

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Lämpövaraston eristys hyödyntäen tyhjiötä

Insulation of a heat storage utilizing vacuum conditions

Työn tarkastaja: Tero Tynjälä

Työn ohjaaja: Jero Ahola, Ari Piispanen

Lappeenranta 8.5.2017

Aapo Vuorinen

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön nimi: Lämpövaraston eristys hyödyntäen tyhjiötä

Opiskelijan nimi: Aapo Vuorinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Jero Ahola, Ari Piispanen

Kandidaatintyö 2017

40 sivua, 8 kuvaa, 5 taulukkoa ja 3 liitettä

Hakusanat: kandidaatintyö, tyhjiö, perliitti, lämpövarasto, eristys

Energian varastointi on yksi yleinen ratkaisuvaihtoehto tiettyjen uusiutuvien energialähteiden tuotannon tasaamiseen. Tässä kandidaatintyössä käsitellään energian varastointia lämmöksi. Työn tavoitteena on suunnitella optimaalinen seinämärakenne lämpövaraston eristykselle hyödyntämällä matalia paineita eli tyhjiöolosuhteita seinämässä.

Optimaalinen seinämärakenne selvitetään laskemalla eri rakenteiden lämpöhäviöitä. Työssä käytetään eristeenä pääasiassa tyhjiötilassa olevaa perliittiä ja tyhjiökammioita. Työssä tarkastellaan minkälaisin painoituksin näitä eristystapoja kannattaa hyödyntää, ja missä järjestyksessä eristekerrokset tulisi sijoittaa seinämään. Eristyksen lämpöhäviöiden paineriippuvuuden takia lämpöhäviöt selvitetään laajalla painealueella. Lämpöhäviöitä vertailemalla valitaan optimaalinen seinämärakenne tyhjiötilojen painetason mukaan.

Paras seinämärakenne varaston eristykselle on lämpöhäviöiden perusteella yksinkertainen perliittieristys, jossa ei käytetä lainkaan tyhjiökammioita. Rakenne soveltuu parhaiten painealueelle 5–100 Pa. Tätä pienemmissä paineissa kannattaa hyödyntää tyhjiökammioita joko sellaisenaan tai perliitin kanssa. Yli 100 Pa painetta ei ole järkevää käyttää suurten lämpöhäviöiden takia.

Optimaalinen seinämärakenne pystytään valitsemaan paineen mukaan. Työn tavoite on siis saavutettu. Eristysratkaisua valittaessa on syytä ensin selvittää taloudellisesti järkevästi saavutettava painetaso, ja valita eristysratkaisu sen mukaan. Eristepaksuutta tai materiaaleja kannattaa optimoida vasta paineen valitsemisen jälkeen.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Lämpövaraston esittely</b>	<b>7</b>
2.1 Lämpövaraston toimintaperiaate, rakenne ja tavoitteet	7
2.1.1 Toimintaperiaate	7
2.1.2 Rakenne	7
2.1.3 Tavoitteet	8
2.2 Lämpövaraston toimintalämpötila	9
2.3 Tarkasteltavat seinämämateriaalit	10
2.4 Tarkasteltavat eristeratkaisut	11
<b>3 Lämpöhäviöiden ja lämpötilojen määrittäminen</b>	<b>13</b>
3.1 Lämmönsiirron ilmiöt systeemissä	13
3.2 Lämmönsiirron suureiden ratkaisemiseen tarvittavat yhtälöt	14
3.3 Alkuoletukset	18
3.4 Aineominaisuudet	19
3.5 Laskenta stationääritilassa	20
3.5.1 Alkuarvot	21
3.5.2 Lämpövastuksien määrittäminen	22
3.5.3 Lämpövirran määrittäminen	23
3.5.4 Lämpötilojen määrittäminen eri kohdissa seinämää	25
3.5.5 Vapaa konvektio tyhjiökammioissa	27
3.6 Arvojen riippuvuus paineesta	28
3.7 Eri tapauksien lämpöhäviöt eri paineilla	30
<b>4 Tulosten arviointi</b>	<b>33</b>
4.1 Alkuoletuksien vaikutus laskentatarkkuuteen	33
4.2 Tyhjiökammioiden vaikutus eristykseen	35
4.3 Käyttöympäristön vaikutus lämpöhäviöihin	36
4.4 Eristysratkaisun valinta	37
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>39</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>40</b>
<b>Liite 1. Laskennassa käytetyt yhtälöryhmät</b>	<b>41</b>
<b>Liite 2. Laskennassa käytetyt aineominaisuudet, jotka ovat lämpötilan funktioita</b>	<b>49</b>
<b>Liite 3. Perliitin lämmönjohtavuuden määrittäminen</b>	<b>51</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$D$	halkaisija	[m]
$g$	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m <sup>2</sup> K]
$H$	korkeus	[m]
$k$	lämmönjohtavuus	[W/mK]
$L$	paksuus	[m]
$p$	paine	[Pa]
$q$	lämpövirta	[W]
$q''$	lämpövirran tiheys	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	lämpövastus	[K/W]
$r$	säde	[m]
$T$	lämpötila	[K]
$U$	lämmönläpäisykerroin	[W/m <sup>2</sup> K]

### Kreikkalaiset aakkoset

$\alpha$	terminen diffuusiokerroin	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	lämpölaajenemiskerroin	[1/K]
$\varepsilon$	emissiviteetti	[-]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]

### Dimensiottomat luvut

Ra Rayleighin luku

### Yläindeksit

\* modifioitu

### Alaindeksit

1-8	paikka seinämässä
al	alumiini
c	sylinteri
cond	konduktio
conv	konvektio
eff	efektiivinen
g	kaasu
i	sisäpuoli
L	tasolevy
n	normaalitila
o	ulkopuoli
p	perliitti
rad	säteily
rt	ruostumaton teräs

### Lyhenteet

V	villa
P	perliitti
T	tyhjiökammio
TP	tyhjiökammio, perliitti
TTP	tyhjiökammio, tyhjiökammio, perliitti
PT	perliitti, tyhjiökammio
PTT	perliitti, tyhjiökammio, tyhjiökammio
TPT	tyhjiökammio, perliitti, tyhjiökammio
TTPT	tyhjiökammio, tyhjiökammio, perliitti, tyhjiökammio
TPTT	tyhjiökammio, perliitti, tyhjiökammio, tyhjiökammio
TTPTT	tyhjiökammio, tyhjiökammio, perliitti, tyhjiökammio, tyhjiökammio
10T	tyhjiökammio (10 kerrosta)

## 1 JOHDANTO

Uusiutuvan energian tuotanto lisääntyy jatkuvasti, kun perinteisistä fossiilisista polttoaineista pyritään eroon. Yksi merkittävimmistä hidastavista tekijöistä tiettyjen uusiutuvien energiamuotojen, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, lisäämiselle on niiden vaikeasti ennustettava tuotanto ja kyvyttömyys vastata hetkelliseen energiantuotantarpeeseen. Yksi yleisesti esillä oleva ratkaisuvaihtoehto on energian varastointi erilaisin menetelmin.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään energian varastointia lämmöksi. Lämpövarasto on osa pienen kokoluokan uusiutuvan energian tuotantojärjestelmää, ja varaston tarkoitus on toimia lyhytaikaisena energiavarastona. Lämpökapasiteetti on noin 5–10 kWh, varastointiaineena käytetään suolaseosta ja lämpötilataso seoksella on noin 200–400 °C.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on suunnitella lämpövarastolle mahdollisimman tehokas eristysratkaisu. Työssä vertaillaan erilaisia suurta alipainetta eli tyhjiötä hyödyntäviä eristysratkaisuja. Tarkoitus on ennen kaikkea selvittää optimaalinen seinämärakenne lämpövarastolle. Tästä syystä esimerkiksi eristysmateriaaleja ei vertailla keskenään, koska samoja rakenteita voidaan soveltaa eri materiaaleille.

Työ koostuu lämpövaraston esittelystä, eri eristeratkaisujen ominaisuuksien laskennasta ja tulosten arvioinnista. Tyhjiöön perustuva eristys luo tarpeen tarkastella erityisesti paineen vaikutusta eristyksen toimivuuteen, koska kaupallisissa tuotteissa on järkevää tavoitella vain kohtuullisin kustannuksin saavutettavia painetasoja.

Lämpöhäviöiden laskenta perustuu pääosin konduktio- ja säteilylämmönsiirtoon. Työssä käsitellään esimerkiksi tyhjiökammioita, eli kahden suljetun pinnan välistä tilaa jossa säteilyn vaikutus on erityisen merkittävä. Tyhjiökammion käyttökelpoisuus ja sen paikan vaikutus seinämässä on yksi tärkeimmistä selvitettävistä tekijöistä. Konduktiolämmönsiirtoa eli lämmön johtumista esiintyy kaikissa seinämän kerroksissa. Konvektiolämmönsiirron laskenta tässä työssä perustuu arvioituihin toimintaolosuhteisiin, joten sen osuus laskennassa on pieni.

## **2 LÄMPÖVARASTON ESITTELY**

Tässä luvussa esitellään lyhyesti lämpövaraston rakenne, käyttötarkoitus ja tavoitteet lämpövaraston eristykselle. Myös tarkasteltavat rakennevaihtoehdot, laskennassa käytetyt materiaalit ja lämpövaraston toimintalämpötilaan liittyvät tekijät esitellään tässä luvussa.

### **2.1 Lämpövaraston toimintaperiaate, rakenne ja tavoitteet**

Tarkasteltava lämpövarasto on osa uusiutuvan energian tuotantojärjestelmää, ja varastoa voidaan käsitellä melko tarkasti itsenäisenä komponenttina. Työssä käsitelty lämpövarasto perustuu todelliseen prototyypilämpövarastoon. Tässä luvussa käsitellään lämpövarastoa ja sen toimintaa yleisellä tasolla.

