, vaikka teoreettinen laskenta suoritettiin Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitetyillä virtausparametreillä. Virtaussimulaation tulosten ja Delpech et al. (2018) tutkimuksessa esitettyjen tulosten välillä suhteellinen eroavaisuus on 14.1 %.

Kun tarkastellaan tämän tutkimuksen tuloksia aiempiin tutkimustuloksiin on hyvä myös tämän tutkimuksen sisäisten tutkimusmenetelmien välisiä eroavaisuuksia. Incropera (2007) esittämällä laskentakaavoilla suoritettua teoreettisen laskennan ja Solidworks -ohjelmistolla suoritettua virtausanalyysin tuloksien suhteellinen eroavaisuus on 17.8 %.

5.2 Reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimuksessa hyödynnettiin kahta tutkimusmenetelmää HPHE:ssä syntyvän painehäviön selvittämiseen. Ensimmäisenä tutkimusmenetelmänä tutkimuksessa hyödynnettiin kirjallisuudessa esitettyjä laskentakaavoja painehäviön teoreettiseen laskentaan. Toisena menetelmänä hyödynnettiin Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulia, jolla suoritettiin virtausanalyyskejä toisistaan poikkeaville HPHE:n geometrioille. Virtaussimulaation avulla tutkittiin laitteiston geometrian, virtaavan aineen aineominaisuuksien sekä aineen virtausnopeuden vaikutusta painehäviöön. Menetelmät tuottivat tutkimustuloksia niille asetettujen

tavoitteiden mukaisesti, jolloin tutkimuksen validiteettia ja reliabiliteettia voidaan pitää hyvänä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten painehäviö lasketaan lämpöputkilämmönvaihtimessa. Painehäviö laskettiin teoreettisesti kirjallisuudessa esitetyillä laskukaavoilla tutkimuksen mukaiselle lämpöputkien sijoittelulle. Näin ollen tutkimusmenetelmä vastaa tutkimuskysymykseen yksiselitteisesti. Menetelmän avulla tutkimus on toistettavissa, vaikka tässä tutkimuksessa teoreettinen laskenta on suoritettu vain kerran. Tässä tapauksessa kerran suoritettu teoreettinen laskenta lämpöputkilämmönvaihtimen painehäviön laskennasta vastaa tutkimuskysymykseen.

Toisena tavoitteena oli kartoittaa painehäviöön vaikuttavia tekijöitä, kuten laitteiston geometrian ja virtaavan aineen aineominaisuuksien vaikutusta syntyvän painehäviön suuruuteen. Tätä tutkittiin suorittamalla virtaussimulaatioita kuudelle toisistaan poikkeaville lämpöputkilämmönvaihtimen geometrioille. Geometriamuutosten lisäksi painehäviön syntymistä tutkittiin sekä erisuurilla massavirran arvoilla, että eri virtaavan aineen lämpötiloilla. Menetelmänä virtaussimulaatio vastasi sekä tutkimuskysymykseen, että täytti tutkimusmenetelmälle asetetun tavoitteen.

5.3 Virhetarkastelu

Tutkimuksessa suoritettiin teoreettinen laskenta vain kerran sekä putken painehäviölle, että HPHE:n painehäviölle. Reunaehtojen määrittämisessä Solidworks-ohjelmistolla saadut tulokset painehäviöstä eroavat teoreettisen laskennan tuloksista vain 6,0–6,6 %. Voidaan siis olettaa virtaussimulaatiolla saatavat tulokset riittävän tarkoin tähän tutkimukseen. Selkeitä syytä tulosten eroavaisuuteen ei pystytty nimeämään. Tämän tiedon pohjalta voitiin virtausanalyysi suorittaa mallinnetuille lämpöputkilämmönvaihtimille.