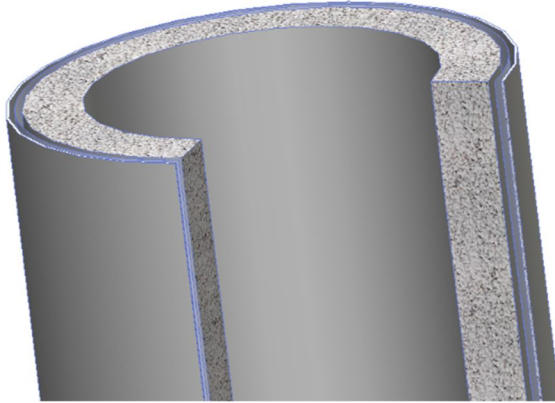
#### **2.1.1 Toimintaperiaate**

Lämpövarastoa käytetään varastoimaan uusiutuvalla energialla tuotettua lämpöä. Lataukseen käytettävän energiantuotantolaitteiston nimellisteho mitoitetaan odotetun huipun käyttöajan mukaan. Tarvittavaan lataustehoon vaikuttaa luonnollisesti myös lämpövaraston kapasiteetti ja käyttäjän tarvitsema lämpöteho ja -energia. Lämpövaraston lämpöä hyödynnetään suoraan lämpönä tai välillisesti sähköinä.

Lämpövarastoa ja siihen liittyvää järjestelmää on tarkoitus hyödyntää erityisesti itsenäisenä energijärjestelmänä, kun ulkopuolista sähköä tai lämpöä ei ole käytettävissä. Kapasiteetti ja latausteho mitoitetaan lämpöhäviöiden avulla niin, että järjestelmää voidaan käyttää normaalisti useita päiviä ilman latausta.

#### **2.1.2 Rakenne**

Lämpövarasto on sylinterin muotoinen säiliö, jossa suolaseos on sylinterin sisällä. Eristyskerrokset sijoitetaan sisäkkäisten sylintereiden väliin. Tässä työssä kansi ja pohja jätetään huomiotta ja sylinteri oletetaan äärettömän pitkäksi. Kuvassa 2.1 on esitetty eräs työssä tutkittava sylinterirakenne halkaistuna.



Kuva 2.1: Lämpövaraston seinämä halkaistuna.

Kuvan 2.1 tapauksessa esitetty eristys koostuu sisäpuolen perliittikerroksesta ja ulkopuolen kahdesta tyhjiökammioista, jotka on erotettu toisistaan äärettömän ohuella säteilykilvellä. Seinämän rakenne muuttuu tarkasteltavan tapauksen mukaan, joten kuvassa esitetty rakenne pätee vain yhdelle tapaukselle. Käsiteltävät tapaukset ja materiaalit on esitelty tarkemmin luvuissa 2.3 ja 2.4.

### 2.1.3 Tavoitteet

Lämpövaraston eristykselle olennaisimmat tavoitteet ovat mahdollisimman pienet valmistuskustannukset, pieni seinämäpaksuus ja maksimissaan suuruusluokaltaan noin 50–100 W/m<sup>2</sup> lämpöhäviöt. Pienet valmistuskustannukset saavutetaan suosimalla yksinkertaisia rakenteita ja edullisia materiaaleja. Esimerkiksi sylinterirakenne on helppo valmistaa, ja eristeenä käytetty perliitti on hinnaltaan kilpailukykyinen eriste.

Lämpövaraston kapasiteetti on suunniteltu pieneksi, jotta sitä voidaan liikuttaa ja hyödyntää joustavasti. Siksi lämpövaraston kokoon ja massaansa täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Lämpövaraston massaansa voidaan merkittävästi vaikuttaa lähinnä muuttamalla suolan tilavuutta, koska se muodostaa valtaosan lämpövaraston massasta. Kokoon taas voidaan suolan tilavuuden lisäksi vaikuttaa seinämän paksuudella, joka pyritään minimoimaan mahdollisimman tehokkaalla eristyksellä.



Pienet lämpöhäviöt saavutetaan muiden tavoitteiden ohella valitsemalla optimaalinen seinämärakenne lämpövarastolle. Myös sylinterimuoto on lämpöhäviöiden kannalta edullinen, koska tilavuuden suhde lämmönsiirtopinta-alaan on suuri. Eristeratkaisut on laskettu vain yhdellä eristepaksuudella, jolla päästään haluttuun suuruusluokkaan, koska paineen vaikutus lämpöhäviöihin on suuri. Saavutettavissa oleva painetaso ja optimaalinen seinämärakenne kannattaa selvittää ennen kuin seinämäpaksuutta aletaan optimoida.

## 2.2 Lämpövaraston toimintalämpötila

Lämpövarastoon voidaan sitoa lämpöä lämmittämällä varastointiainetta tai muuttamalla aineen faasia joko sulattamalla tai höyrystämällä ainetta. Tässä työssä käsitellään varastointiaineena kaliumnitraatin  $\text{KNO}_3$  ja natriumnitraatin  $\text{NaNO}_3$  suolaseosta. Seoksen sulamislämpötila on noin  $232^\circ\text{C}$ , joten tarvittavan käyttölämpötilan mukaan seos on yleensä joko faasimuutosalueella osin kiinteässä ja osin nestemäisessä olomuodossa, tai pelkästään nestettä (Chieruzzi et al. 2013, 5).

Faasimuutoksen hyödyntäminen lämmön varastoinnissa mahdollistaa usein suuremman kapasiteetin kuin vastaavan kokoinen nestefaasissa toimiva lämpövarasto, koska seoksen ominaissulamislämpö on huomattavasti suurempi kuin sen ominaissulamislämpökapasiteetti (Chieruzzi et al. 2013, 5). Faasimuutosalueella voidaan toimia matalammilla lämpötiloilla kuin nestefaasin tapauksessa, joten myös lämpöhäviöt ovat pienemmät. Seoksen lämpötila pysyy faasimuutoksen aikana vakiona, joten varaston lämpöä kulutettaessa lämpöteho on helpompi pitää vakiona.

Faasimuutoksen aikana suolaseos tiivistyy ensin lämpövaraston seinille tai varaston lämmön käyttöön suunnitellun lämmönvaihtimen pinnoille, koska lämpövirran suunta on kuumemmasta seoksesta kohti kylmempää ulkotilaa tai käyttökohdetta. Tiivistyminen varaston seinille pienentää lämpöhäviöitä, koska suolaseos toimii itsessään eristeenä. Vapaa konvektio ei mahdollista kiinteässä faasissa enää lämpötilan tasaantumista kuten nestefaasissa, joten myös tiivistynyt aine alkaa jäähtyä pienentäen lämpöhäviöitä entisestään. Suolan tiivistyminen lämmönvaihtimen pinnoille lisää samalla periaatteella lämpövarastusta käyttökohteen ja lämpövaraston välillä, joten myös lämpöteho laskee.

Nestefaasin tapauksessa tarvitaan yleensä isompi varasto kuin faasimuutostapauksessa vastaavalla kapasiteetilla, ja myös lämpöhäviöt ovat korkeammista lämpötilatasoista joutu-  
tuen suuremmat. Toisaalta lämpöä kulutettaessa on mahdollista saavuttaa suurempi läm-  
pöteho ja korkeammat lämpötilat, koska varaston lämpötilataso on korkeampi. Lämmön-  
siirto on muutenkin tehokkaampaa nesteen ja seinämän, kuin kiinteän suolan ja seinämän  
välillä. Kun lämpöä kulutetaan, pienenee käytettävissä oleva lämpöteho ja lämpötilat.  
Nestefaasitapaus ei ole käyttäjälle siis yhtä vakaa lämpöteholtaan kuin faasimuutosta-  
tapaus, mutta käytettävissä oleva teho on aina suurempi.

Todellisessa tilanteessa toimitaan luultavasti osittain faasimuutosalueella ja osittain nes-  
tefaasissa. Koska lämpövarastoa ladataan uusiutuvalla energialla, tuotantoa on hankala  
ennustaa, joten laaja lämpötilan toiminta-alue maksimoi varastoitavan ja kulutettavan  
energian määrän, kun lataustehoa on tai ei ole käytössä. Varaston koko ja massa saadaan  
samalla minimoitua, kun lämpökapasiteetin suhde tilavuuteen on mahdollisimman suuri.

### **2.3 Tarkasteltavat seinämämateriaalit**

Tässä työssä lasketaan eri seinämärakenteiden lämpöhäviöt käyttäen samoja eriste- ja ra-  
kennemateriaaleja. Tukirakenteet, eli säiliön seinät ovat ruostumatonta terästä. Eristema-  
terialina käytetään perliittiä, joka on pääosin piidioksidista  $\text{SiO}_2$  ja alumiinioksidista  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  koostuva amorfinen ja raemainen aine (Demharter 2011, 45). Tyhjiökammion sei-  
nät joko kiillotetaan tai päällystetään jollain hyvin säteilyä heijastavalla materiaalilla, ku-  
ten alumiinifoliolla tässä työssä. Vertailukohtana tarkastellaan perinteistä mineraalivil-  
lalla eristettyä varastoa.

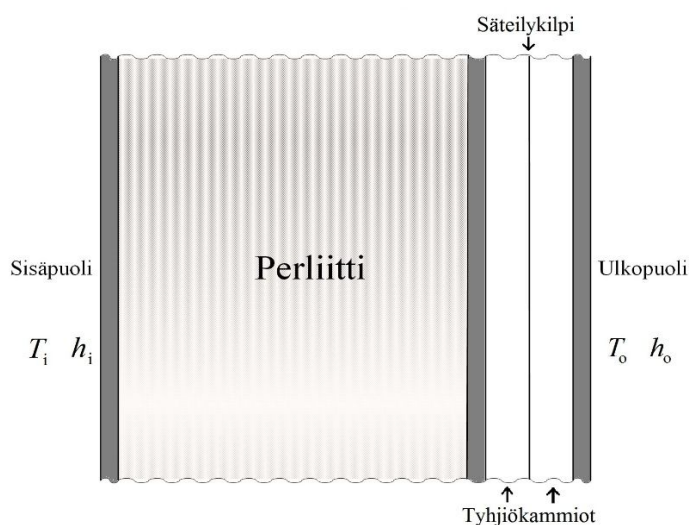
Työssä ei vertailla erilaisten materiaalien tai aineiden keskinäistä suorituskykyä eristeenä.  
Käyttämällä esimerkiksi pyrogeenistä piidioksidia perliitin sijaan olisi alipaineen merki-  
tys huomattavasti vähäisempi, ja hyvä eristys pystyttäisiin vielä saavuttamaan paljon kor-  
keammilla paineilla kuin perliitin tapauksessa (Fuchs, Hofbeck & Faulstich 2012, 257).  
Korvaamalla ilma paremmin lämpöä eristävällä kaasulla on mahdollista parantaa sekä  
tyhjiökammion että perliittieristeen eristyskykyä (Demharter 2011, 109-112). Eristysky-  
kyä on siis mahdollista tehostaa useilla keinoilla, mutta tämän työn tavoitteena on ver-

tailla enemmän eristerakenteita kuin erilaisia materiaaleja tai aineita. Tämän työn tuloksia voi soveltaa eri materiaaleille alkuarvoja ja aineominaisuuksia muuntamalla, jolloin eri aineiden suorituskykyjä on tarvittaessa helppo vertailla.

## 2.4 Tarkasteltavat eristeratkaisut

Tässä työssä tarkastellaan useaa perliittiin ja tyhjiökammioon perustuvaa seinämärakennetta. Ruostumattoman teräksen paksuus on kaikissa tapauksissa 2 mm ja tyhjiökerroksen paksuus on 5 mm. Tyhjiö- ja teräskerrosten paksuudet on valittu niin pieniksi kuin mahdollista, mutta riittävän paksuiksi, että rakenne on mahdollista valmistaa. Perliitin paksuus on valittu niin, että seinämän yhteenlaskettu paksuus ilman ruostumattoman teräksen kerroksia on 50 mm taulukon 2.1 mukaisesti. Seinämän paksuus pyritään pitämään näin likimain vakiona, jotta eristysratkaisujen tehokkuutta on helpompi verrata keskenään.

Laskennassa käytetään vertailutapauksena yksinkertaista mineraalivillaan perustuvaa eristysratkaisua, jossa villakerros on kahden ruostumattoman teräseinän välissä. Tästä edes tämän kaltaiseen rakenteeseen viitataan lyhenteellä V. Lyhenteet muodostetaan eristekerrosten kirjainlyhenteillä järjestyksessä, alkaen sisäpuolelta. Ruostumatonta terästä ei mainita lyhenteessä erikseen, koska monimutkaisempien rakenteiden lyhenteet olisivat tällöin epäkäytännöllisiä. Eräs perliittiin, tyhjiökammioihin ja säteilykilpeen perustuva eristeratkaisu on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2: Perliittiin ja tyhjiökammioihin perustuvan eristeratkaisun seinämän poikkileikkaus.

Kuvassa 2.2 kaikki eristekerrokset on erotettu toisistaan ruostumattomalla teräksellä. Ensimmäinen eristekerros on perliittiä P, ja seuraavat kerrokset ovat tyhjiökammioita T. Tyhjiökammioiden välissä esiintyvä ohut erotin on säteilykilpi, jota käsitellään äärettömän ohuena metallikerroksena. Säteilykilpeä ei mainita rakenteen lyhenteessä, koska säteilykilven ei oleteta osallistuvan eristykseen muulla tavalla kuin erottamalla kaksi tyhjiökammioita toisistaan. Tämän rakenteen lyhenne on edellä esitetyllä periaatteella PTT. Kaikki tarkasteltavat eristeratkaisut on esitetty mittoineen taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1: Tarkasteltavat tapaukset ja eristekerrosten paksuudet.

	Lyhenne	$L_1$ [mm]	$L_2$ [mm]	$L_3$ [mm]	$L_4$ [mm]	$L_5$ [mm]	Yhteensä [mm]
Tapaus 1	V	50	-	-	-	-	50
Tapaus 2	P	50	-	-	-	-	50
Tapaus 3	TP	5	45	-	-	-	50
Tapaus 4	TTP	5	5	40	-	-	50
Tapaus 5	PT	45	5	-	-	-	50
Tapaus 6	PTT	40	5	5	-	-	50
Tapaus 7	TPT	5	40	5	-	-	50
Tapaus 8	TTPT	5	5	35	5	-	50
Tapaus 9	TPTT	5	35	5	5	-	50
Tapaus 10	TTPTT	5	5	30	5	5	50
Tapaus 11	10T	5	seinämässä 10 yhtä paksua kerrosta				50

Taulukossa 2.1 on esitetty kaikki laskettavat eristeratkaisut. Viimeinen tarkasteltava rakenne, tapaus 11 on lyhennetty poikkeavalla tavalla sen rakenteen takia. Tapauksessa käytetään eristeenä pelkästään useita peräkkäisiä tyhjiökammioita, joten lyhenteenä käytetään tyhjiökammioiden määrää ja tyhjiökammion lyhennettä T.

Tässä työssä tarkastellaan vain lämmönsiirtoa seinämässä, eli kannen tai pohjan vaikutusta lämpöhäviöihin ei oteta huomioon. Laskettuja seinämärakenteita voi hyödyntää kannen ja pohjan suunnittelussa, mutta moni lämpövirran tai lämpövuodon yhtälö poikkeaa sylinteritapauksesta. Kannen ja pohjan lämpöhäviöiden laskennassa täytyisi siis muodostaa vastaavat yhtälöryhmät tasolevyrakenteelle. Lisäksi pohjan ja erityisesti kannen tapauksessa lämpöhäviöt saattavat kasvaa kannen ja seinämän rajapinnan metallikerroksissa tapahtuvan lämmön johtumisen seurauksena.

### 3 LÄMPÖHÄVIÖIDEN JA LÄMPÖTILOJEN MÄÄRITYS

Tässä luvussa käsitellään lämpöhäviöihin liittyviä lämmönsiirron ilmiöitä ja keskitytään erityisesti eristykseen liittyvien suureiden laskentaan esimerkkitapauksen kautta. Myös laskennassa käytetyt alkuoletukset ja aineominaisuudet, eristyksen paineriippuvuus ja eri tapauksien lämpöhäviöt käsitellään tässä luvussa. Laskenta tässä työssä perustuu lämmönsiirron teoriaan ja kirjallisuudesta saataviin arvoihin. Laskentaa varten ei ole hyödynnetty todellista mittaustulosta prototyypilämpövarastosta. Tämän työn tuloksia on tarkoitettu verrata soveltuvien osin todellisen prototyypivaraston mittaustuloksiin.

#### 3.1 Lämmönsiirron ilmiöt systeemissä

Lämpövaraston lämpöhäviöt koostuvat kaikista lämmönsiirtotavoista: konvektiosta, konduktiosta eli lämmön johtumisesta ja säteilystä. Konvektiota tapahtuu eri lämpötiloissa olevien liikkuvan fluidin ja kiinteän pinnan välillä (Incropera & DeWitt 2002, 6). Varastossa konvektio ilmenee lämpövaraston sisällä suolaseoksen ja varaston sisäseinämän välillä, sekä lämpövaraston ulkopuolella ympäristön ja varaston ulkoseinämän välillä. Laskennassa tarkastellaan myös, ilmeneekö seinämän tyhjiökammioissa lämpötilaerosta johdettavaa vapaata konvektiota. Jos tyhjiökammiossa vallitsisi todellinen tyhjiö, jossa ei ole yhtään ainepartikkeleita, ei konvektio olisi mahdollista. Todellisuudessa partikkeleita jää myös tyhjiökammioon, joten konvektion mahdollisuus täytyy ottaa huomioon.

Konduktiota eli lämmön johtumista tapahtuu kaikissa aineen olomuodoissa eri lämpötiloissa olevien partikkeleiden välisen vuorovaikutuksen takia (Incropera & DeWitt 2002, 3). Konduktiota tapahtuu siis konvektion ohella varaston sisä- ja ulkopuolella sekä konvektion yhteydessä selitetyin reunaehdoin tyhjiökammioissa. Konduktio on ainoa lämmönsiirtomuoto kiinteissä aineissa, eli varaston tapauksessa ruostumattomassa teräksessä, perliitissä ja mineraalivillassa. Perliitti ja mineraalivilla ovat huokoisia materiaaleja, joihin jää paljon tilaa ilmalle. Todellisuudessa osa lämmönsiirrosta tapahtuu tämän takia konvektiona tai säteilynä. Näiden lämmönsiirtomuotojen vaikutus lämmön siirtymiseen perliitissä ja mineraalivillassa on huomioitu lämmönjohtavuuksien arvoissa, joten aineiden lämmönsiirto-ominaisuuksia voidaan tarkastella puhtaasti lämmönjohtavuuksien avulla.

Säteily on kiinteän, nestemäisen tai kaasumaisen aineen emittoimaa energiaa. Säteilyenergia siirtyy sähkömagneettisena aaltoliikkeenä, eikä sen siirtyminen vaadi väliainetta. (Incropera & DeWitt 2002, 9.) Säteily on lämpövaraston tapauksessa oleellinen ainoastaan tyhjiökammioissa ja varaston ulkoseinämällä. Todellisessa tyhjiössä säteily on ainoa lämmönsiirtomuoto, ja tyhjiökammioissa pyritään pääsemään mahdollisimman lähelle tämän kaltaista tilaa.

Lämpövaraston tapauksessa muualla kuin tyhjiökammioissa lämpötilaerot ovat niin pieniä, että säteilyn vaikutus on luultavasti pieni. Jos ympäristön efektiivinen lämpötila on huomattavasti seinämän pintalämpötilaa suurempi tai pienempi, kasvaa säteilyn merkitys ulkoseinämällä. Tämän kaltainen tilanne olisi mahdollista esimerkiksi kirkkkaalla pakkasäällä. (Incropera & DeWitt 2002, 750.) Vastaavasti auringonpaisteella säteilyn lämmitävä vaikutus voi olla merkittävä. Suunnittelun kannalta halutaan enemmän tutkia säästä riippumatonta tilannetta, joten erikoistilanteita ei oteta huomioon.