Teoreettisessa laskennassa käytetään myös ilman ominaisuuksia, jotka on taulukoitu 1 bar paineessa (Anon 2010, 173). Virtausanalyysi Solidworks-ohjelmiston Flow Simulation -moduulilla on suoritettu ilmakehän paineessa, jonka oletusarvo ohjelmistossa on 101 325 Pa. Tämän lisäksi virtaussimulaatiossa aineen paine vaihtelee laitteistossa, jolloin virtaavan aineen tiheys sekä viskositeetti vaihtelevat. Paineen vaihtelu ei ole suurta, mutta virhetarkastelun kannalta huomioitava.

Tutkimustuloksilla on myös eroavaisuuksia aiempaan tutkimukseen verrattuna. Kun tutkimustuloksia vertaa Delpech et al. (2018) ilmoittamiin tutkimustuloksiin samasta geometriasta on huomioitava, että Delpech et al. (2018) suoritti tutkimuksen HPHE:lle, jossa lämpöputkissa oli lämmönsiirtoa tehostavat siivekkeet. Yllättävää tässä on kuitenkin, että Delpech et al. (2018) tekemän tutkimuksen tulokset painehäviön suuruudesta ovat pienemmät kuin tämän tutkimuksen tulokset. Voisi olettaa, että Delpech et al. (2018) tutkimuksessa käytetyt siivekkeiset lämpöputket lisääisivät ilmanvastusta, joka kasvattaisi laitteistossa syntyvää painehäviötä.

Yksi selittävä tekijä näinkin suurelle suhteelliselle eroavaisuudelle teoreettisen laskennan tulosten ja Delpech et al. (2018) esittämien tutkimustuloksien välillä on teoreettisessa laskennassa tarvittujen korrelaatiokertoimen χ , sekä kitkakertoimen f arvojen lukeminen kuvaajasta. Kuvaaja on suhteellisen epätarkka, joka vääristää helposti teoreettisen laskennan tuloksia.

5.4 Avaintulokset

Lämpöputkitekniologia soveltuu monipuolisesti hukkalämmön hyödyntämiseen eri teollisuuden aloille. Teknologian avulla voidaan vähentää merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä luoda kustannustehokas ratkaisu hukkalämmön hyödyntämiseen.

Yksi selkeimmistä avaintuloksista tutkimuksessa on virtaavan aineen lämpötilan ja massavirran vaikutus laitteistossa syntyvään painehäviöön. Virtaavan aineen lämpötila ja

massavirta vaikuttavat kumpikin merkittävämmiin painehäviön suuruuteen kuin laitteen geometria tai lämpöputkien sijoittelu ja niiden lukumäärä.

Toinen avaintuloksista on virtauksen aiheuttama painekeskittymä ensimmäisen putkirivin keskikohdalle. Painekeskittymä on havaittavissa punaisena sekä oranssina värinä kuvassa 12 esitetyssä leikkauskuvassa.

Kolmantena teoreettisesta laskennasta ja aiemmasta tutkimuksesta, jonka Delpech et al. (2018) toteuttivat on havaittavissa, että lämpöputkilämmönvaihtimen painehäviöstä noin 25–33 % syntyy HPHE-laitteiston laajennus- ja supistumisosiossa, jossa virtauksen poikkipinta-ala laajenee alkuperäisestä pinta-alasta lämmönvaihtimen poikkipinta-alaan.

5.5 Keskeiset johtopäätökset

Lämpöputkilämmönvaihtimen suunnitteluvaiheessa tulisi pyrkiä minimoimaan laitteistossa syntyvää painehäviötä. Painehäviön suuruuteen on kuitenkin tässä tutkimuksessa saavutettujen tulosten perusteella vaikeaa vaikuttaa muuttamalla laitteiston geometriaa, sillä virtaavan aineen ominaisuudet sekä virtausnopeus vaikuttaa huomattavasti enemmän syntyvän painehäviön suuruuteen kuin laitteiston geometria.

Lämpöputkilämmönvaihtimen painehäviöstä merkittävä osa esiintyy laitteiston laajennus- ja supistusosiossa. Laajennusosassa syntyy merkittävästi suurempi painehäviö kuin supistusosiossa. Laajennusosa synnyttämän painekeskittymään vaikuttaa todennäköisesti eniten laajennusosan tutkimuksen käsiteltyjen laitteistojen korkea laajentumiskulma γ , jolloin virtaus ei ehdi tasoittua suuremmalle poikkipinta-alalle ennen lämpöputkia.

Kun tutkimuksen eri metodien avulla saavutettuja tutkimustuloksia verrataan keskenään tai aiemmin saavutettuihin tuloksiin huomataan, että tulosten välillä on suhteellisen suuriakin eroavaisuuksia. Tulosten välisiä eroavaisuuksia tarkasteltaessa on kuitenkin tärkeä

huomioida painehäviön suuruutta. Tulokset on ilmoitettu Pascaleissa, joka on hyvin pieni yksikkö paineen mittaamiseen. Todellisuudessa tulosten eroavaisuus on hyvin pientä, vaikka tulosten väliset suhteelliset eroavaisuudet esitettynä prosenttiyksikköinä ovatkin suhteellisen suuret.

5.6 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Tutkimustulokset luovat yleiskatsauksen lämpöputkiteknologian toimintaperiaatteista, lämpöputkien käyttökohteista sekä hukkalämmön hyödyntämisen tarpeellisuudesta. Tutkimuksessa on tuotu esille laskentamalli laitteiston suunnittelussa huomioitavaan painehäviön laskentaan. Virtaussimulaatioiden tulokset antavat lukijalle käsityksen painehäviön syntymiseen vaikuttavista ilmiöistä sekä virtauksen käyttäytymisestä lämpöputkilämmönvaihtimissa.

Tuloksia voidaan hyödyntää kun pohditaan millaisella laitteistolla hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää eri teollisuuden aloilla. Tutkimuksessa esitettyjen tulosten avulla voidaan arvioida mahdollisen lämpöputkilämmönvaihtimen painehäviön vaikutuksia prosessissa, jos lämpöputkilämmönvaihdin valitaan hukkalämmön talteenottojärjestelmän toteuttamiseen.

5.7 Jatkotutkimusaiheet

Tärkeimpänä jatkotutkimusaiheena on lämmönsiirron vaikutus painehäviön suuruuteen laitteistossa. Lämmönsiirto voi vaikuttaa merkittävästi painehäviön syntymiseen, kuten havaitaan jo pelkästään eri lämpötiloilla suoritettujen virtaussimulaation tuloksista. Kyseisistä tuloksista voidaan havaita, että matalassa lämpötilassa painehäviö on merkittävästi pienempi kuin korkeammassa lämpötilassa.

Tutkimuksessa ei ole huomioitu laisinkaan erilaisten geometrioiden vaikutusta itse laitteen tehokkuuteen tai lämmönsiirtokapasiteettiin. Lämmönsiirron vaikutuksen lisäksi myös laitteen geometrian vaikutusta laitteen tehokkuuteen ja lämmönsiirtokapasiteettiin olisikin hyvä

tutkia. Samoin myös painehäviön suuruuden vaikutusta laitteen tehokkuuteen kannattaisi tarkastella. Voitaisiin myös tutkia, voidaanko painehäviön kasvattamisella hidastaa aineen virtausnopeutta laitteistossa ja vaikuttaako ilmiö positiivisesti laitteiston lämmönsiirtotehokkuuteen.

Virtaussimulaatio voitaisiin myös suorittaa Solidworks-ohjelmiston sijaan jollain toisella ohjelmistolla. Esimerkiksi Ansys Fluent -ohjelmistolla suoritettujen virtaussimulaatiotulosten vertaaminen tässä tutkimuksessa esitettyihin tuloksiin saattaisi tuottaa tarkempia tutkimustuloksia, sekä laajempaa ymmärrystä virtauksen käyttäytymisestä laitteistossa.