### 3.2 Lämmönsiirron suureiden ratkaisemiseen tarvittavat yhtälöt

Lämpöhäviöitä määritettäessä olennaisin laskettava suure on lämpövirta  $q$  seinämän läpi. Kun tunnetaan lämpötilat seinämän sisä- ja ulkopuolella, voidaan lämpövirta seinämän läpi laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 92).

$$q = UA(T_i - T_o) \quad (1)$$

missä  $U$  lämmönläpäisykerroin [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$A$  pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$T$  lämpötila [ $\text{K}$ ]

Lämpövirta on aina lämpötiloista riippuva suure, joten usein seinämärakenteiden eristyskykyä vertaillaan lämmönläpäisykerroimella, joka pysyy useimmissa tapauksissa likimain vakiona. Lämmönläpäisykerroin voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 93).

$$U = \frac{1}{AR} \quad (2)$$

missä  $R$  lämpövastus [K/W]

Lämmönläpäisykerroin ei todellisuudessa ole täysin lämpötiloista riippumaton, koska aineominaisuudet ovat useimmiten lämpötilojen funktioita. Tässä työssä selvitettäviä lämmönläpäisykertoimia ei voi soveltaa suoraan eri lämpötiloille, koska aineominaisuuksien lisäksi säteilylämmönsiirto on erityisen herkkä lämpötilan muutoksille. Yhtälöiden (1) ja (2) perusteella voidaan muodostaa lämpövirralle yhtälö lämpötilojen ja lämpövastuksen funktiona.

$$q = \frac{T_i - T_o}{R} \quad (3)$$

Lämpövirrat on tässä työssä helpointa laskea käyttämällä lämpövastuksia lämmönläpäisykertoimien sijaan, koska kirjallisuudessa esitetään useimmiten yhtälöt lämpövastuksille. Konduktiolämpövastus sylinterin seinälle  $R_{c,cond}$  voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 106).

$$R_{c,cond} = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi Hk} \quad (4)$$

missä  $r$  säde [m]

$H$  korkeus [m]

$k$  lämmönjohtavuus [W/mK]

Konduktiolämpövastuksien lisäksi konvektiolämpövastukset ovat merkityksellisiä erityisesti varaston sisä- ja ulkopinnoilla. Konvektiolämpövastus  $R_{conv}$  voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 562).

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (5)$$

missä  $h$  konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

Tässä työssä monissa yhtälöissä esiintyvä pinta-ala lasketaan aina sylinterirakenteelle. Lämmönsiirrossa oleellinen lämmönsiirtopinta-ala lasketaan seinämän pinta-alana, joka voidaan laskea sylinterille yhtälöllä

$$A_c = \pi DH = 2\pi rH \quad (6)$$

missä  $D$  halkaisija [m]

Säteily on erittäin tärkeä lämmönsiirtomuoto tyhjiökammioissa. Säteilylämpövirta  $q_{\text{rad}}$  kahden pitkän, sisäkkäisen sylinterin välillä voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 811).

$$q_{\text{rad}} = \frac{\sigma A_i (T_i^4 - T_o^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1 - \varepsilon_o}{\varepsilon_o} \left( \frac{r_i}{r_o} \right)} \quad (7)$$

missä  $\sigma$  Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ) [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ]

$\varepsilon$  emissiviteetti [-]

Säteilyn tapauksessa ei voida laskea suoraan lämpövästusta, koska lämpötilat ovat lämpövirran yhtälössä (7) neljännessä potenssissa. Jos esimerkiksi yhtälöiden (3) ja (7) avulla muodostettaisiin lämpövästukselle yhtälö, olisi myös lämpövästus lämpötilojen funktio. Lämpötilat ovat tässä vaiheessa tuntemattomia, joten ensin täytyisi selvittää lämpövirta, jotta lämpövästus voitaisiin ratkaista. Laskennan kannalta lämpövästuksien laskenta ei siis ole mahdollista ennen kuin lämpövirrat tai lämpötilat on ratkaistu. Kun varaston seinämäpinta-ala on ympäristöön verrattuna olemattoman pieni, voidaan säteilylämpövirta ympäristöön laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 811).

$$q_{\text{rad}} = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon_i \cdot (T_i^4 - T_o^4) \quad (8)$$

Lämpöhäviöitä on hankala verrata muihin kirjallisuudessa esiintyviin arvoihin, jos lämmönsiirtopinta-ala ei ole samaa kokoluokkaa. Tämän vuoksi kaikille tapauksille lasketaan lämmönläpäisykerroin ja lämpövirran tiheys  $q''$ , joka voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 53).



$$q'' = \frac{q}{A} \quad (9)$$

Työssä lasketaan lämmönsiirtoa tyhjiökammioissa, jotka ovat suljettuja tiloja. Lämpötilaerosta johtuen tämän kaltaisissa tilanteissa voi esiintyä vapaata konvektiota, jota varten täytyy selvittää Rayleighin luku  $Ra$ . Sisäkkäisille sylintereille Rayleighin luku  $Ra_c^*$  voidaan laskea yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 565).

$$Ra_c^* = \frac{(\ln(D_o / D_i))^4}{L^3 (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^5} Ra_L \quad (10)$$

missä  $L$  eristekerroksen paksuus [m]

Sisäkkäisten sylinterien tapauksessa Rayleighin luku on modifioitu yleisemmästä Rayleighin luvusta kahden tasolevyn välille  $Ra_L$ . Rayleighin luku voidaan laskea tasolevyjen välille yhtälöllä (Incropera & DeWitt 2002, 562).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_o)L^3\rho}{\alpha\mu} \quad (11)$$

missä  $g$  putoamiskiihtyvyyden (9,81) [m/s<sup>2</sup>]

$\beta$  lämpölaajenemiskerroin [1/K]

$\rho$  tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha$  termien diffuusiokerroin [m<sup>2</sup>/s]

$\mu$  dynaaminen viskositeetti [Ns/m<sup>2</sup>]

Tässä kappaleessa esitetyillä yhtälöillä voidaan selvittää kaikki oleellimmat eristyskykyyn liittyvät suureet. Laskentaa varten täytyy esitellyistä yhtälöistä johtaa erilaisia yhtälöitä ja yhtälöryhmiä, jotka on esitetty tarkemmin luvussa 3.5.3 ja liitteessä 1.

### 3.3 Alkuoletukset

Laskentaa varten on tehty useita alkuoletuksia laskennan helpottamiseksi ja tiettyjen yhtälöiden käyttöehtojen toteuttamiseksi. Joillain oletuksilla on suurempi vaikutus laskujen oikeellisuuteen kuin toisilla. Alkuoletuksien aiheuttamia virheitä arvioidaan luvussa 4.1.

Lämpövaraston oletetaan olevan stationääritilassa. Laskennassa tämä oletus on välttämätön, koska esimerkiksi lämpövirtaa ei voi ratkaista esiteltyillä yhtälöillä, jos systeemi ei ole stationääritilassa. Todellisuudessa varasto ei ole stationääritilassa kuin erikoistapauksissa, koska lämpöhäviöiden ja käyttötehon täytyisi olla yhtä suuri kuin lataustehon todella pitkään, että systeemi saavuttaisi tasapainotilan.

Kaikki säteilypinnat oletetaan harmaiksi ja diffuuseiksi. Pintojen säteilyominaisuudet eivät siis muutu lämpövirran suunnan tai aallonpituuden mukaan. Tämä oletus täytyy tehdä, jotta säteilylämpövirta voidaan määrittää yhtälöillä (7) ja (8). Pintojen säteilyominaisuudet oletetaan myös lämpötilariippumattomiksi, eli laskennassa voidaan pitää emissiviteetit vakiona. Lisäksi oletetaan, että säteilyä tapahtuu vain tyhjiökammioissa ja varaston ulkopinnalla, eikä väliaine vaikuta säteilyyn. Tyhjiökammioissa käytetään joissain tilanteissa säteilykilpiä, jotka oletetaan äärettömän ohuiksi. Säteilykilville ei siis lasketa erikseen lämmön johtumista, vaan ne ainoastaan erottavat kaksi tyhjiökammiota toisistaan.

Likavastukset tai likaantuminen oletetaan merkityksettömiksi. Likavastuksilla olisi todellisuudessa todella pieni vaikutus lämmön johtumiseen, koska eristekerrosten lämpövastukset ovat erittäin suuria verrattuna mahdollisiin likavastuksiin. Säteilyn kannalta likaantuminen saattaisi vaikuttaa pintojen emissiviteetteihin tai absorptiviteetteihin, joten ilman likaantumisen vaikutusta nämä ominaisuudet voidaan pitää vakiona.

Seinäma oletetaan äärettömän pitkäksi sisäkkäisten sylinterien rakenteeksi. Tämä vaikuttaa esimerkiksi säteilylämmönsiirrossa näkyvyyskertoimiin, jotka ovat tällä oletuksella 1 kaikissa tapauksissa. Työssä ei lasketa pohjan tai kannen lämpöhäviöitä tai niiden vaikutusta seinämän häviöihin.

### 3.4 Aineominaisuudet

Laskennassa tarvitaan useiden eri aineiden ominaisuuksia. Lähes kaikki käytetyt aineominaisuudet löytyvät taulukoituina lämpötilan funktioina. Perliitin ja ilman lämmönjohtavuudet ovat lisäksi laskettavissa paineen funktiona. Aineominaisuudet saattavat hieman vaihdella riippuen käytetyistä lähteistä. Eristyksen kannalta aineominaisuuksien oleellimmat muuttujat ovat perliitin ja ilman lämmönjohtavuudet. Perliitin ja muiden vastaavien aineiden lämmönjohtavuuksia on selvitetty kokeellisesti (Demharter 2011; Fuchs, Hofbeck & Faulstich 2012, 257). Myös käytetty mineraalivillan lämmönjohtavuus perustuu mittaustuloksiin (Winroc-SPI 2014). Perliitin efektiivinen lämmönjohtavuus  $k_{p,eff}$  määritetään säteilyn, kaasun ja kiinteän aineen johtumisen sekä liitosvaikutuksen avulla yhtälöllä (Demharter 2011, 103).