6 Yhteenveto

Lämmönvaihtimien valinnassa lämmöntalteenottojärjestelmään HPHE on erittäin kilpailukykyinen verrattuna perinteisiin lämmönvaihtimiin. Lämpöputkilämmönvaihtimen avulla voidaan saavuttaa tehokas, edullinen, pienikokoinen sekä helposti huollettava ratkaisu hyvin monelle eri teollisuuden alalle hukkalämmön hyödyntämiseen. Laitteiston aiheuttama painehäviö on erittäin pieni verrattuna perinteisiin lämmönvaihtimiin, jolloin laitteisto voidaan asentaa olemassa olevaan prosessiin ongelmitta.

Vaikka laitteistossa syntyvän painehäviön suuruus on huomattavasti perinteisissä lämmönvaihtimissa syntyvää painehäviötä pienempi, on painehäviötä vaikea niin pienentää kuin kasvattaa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää painehäviön syntymiseen vaikuttavat tekijät ja tässä tapauksessa geometrian vaikutus painehäviöön jäi pieneksi verrattuna virtaavan aineen lämpötilaan ja massavirran suuruuden vaikutuksiin. Tutkimus antaa kuitenkin käsityksen, miten laitteiston geometria vaikuttaa painehäviöön laitteistossa.

Hukkalämmön hyödyntämisen avulla voidaan merkittävästi vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä teollisuudessa. Mitä enemmän fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan

vähentää, sitä enemmän vältytään hiilidioksidipäästöiltä. Päästöjen vähentämisen lisäksi korkean energianhinnan vuoksi eri teollisuuden aloilla voidaan vähentää merkittävästi tuotantokustannuksia investoimalla lämmöntalteenottojärjestelmään, jonka takaisinmaksuaika on tyypillisesti noin kaksi vuotta.

Lähteet

- Abdelkareem, M. A. et al. (2022) Heat pipe-based waste heat recovery systems: Background and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 29
- Anon (2010) *VDI heat atlas*. 2nd ed. Berlin: Springer.
- Butcher Ken J (2007) ‘Flow of Fluids in Pipes and Ducts’, in *CIBSE Guide C - Reference Data*. CIBSE. pp. 1–1.
- Delpech, B. et al. (2018) Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry. *Energy (Oxford)*. 656–665.
- Faghri, A. (2016) *Heat Pipe Science and Technology*. 2nd ed. 2016 Global Digital Press
- Granger, R. A. (2012) *Fluid Mechanics*. Newburyport: Dover Publications
- Incropera, F. P. (2007) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. Hoboken (NJ): Wiley.
- Jouhara, H. et al. (2017) Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy (Oxford)*. [Online] 128729–754.
- Kaya, D. et al. (2021) *Energy management and energy efficiency in industry : practical examples*. Cham, Switzerland: Springer.
- Mantelli, M. B. H. (2020) *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications*. Springer.
- OLARU, I. (2020) A CFD ANALYSIS IN SOLIDWORKS FLOW SIMULATION FOR TWO MIXING FLUIDS WITH DIFFERENT TEMPERATURES IN NOZZLES. *Journal of engineering studies and research*. [Online] 26 (1), 41–46.
- Shabgard, H. et al. (2015) *International journal of heat and mass transfer*. 138–158.
- South-West Supply Oy, 2021. [Verkkosivu]. [Viitattu 18.5.2022]. Saatavissa: <https://swsupply.fi/>

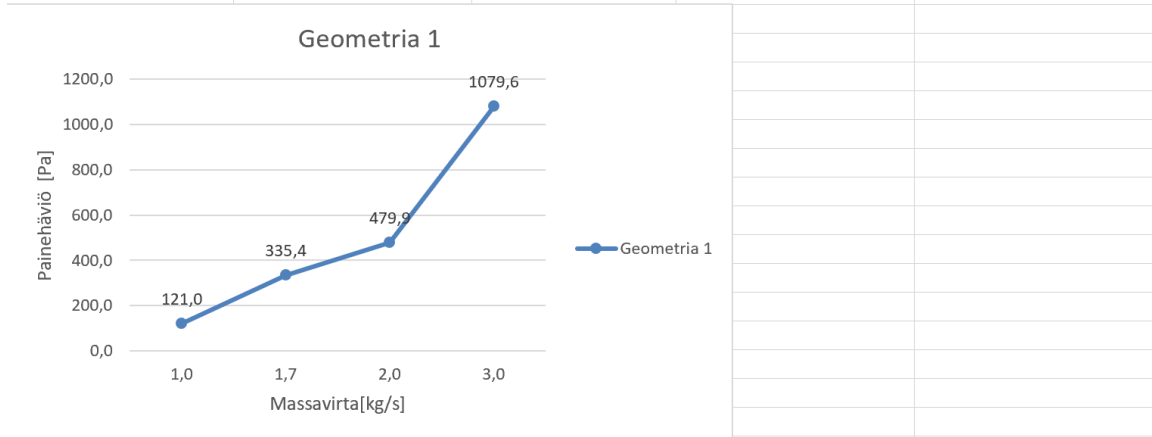
Terrafame Oy, 2020. Terrafame alkaa hyödyntää vetylaitosten hukkaenergiaa – teknologiaa käytetään uudella tavalla. [Verkkosivu]. [Viitattu 03.04.2022]. Saatavissa: <https://www.terrafame.fi/ajankohtaista/uutiset/2020/01/terrafame-alkaa-hyodyntaa-vetylaitosten-hukkaenergiaa-teknologiaa-kaytetaan-uudella-tavalla.html>

Whitman, A. M. (2019) *Thermodynamics*. Cham: Springer International Publishing AG.

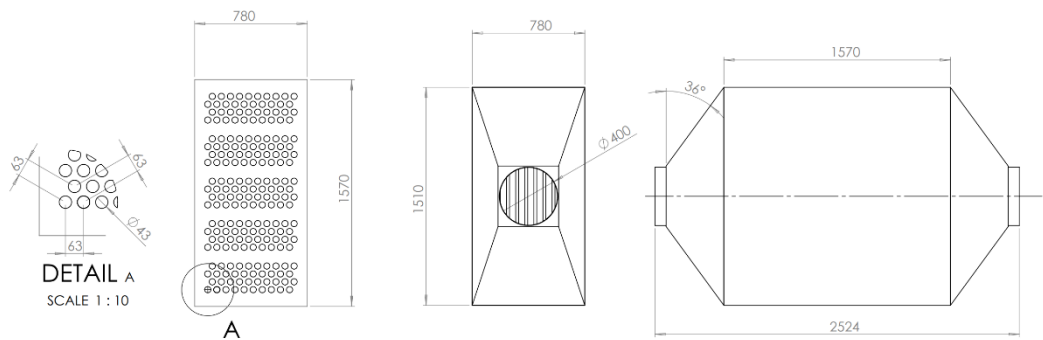
Zohuri, B. (2016) *Heat Pipe Design and Technology Modern Applications for Practical Thermal Management*. 2nd ed. 2016. [Online]. Cham: Springer International Publishin

Liite 1. Virtaussimulaation tulokset: Geometria 1

Goal (Value)	HPHE CASE 1 1 [kg/s]	HPHE CASE 1 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 1 2 [kg/s]	HPHE CASE 1 3 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	121,0	335,4	479,9	1079,6
Mass flow value [kg/s]	1,0	1,7	2,0	3,0