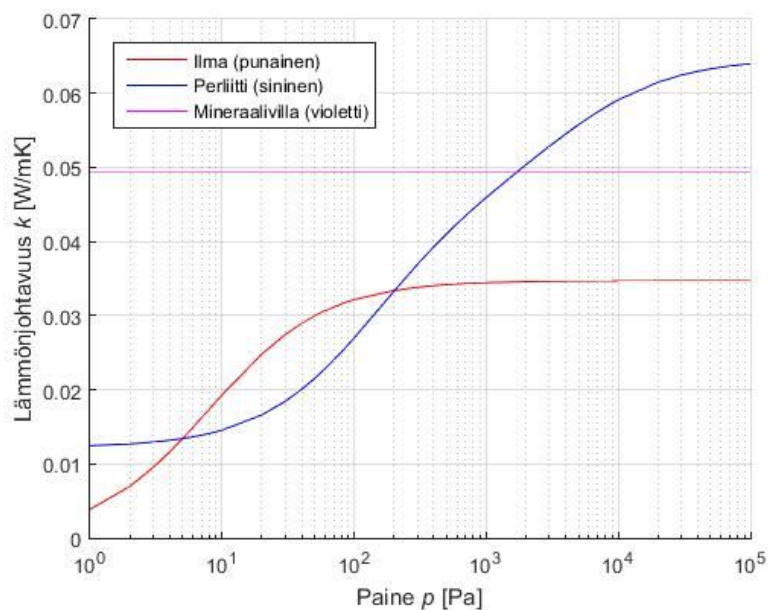
$$k_{p,eff} = k_{säteily} + k_{kiinteä} + k_{kaasu} + k_{liitos} \quad (12)$$

Yhtälön (12) mukaisen perliitin efektiivisen lämmönjohtavuuden osatekijät on selostettu liitteessä 3. Ilman lämmönjohtavuus  $k_g$  voidaan määrittää eri paineissa normaalipaineisen ilman lämmönjohtavuuden  $k_{g,n}$  avulla yhtälöllä (Kwon et al. 2009, 5529).

$$k_g = \frac{k_{g,n}}{L + 0,032 / p} \quad (13)$$

missä  $p$  paine [Pa]

Yhtälöiden (12) ja (13) avulla lämmönjohtavuudet voidaan määrittää sekä perliitille että ilmalle kaikissa käsitellyissä lämpötiloissa ja paineissa. Erityisesti perliitin lämmönjohtavuuden luotettavuuteen täytyy suhtautua varauksella, koska paine- ja lämpötilariippuvuutta ei ole tutkittu yhtä kattavasti kuin monilla muilla aineilla, ja tässä työssä käytetyt yhtälöt perustuvat yhteen mittausjärjestelyyn (Demharter 2011). Ilman, perliitin ja mineraalivillan lämmönjohtavuudet on esitetty paineen funktiona kuvassa 3.1. Ilman lämmönjohtavuus on määritetty systeemin keskimääräisessä lämpötilassa ja käytetyllä tyhjiökammion eristyspaksuudella. Perliitin lämmönjohtavuus on määritetty samassa lämpötilassa, tiheydellä  $100 \text{ kg/m}^3$  ja väliaineena on käytetty ilmaa. Mineraalivillan lämmönjohtavuus on määritetty samassa lämpötilassa, mutta paineen vaikutusta ei ole huomioitu.

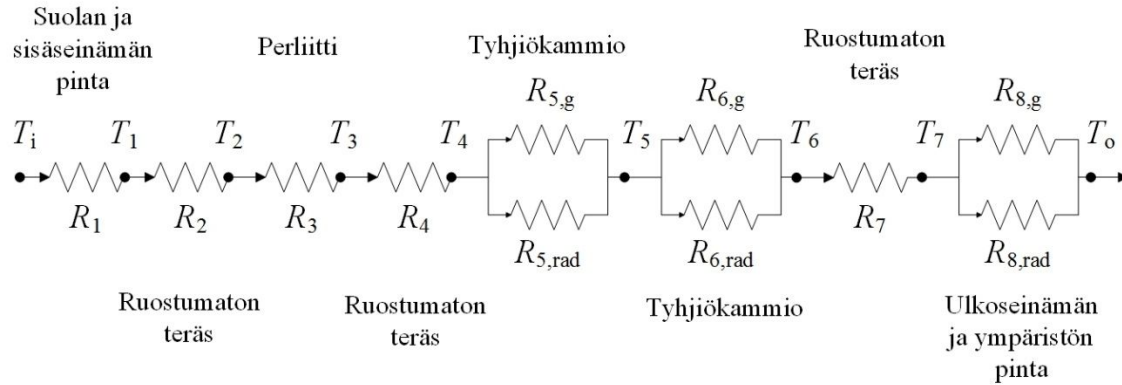


Kuva 3.1: Ilman, perliitin ja mineraalivillan lämmönjohtavuudet paineen funktiona.

Kuvan 3.1 mukaisesti sekä ilman että perliitin lämmönjohtavuudet kasvavat merkittävästi paineen kasvaessa. Perliitin lämmönjohtavuus on pienempi kuin ilmalla painevälillä 5–200 Pa, muissa paineissa ilman lämmönjohtavuus on pienempi. Todellisuudessa mineraalivillan lämmönjohtavuus oletettavasti muuttuu paineen muuttuessa, mutta tässä työssä mineraalivillaa tarkastellaan vain normaalipaineisena, joten sen lämmönjohtavuuden painekäyrä yksinkertaistetaan vaakasuoraksi. Perliitin lämmönjohtavuus on painetta 2000 Pa korkeammassa paineissa suurempi kuin mineraalivillalla, mutta ilman lämmönjohtavuus ei ole missään paineessa suurempi kuin mineraalivillalla. Käytetyt aineominaisuudet ilmalle, ruostumattomalle teräkselle ja mineraalivillalle, jotka ovat lämpötilan funktioita, on esitetty liitteessä 2.

### 3.5 Laskenta stationääritilassa

Tämän luvun esimerkkilaskut on laskettu 1 Pa paineessa tapaukselle PTT, eli rakenteelle jossa on perliittieristys sekä kaksi säteilykilvellä erotettua tyhjiökammiota. Kaikki tapaukset voidaan laskea esimerkkilaskuja mukailleen. Tapauksen PTT lämpövastusverkko on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2: Tapauksen PTT lämpövastusverkko.

Kuvasta 3.2 nähdään, että lämpövastukset ovat tyhjiökammioita ja ulkopintaa lukuun ottamatta sarjassa. Tyhjiökammiossa esiintyy sekä lämmön johtumista ilmassa, että säteilylämmönsiirtoa. Ulkopinnalla lämpö siirtyy konvektiolla ja säteilyllä ympäristöön.

### 3.5.1 Alkuarvot

Laskenta suoritetaan käyttäen alkuarvoina taulukon 3.1 arvoja. Kaikille tapauksille sovelletaan samoja alkuarvoja.

Taulukko 3.1: Laskennassa käytettävät alkuarvot.

Konvektiolämmönsiirtokerroin sisällä	$h_i$	[W/m <sup>2</sup> K]	1000
Konvektiolämmönsiirtokerroin ulkona	$h_o$	[W/m <sup>2</sup> K]	25
Sisälämpötila	$T_i$	[°C]	255
Ulkolämpötila	$T_o$	[°C]	25
Sisähalkaisija	$D_i$	[mm]	260
Korkeus	$H$	[mm]	400
Perliitin tiheys	$\rho_p$	[kg/m <sup>3</sup> ]	100

Taulukossa 3.1 on esitetty konvektiolämmönsiirtokertoimet ja lämpötilat varaston sisä- ja ulkopuolella, perliitin tiheys sekä varaston sisähalkaisija ja korkeus. Konvektioläm-

mönsiirtokertoimet riippuvat olosuhteista, joten niille käytetään tyypillisiä vapaan konvektion arvoja, sisäpuolella nesteelle ja ulkopuolella kaasulle (Incropera & DeWitt 2002, 8). Molempien konvektiolämmönsiirtokerrointen arvot on valittu suuriksi, joten laskentatilanne vastaa huonoja käyttöolosuhteita. Ympäristön lämpötila eli ulkolämpötila on valittu vastaamaan varaston käyttöympäristölle tyypillisiä lämpimiä olosuhteita. Sisälämpötila on valittu niin, että suolaseos on nesteenä eikä faasimuutosalueella. Varaston dimensiot on valittu todellista prototyyppivarastoa mukaillen. Perliitin tiheys vaihtelee useimmiten välillä 30–240 kg/m<sup>3</sup>, ja alkuarvoksi valittu tiheys 100 kg/m<sup>3</sup> on perliitille yleinen ja tyypillinen (Demharter 2011, 46). Laskenta suoritetaan paineen arvoilla 1 Pa–100 kPa, mutta esimerkkilaskut on tehty vain paineella 1 Pa.

### 3.5.2 Lämpövastuksien määrittäminen

Lämpövirtojen määrittämiseen tarvittavat lämpövastukset voidaan ratkaista tunnettujen aineominaisuuksien ja dimensioiden perusteella. Konvektiolämpövastus varaston sisäpinnalla on yhtälön (5) ja sylinterin pinta-alan yhtälön (6) mukaisesti

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{1000 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \pi \cdot 0,260 \text{ m} \cdot 0,400 \text{ m}} = 0,00306 \text{ K/W}$$

Konduktiolämpövastus on ensimmäisen ruostumattoman teräksen kerroksen läpi yhtälön (4) mukaisesti

$$R_{\text{c,cond}} = \frac{\ln(0,132 \text{ m} / 0,130 \text{ m})}{2 \cdot \pi \cdot 0,400 \text{ m} \cdot 16,539 \text{ W/mK}} = 0,000367 \text{ K/W}$$

Konduktio- ja konvektiolämpövastukset voidaan ratkaista muissa seinämän pisteissä samoilla yhtälöillä. Säteilylämmönsiirron tapauksessa ei lasketa lämpövastuksia samalla tavalla kuin konduktion ja konvektion tapauksessa. Säteilylämpövastukset voidaan ratkaista vasta kun lämpövirta ja sitä vastaavat lämpötilat on ratkaistu.