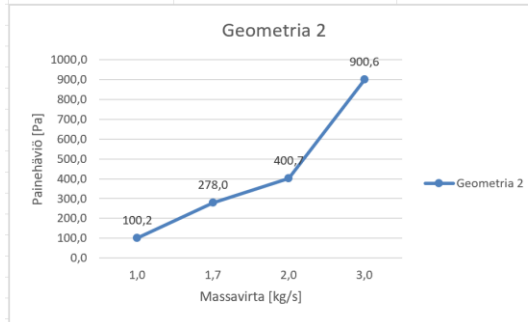


Liite 2. Geometria 2

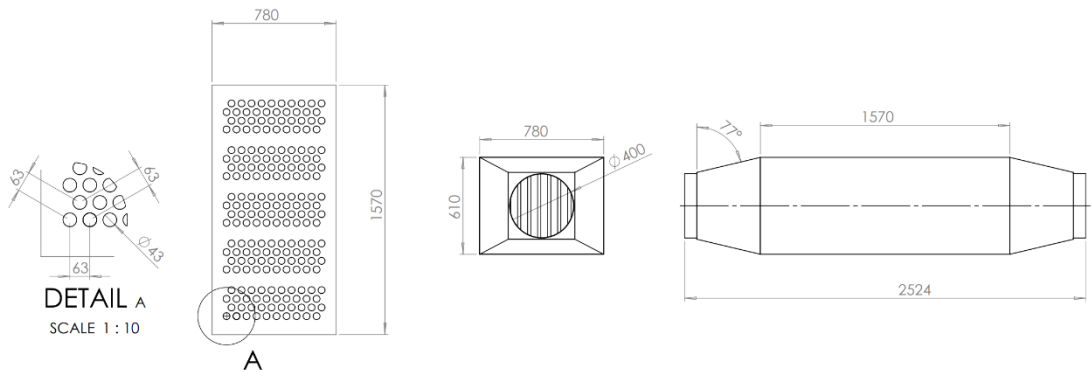


Liite 2.1. Virtaussimulaation tulokset: Geometria 2

Goal (Value)	HPHE CASE 2 1 [kg/s]	HPHE CASE 2 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 2 2 [kg/s]	HPHE CASE 2 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	100,2	278,0	400,7	900,6
Mass Flow value [kgs]	1,0	1,7	2,0	3,0

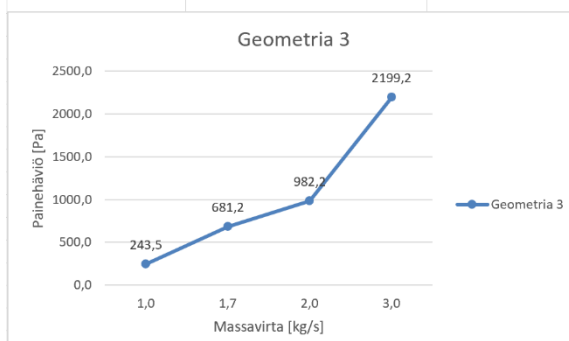


Liite 3. Geometria 3

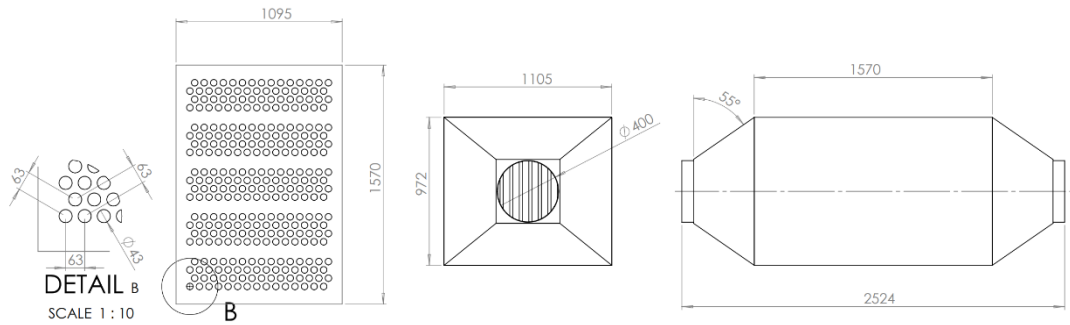


Liite 3.1. Virtaussimulaation tulokset: Geometria 3

Goal (Value)	HPHE CASE 3 1 [kg/s]	HPHE CASE 3 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 3 2 [kg/s]	HPHE CASE 3 3 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	243,5	681,2	982,2	2199,2
Mass Flow value [kg/s]	1,0	1,7	2,0	3,0