### 3.5.3 Lämpövirran määrittäminen

Esimerkkilaskujen tapauksessa PTT lämpövirta voidaan määrittää 5 yhtälön yhtälöryhmästä. Säteilylle ei kannata tässä tapauksessa muodostaa lämpövastusta, koska lämpövastus on säteilykammion pintalämpötilojen funktio. Pintalämpötiloja ei tunneta, joten prosessi olisi iteratiivinen. Muodostamalla yhtälöryhmä energiataseista eri osissa seinämää voidaan ratkaista lämpövirran ja tuntemattomien pintalämpötilojen arvot. Yhtälöryhmä on kuvan 3.2 merkinnöin ja yhtälöiden (3), (6), (7) ja (8) mukaisesti muotoa

$$q = \frac{T_i - T_4}{R_{1-4}} \quad (14)$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot (T_4^4 - T_5^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{al}} + \frac{1 - \varepsilon_{al}}{\varepsilon_{al}} \left( \frac{r_4}{r_5} \right)} + \frac{T_4 - T_5}{R_{5,g}} \quad (15)$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_5 H \cdot (T_5^4 - T_6^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{al}} + \frac{1 - \varepsilon_{al}}{\varepsilon_{al}} \left( \frac{r_5}{r_6} \right)} + \frac{T_5 - T_6}{R_{6,g}} \quad (16)$$

$$q = \frac{T_6 - T_7}{R_7} \quad (17)$$

$$q = \frac{T_7 - T_o}{R_{8,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot \varepsilon_{rt} \cdot (T_7^4 - T_o^4) \quad (18)$$

Yhtälöryhmässä tuntemattomia ovat lämpövirta  $q$  sekä lämpötilat  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  ja  $T_7$ . Yhtälöissä esiintyvä  $\varepsilon_{al}$  on alumiinifolion emissiveetti, joka on noin 0,05 (Incropera & DeWitt 2002, 931). Alumiinifoliota käytetään tyhjiökammioiden pinnoissa minimoimaan säteilylämpövirtaa. Viimeisessä yhtälössä esiintyvä  $\varepsilon_{rt}$  on puhtaan tai kiillotetun ruostumattoman teräksen pinnan emissiveetti, jonka on arvioitu olevan noin 0,2 (Incropera & DeWitt 2002, 931).

Yhtälöryhmässä ensimmäinen yhtälö on yksinkertainen lämpövirran yhtälö, jossa lämpövastukset ovat sarjassa. Lämpövastus  $R_{1-4}$  huomioi konvektion varaston sisäpinnalla sekä

lämmön johtumisen kahdessa ensimmäisessä ruostumattoman teräksen kerroksessa ja perliitissä. Toinen ja kolmas yhtälö kuvaavat lämpövirtaa tyhjiökammioissa. Ensimmäinen termi on säteilylämpövirta sisäkkäisten sylinterien välillä, ja toinen termi kuvaa lämmön johtumista ilmassa. Neljäs yhtälö on yksinkertainen lämmön johtumisen yhtälö uloimmalle ruostumattoman teräksen kerrokselle. Viimeinen yhtälö huomioi ensimmäisessä termissä konvektion varaston ulkopinnalta ympäristöön, sekä toisessa termissä säteilyn varaston pinnalta ympäristöön. Vastaavat yhtälöryhmät muille työssä lasketuille tapauksille on esitetty liitteessä 1.

Yhtälöryhmää joudutaan iteroimaan, koska ilman ja perliitin lämmönjohtavuudet ovat eristekerroksien pintalämpötilojen funktioita. Molemmille lämmönjohtavuuksille esitetään ensin alkuarvaus ja yhtälöryhmästä ratkaistaan lämpövirta ja lämpötilat. Lämpötilojen perusteella valitaan uudet lämmönjohtavuuden arvot. Iterointia jatketaan, kunnes arvot konvergoituvat. Yhtälön (15) mukaisesti lämpövirta tyhjiökammion ensimmäisessä osassa 1 Pa paineessa on iteroiduilla lämpötiloilla

$$q = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,174 \text{ m} \cdot 0,400 \text{ m} \cdot ((391 \text{ K})^4 - (349 \text{ K})^4)}{\frac{1}{0,05} + \frac{1 - 0,05}{0,05} \left( \frac{0,174 \text{ m}}{0,179 \text{ m}} \right)} + \frac{391 \text{ K} - 349 \text{ K}}{3,21 \text{ K/W}} = 18,58 \text{ W}$$

Lämpövirran tiheys on varaston sisäpinnalla yhtälön (9) ja sylinterin pinta-alan yhtälön (6) mukaisesti

$$q'' = \frac{18,58 \text{ W}}{\pi \cdot 0,260 \text{ m} \cdot 0,400 \text{ m}} = 56,87 \text{ W/m}^2$$

Vastaavasti lämmönläpäisykerroin varaston sisäpinnalla on yhtälön (1) ja sylinterin pinta-alan yhtälön (6) mukaisesti

$$U = \frac{18,58 \text{ W}}{\pi \cdot 0,260 \text{ m} \cdot 0,400 \text{ m} \cdot (255 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C})} = 0,247 \text{ W/m}^2 \text{K}$$



Kaikkien tapauksien lämpövirrat, lämpövirtojen tiheydet ja lämmönläpäisykertoimet on esitetty 1 Pa paineessa taulukossa 3.2. Kaikki lämpövirtojen tiheydet ja lämmönläpäisykertoimet on laskettu sisäpinta-alaa kohden.

Taulukko 3.2: Lämpövirrat, lämpövirtojen tiheydet ja lämmönläpäisykertoimet 1 Pa paineessa.

	$q$ [W]	$q_i''$ [W/m <sup>2</sup> ]	$U_i$ [W/m <sup>2</sup> K]
Tapaus V	82,59	252,80	1,097
Tapaus P	22,22	68,01	0,296
Tapaus TP	26,07	79,78	0,347
Tapaus TTP	18,05	55,24	0,240
Tapaus PT	20,26	62,01	0,270
Tapaus PTT	18,58	56,87	0,247
Tapaus TPT	18,48	56,56	0,246
Tapaus TTPT	16,82	51,49	0,224
Tapaus TPTT	17,14	52,46	0,227
Tapaus TTPTT	15,74	48,18	0,209
Tapaus 10T	10,87	33,28	0,145

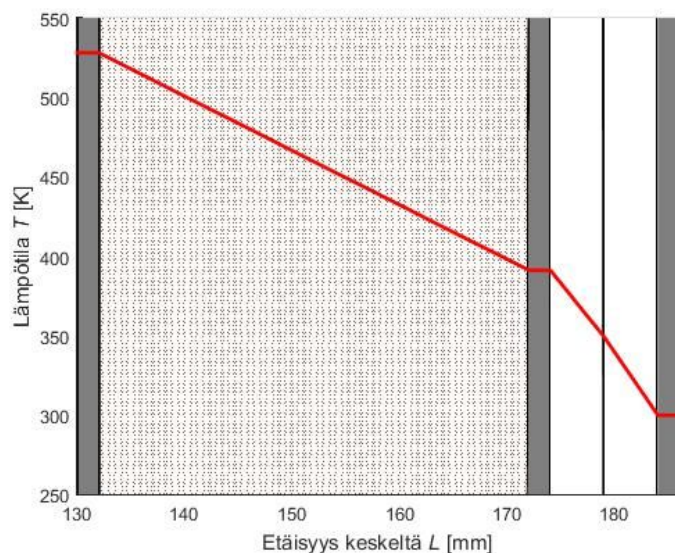
Taulukon 3.2 mukaisesti pienin lämpövirta, lämpövirran tiheys ja lämmönläpäisykerroin saavutetaan tapauksella 10T, eli pelkkiä tyhjiökammioita hyödyntävällä rakenteella. Vertailutapaukseen V verrattuna tutkituilla eristysratkaisuilla saavutetaan noin 4–8 kertaa pienemmät lämpöhäviöt, joten tutkitut tapaukset ovat erittäin tehokkaita eristeitä.

### 3.5.4 Lämpötilojen määrittäminen eri kohdissa seinämää

Lämpötilat eri kohdissa seinämää voidaan määrittää, kun tunnetaan riittävästi seinämäkerrosten lämpövastuksia ja pintalämpötiloja, sekä lämpövirta. Lämpövirta on vakio kaikissa seinämän kerroksissa. Tilanteissa joissa lämpövastuksia ei ole laskettu, voidaan käyttää yhtälöryhmistä ratkaistuja lämpötiloja. Esimerkiksi tilanteessa PTT lämpötilat 4-7 on selvitetty yhtälöryhmää ratkaistaessa ja lämpötilat 1-3 voidaan ratkaista sisälämpötilan, lämpövirran ja lämpövastuksien avulla. Esimerkiksi pisteessä 1 eli lämpövaraston sisäpinnalla lämpötila on yhtälön (3) mukaisesti

$$T_1 = T_i - q \cdot R_1 = 528,15 \text{ K} - 18,58 \text{ W} \cdot 0,00306 \text{ K/W} = 527,85 \text{ K}$$

Tapauksen PTT seinämän lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 3.3, jossa lämpötila on etäisyyden funktio.



Kuva 3.3: Tapauksen PTT seinämän lämpötilajakauma 1 Pa paineessa. Taustalla on esitetty kuvan 2.2 mukainen seinämän rakenne.

Kuvasta 3.3 voidaan määrittää taustalle piirretyn seinämän rakenteen avulla eri kerroksien vaikutus lämpötilaan. Ruostumattoman teräksen kohdalla, esimerkiksi kuvaajan vasemmassa reunassa, lämpötila ei laske lähes ollenkaan. Heti ruostumattoman teräksen jälkeen on perliittikerros, jossa lämpötila laskee selvästi. Tyhjiökammiossa lämpötila laskee todella nopeasti.

Lämpövastuksia ei ole määritetty etukäteen tiloille joissa esiintyy säteilyä, koska säteilyn lämpövastus olisi yhtälöiden (3), (7) ja (8) mukaisesti riippuvainen lämpötiloista. Lämpötilojen selvittämisen jälkeen voidaan laskea lämpövastukset myös tyhjiökammioille ja varaston ulkopinnoille yhtälön (3) mukaisesti. Tilanteen PTT kaikki lämpövastukset paineessa 1 Pa on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3: Tapauksen PTT lämpövastukset paineessa 1 Pa.

$R_1$ [K/W]	$R_2$ [K/W]	$R_3$ [K/W]	$R_4$ [K/W]	$R_5$ [K/W]	$R_6$ [K/W]	$R_7$ [K/W]	$R_8$ [K/W]
0,00306	0,000367	7,38	0,000278	2,26	2,66	0,000260	0,0816

Vertaamalla taulukon 3.3 lämpövastuksia kuvan 3.3 merkintöihin havaitaan, että perliitin ja tyhjiökammioiden lämpövastukset ovat selvästi merkittävimpiä. Perliitin lämpövastus on suurempi kuin tyhjiökammioiden, mutta eristepaksuutta kohden tyhjiökammioiden eristyskyky on parempi. Ensimmäisen tyhjiökammion lämpövastus  $R_5$  on hieman toisen tyhjiökammion lämpövastusta  $R_6$  pienempi. Tämä johtuu suuremmista lämpötiloista ensimmäisen tyhjiökammion pinnoilla, mikä heikentää tyhjiökammion eristyskykyä.

### 3.5.5 Vapaa konvektio tyhjiökammioissa

Tyhjiökammioissa ilma on suljetussa tilassa, jonka seinämällä on lämpötilaero. Tämän kaltaisissa tilanteissa on syytä ottaa huomioon vapaan konvektion mahdollisuus, koska vapaan konvektion esiintyessä lämpövirta kasvaa tyhjiökammioissa. Rayleighin luvulla voidaan yhtälöiden (10) ja (11) avulla arvioida, syntyykö kammioissa vapaata konvektiota. (Incropera & DeWitt 2002, 561-565). Rayleighin luku tasolevyille ensimmäisessä tyhjiökammiossa on yhtälön (11) mukaan

$$Ra_L = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \left(\frac{1}{370 \text{ K}}\right) \cdot (391 - 349) \text{ K} \cdot (0,005 \text{ m})^3 \cdot 0,95 \text{ kg/m}^3}{33,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 21,70 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2} = 182,3$$

Laskettu Rayleighin luku on tarkoitettu suorakulmaisille, suljetuille tiloille. Kaikki käytetyt ilman aineominaisuudet on valittu keskilämpötilassa 370 K. Sisäkkäisten sylinterien tapauksessa Rayleighin luku voidaan laskea sijoittamalla laskettu Rayleighin luku yhtälön (10). Rayleighin luku sisäkkäisille sylintereille on

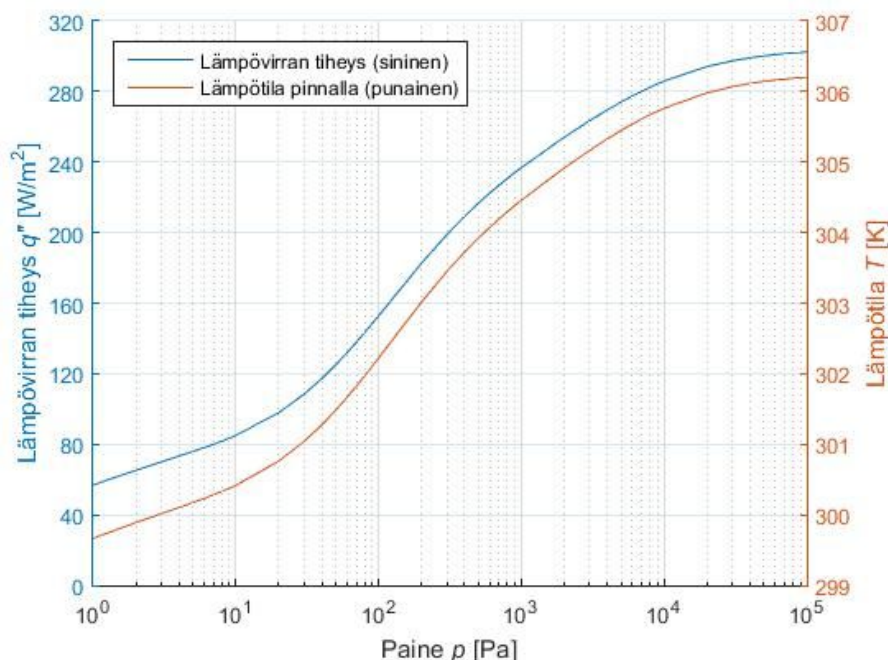
$$Ra_c^* = \frac{(\ln(0,368 \text{ m}/0,358 \text{ m}))^4}{(0,005 \text{ m})^3 \cdot \left((0,358 \text{ m})^{-3/5} + (0,368 \text{ m})^{-3/5}\right)^5} \cdot 182,3 = 1,26$$

Jos Rayleighin luku on sisäkkäisten sylinterien tapauksessa pienempi kuin 100, voidaan ilman efektiivinen lämmönjohtavuus olettaa yhtä suureksi kuin lämmönjohtavuus normaalitilassa (Incropera & DeWitt 2002, 565). Efektiivinen lämmönjohtavuus huomioi vapaan konvektion suljetussa tilassa, joten lasketun arvon mukaisesti tyhjiökammiossa ei esiinny vapaata konvektiota.

Työssä Rayleighin lukua on seurattu kaikilla tapauksilla ja kaikissa paineissa. Rayleighin luku sisäkkäisille sylintereille on suurimmillaan noin 3,5, joten vapaata konvektiota ei tapahdu missään tilanteessa. Pienet Rayleighin luvut selittyvät kohtuullisilla lämpötilaeroilla ja todella pienellä tyhjiökammion paksuudella kaikissa tapauksissa.

### 3.6 Arvojen riippuvuus paineesta

Eristyksen toimivuus on erittäin riippuvainen tyhjiökammioissa vallitsevista paineista. Perliitin ja ilman lämmönjohtavuudet laskevat nopeasti paineen laskiessa kuvan 3.1 mukaisesti, muut aineominaisuudet oletetaan olevan paineen suhteen likimain vakioita. Lämpövirta ja lämpövirran tiheys voidaan laskea eri paineissa samalla periaatteella kuin kappaleessa 3.5.3, mutta perliitin ja ilman lämmönjohtavuudet muuttuvat tiloissa, joissa vallitsee tyhjiö. Tapauksen PTT lämpövirran tiheys ja ulkopinnan lämpötila on esitetty paineen funktiona kuvassa 3.4.

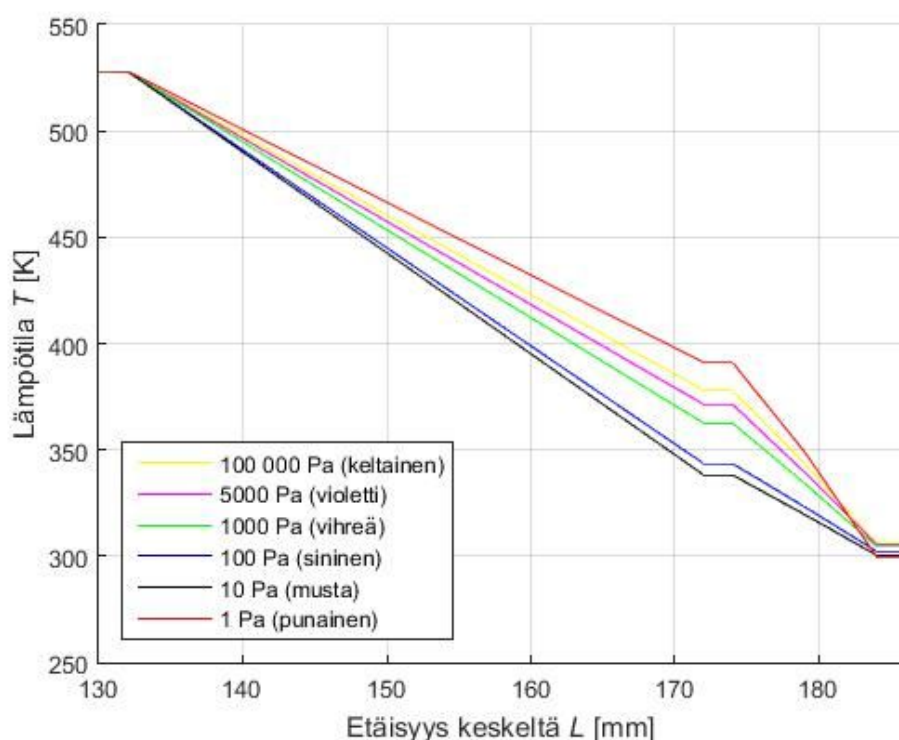


Kuva 3.4: Tapauksen PTT lämpövirran tiheys ja ulkopinnan lämpötila paineen funktiona.

Kuvan 3.4 mukaisesti lämpövirran tiheys ja ulkopinnan lämpötila kasvavat paineen kasvaessa. Muutos on merkittävä erityisesti pienissä paineissa ja tarkasteltava painealue on

laaja, joten paineakseli on esitetty logaritmisena. Lämpövirran tiheyden kasvu paineen kasvaessa johtuu ilman ja perliitin lämmönjohtavuuksien paineriippuvuudesta.

Lämpötilan kuvaaja noudattaa kuvan 3.4 mukaisesti samankaltaista muotoa kuin lämpövirran tiheyden kuvaaja, koska yhtälön (1) mukaisesti lämpövirta on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon, kun pinta-ala pysyy vakiona. Ympäristön ja suolaseoksen lämpötila sekä konvektiolämmönsiirtokertoimet ovat vakioita, joten lämpövirran kasvaessa lämpötilaeron täytyy kasvaa ainakin varaston sisä- ja ulkoseinämillä. Vastaavasti seinämän sisäisen lämpötilaeron täytyy laskea. Kuvassa 3.5 on esitetty lämpötilajakauma tapaukselle PTT paineissa 1 Pa, 10 Pa, 100 Pa, 1000 Pa, 5000 Pa ja 100 000 Pa.



Kuva 3.5: Tapauksen PTT seinämän lämpötilajakauma paineissa 1 Pa, 10 Pa, 100 Pa, 1000 Pa, 5000 Pa ja 100 000 Pa.

Kuvan 3.5 vasemmassa laidassa sisäpinnan lämpötila pysyy likimain vakiona kaikilla paineen arvoilla, koska sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin on suuri. Oikeassa

reunassa ulkopinnalla lämpötilaero eri paineilla on selkeämmin havaittavissa, koska konvektiolämmönsiirtokerroin on huomattavasti pienempi.