Liite 4. Geometria 4

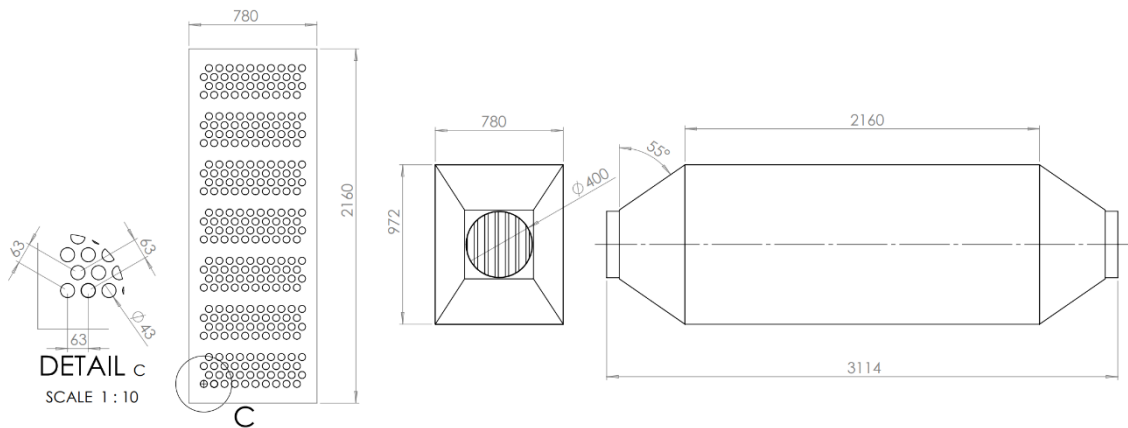


Liite 4.1 Virtaussimulaation tulokset: Geometria 4

Goal (Value)	HPHE CASE 4 1 [kg/s]	HPHE CASE 4 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 4 2 [kg/s]	HPHE CASE 4 3 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	69,8	194,4	279,8	629,5
Mass Flow value [kg/s]	1,0	1,7	2,0	3,0



Liite 5. Geometria 5

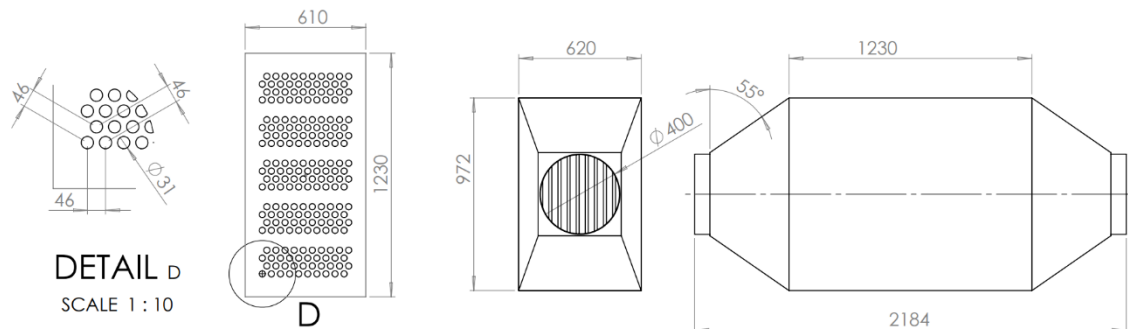


Liite 5.1 Virtaussimulaation tulokset: Geometria 5

Goal (Value)	HPHE CASE 5 1 [kg/s]	HPHE CASE 5 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 5 2 [kg/s]	HPHE CASE 5 3 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	131,7	365,9	526,9	1181,2
Mass Flow value [kg/s]	1,0	1,7	2,0	3,0



Liite 6. Geometria 6



Liite 6.1 Virtaussimulaation tulokset: Geometria 6

Goal (Value)	HPHE CASE 6 1 [kg/s]	HPHE CASE 6 1.67 [kg/s]	HPHE CASE 6 2 [kg/s]	HPHE CASE 6 3 [kg/s]
Delta Pressure [Pa]	141,6	394,7	567,9	1271,7
Mass Flow value [kg/s]	1,0	1,7	2,0	3,0