Kuvan 3.5 mukaisesti lukuunottamatta painetta 1 Pa paineen kasvaessa lämpötilaero kasvaa tyhjiökammioissa ja laskee perliittieristeessä. Ilmiö on selitettävissä lämmönjohtavuuksien paineriippuvuuksilla. Perliitin lämmönjohtavuus kasvaa nopeammin paineen kasvaessa kuin tyhjiökammioissa vallitsevan ilman lämmönjohtavuus. Säteilylämmönsiirtoon paine ei vaikuta, jos väliaine ei osallistu säteilyyn. Tyhjiökammion lämpövastus ei siis laske yhtä nopeasti kuin perliitin lämpövastus, ja tästä syystä paineen kasvaessa tyhjiökammion merkitys eristeenä kasvaa verrattuna perliittiin. Noin 1–4 Pa paineissa tyhjiökammioiden eristyskyky on jo valmiiksi parempi kuin perliitin, joten paineen 1 Pa kuvaaja poikkeaa muista tapauksista.

### 3.7 Eri tapauksien lämpöhäviöt eri paineilla

Kaikki eri tapaukset on laskettu painevälillä 1–100 000 Pa luvuissa 3.5 ja 3.6 esitetyllä tavalla. Eri tilanteissa yhtälöryhmät ovat luonnollisesti erilaisia, ja kaikkien tapauksien ratkaisussa käytetyt yhtälöryhmät on esitetty liitteessä 1. Kaikkien tapauksien lämpövirtojen tiheydet on esitetty paineissa 1 Pa, 10 Pa, 100 Pa, 1000 Pa ja 5000 Pa taulukossa 3.4.

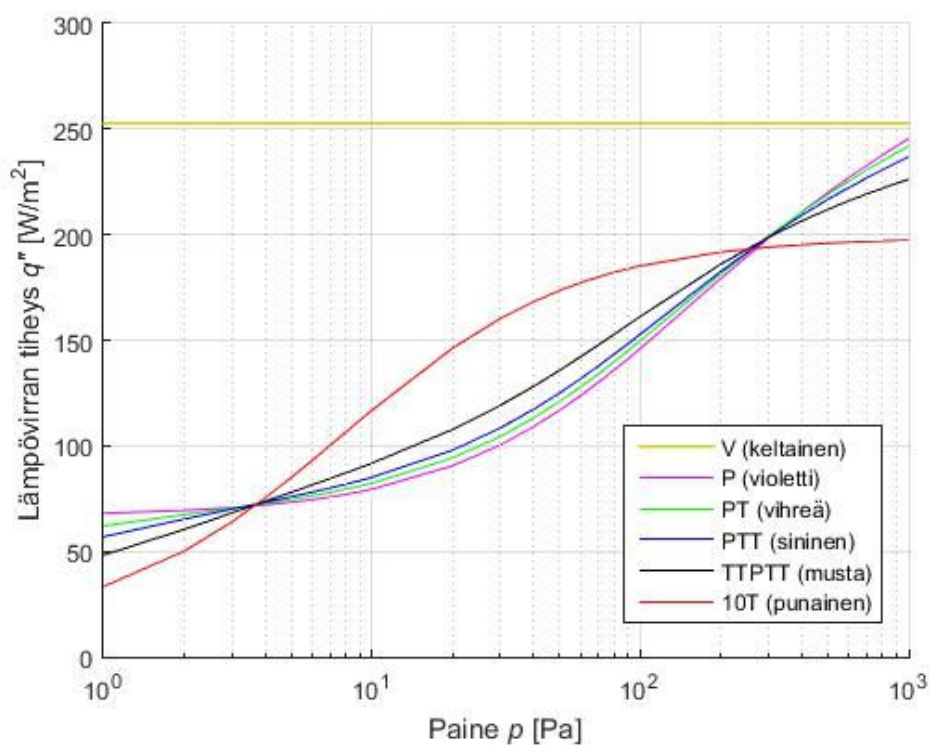
Taulukko 3.4: Lämpövirtojen tiheydet paineissa 1 Pa, 10 Pa, 100 Pa, 1000 Pa ja 5000 Pa.

	1 Pa	10 Pa	100 Pa	1000 Pa	5000 Pa
Tapaus V	252,80	252,80	252,80	252,80	252,80
Tapaus P	68,01	79,38	146,04	245,55	296,14
Tapaus TP	79,78	108,47	188,86	292,67	340,18
Tapaus TTP	55,24	85,22	154,10	234,92	269,50
Tapaus PT	62,01	82,21	149,68	242,00	285,90
Tapaus PTT	56,87	85,01	152,83	236,83	274,07
Tapaus TPT	56,56	85,72	154,50	237,40	273,47
Tapaus TTPT	51,49	88,31	157,47	230,37	259,42
Tapaus TPTT	52,46	88,81	157,93	232,65	262,93
Tapaus TTPTT	48,18	91,71	161,20	226,18	250,22
Tapaus 10T	33,28	116,80	185,24	197,35	198,51

Taulukosta 3.4 havaitaan, että paineissa 1 Pa, 1000 Pa ja 5000 Pa pienimmät lämpöhäviöt saavutetaan tapauksilla, joissa hyödynnetään tyhjiökammioita mahdollisimman paljon, kuten tapauksissa 10T, TTPTT, TPTT ja TTPT. 10 Pa ja 100 Pa paineilla pienimmät lämpöhäviöt saavutetaan tapauksilla, joissa käytetään mahdollisimman paljon perliittiä, kuten tapauksissa P, PT, TP ja PTT. Vaikka tyhjiökammiot valmistetaan mahdollisimman ohuiksi, ne eivät silti ole yhtä tehokkaita paksuutta kohden kuin perliitti näissä paineissa. Lämpöhäviöiden perusteella voidaan myös asettaa yläraja tarkasteltaville painetasoille. Jo paineessa 1000 Pa tapaukset ovat niin lähellä vertailutapausta V, että tätä suurempia paineita ei ole järkevää tarkastella. Ainoastaan tapauksen 10T lämpöhäviöt pysyvät selvästi pienemmissä lukemissa näin suurissa paineissa.

Vertailemalla tapauksia TP ja TTP tapauksien PT ja PTT kanssa havaitaan myös, että tyhjiökammioiden eristyskyky on keskimäärin parempi, jos ne sijoitetaan seinämässä perliittieristeen jälkeen. Erot ovat pieniä, mutta säteilypinnan emissiviteetin lämpötilariippuvuus, jota ei tässä työssä käsitellä, voi vahvistaa myös tyhjiökammion lämpötilariippuvuutta. Todellisuudessa perliittieristeen sisäpuolella olevat tyhjiökammiot saattavat siis olla laskettuja huonompia eristyskyvyltään. Näistä syistä tyhjiökammiot on syytä sijoittaa perliittieristeen ulkopuolelle.

Lähempää tarkastelua varten valitaan parhaiten toimivia eritysratkaisuja. Lämpövirtojen tiheyksien perusteella valitaan tarkasteluun tapaukset P, PT, PTT, TTPTT ja 10T. Tapaukset TP ja TTP jätetään pois tarkastelusta aiemmin perustelluin syin, koska näissä tapauksissa tyhjiökammiot on sijoitettu perliittieristeen sisäpuolelle. Valittujen tapauksien ja vertailutapauksen V lämpövirtojen tiheydet on esitetty paineen funktiona painevälillä 1–1000 Pa kuvassa 3.6.



Kuva 3.6: Tapauksien V, P, PT, PTT, TTPTT ja 10T lämpövirtojen tiheydet paineen funktiona.

Kuvasta 3.6 havaitaan, että perliitin eristyskyky on parempi kuin tyhjiökammioilla painevälillä 4–200 Pa. Näissä paineissa pienimmät lämpöhäviöt saavutetaan siis perliittiä eniten hyödyntävillä rakenteilla, kuten tapauksilla P ja PT. Tätä suuremmissa tai pienemmissä paineissa useita tyhjiökammioita hyödyntävät tapaukset, kuten TTPTT ja 10T eristävät parhaiten. Lämpövirtojen tiheyksiä pohditaan tarkemmin luvuissa 4.2 ja 4.4.



## 4 TULOSTEN ARVIOINTI

Tässä luvussa arvioidaan laskennassa saatuja tuloksia, mahdollisia virhetekijöitä ja muita tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Tulosten ja pohdinnan perusteella valitaan paineen mukaan optimaalinen seinämärakenne eristykselle.

### 4.1 Alkuoletuksien vaikutus laskentatarkkuuteen

Laskennassa käytetyt alkuoletukset aiheuttavat epätarkkuutta laskentatarkkuuteen. Stationääritila ei ole mahdollinen käytännössä missään tilanteessa, koska lämpöhäviöiden ja käyttötehon pitäisi olla yhtä suuri kuin lataustehon niin pitkään, että systeemi saavuttaa tasapainotilan. Stationääritilaoletus on siis todennäköisesti alkuoletuksiin liittyvistä virhetekijöistä merkittävin. Lähimmäs stationääritilaa päästään luultavasti tilanteissa, joissa varastoa ei ladata eikä lämpöä käytetä, jolloin ainoa muutos aiheutuu lämpöhäviöistä. Tämän kaltaisissa tilanteissa stationääritilaoletus ei aiheuta kovin suurta virhettä, koska lämpötilojen muutosnopeus on erittäin pieni.

Säteilypintojen oletus diffuuseiksi ja harmaiksi tuskin aiheuttaa kovin merkittävää virhettä. Säteilypintojen ominaisuudet pitäisi tuntea tarkemmin, jotta virheen suuruutta pystyttäisiin arvioimaan luotettavammin. Väliaineen oletus merkityksettömäksi tyhjiökammioissa ei ole merkittävä virhelähde. Ilma koostuu pääosin poolittomista kaasuista, typestä ja hapesta, jotka eivät vaikuta säteilyyn (Incropera & DeWitt 2002, 821).

Säteilykilpien olettaminen äärettömän ohuiksi ei käytännössä vaikuta laskennan tarkkuuteen. Säteilykilpi voidaan valmistaa todellisuudessa erittäin ohueksi, koska siihen ei kohdistu käytännössä minkäänlaista räsitystä. Paine on sama säteilykilven molemmilla puolilla, eikä tyhjiökammioissa ole mitään ainesta mikä voisi mahdollisen mekaanisen räsituksen vuoksi rikkoa säteilykilven. Ruostumattomien teräslevyjen lämpövastukset on laskettu kappaleessa 3, ja myös ne ovat käytännössä merkityksettömiä eristyksen kannalta. Säteilykilpien paksuuden vuoksi niiden merkitys olisi vielä huomattavasti teräslevyjä pienempi, eli käytännössä olematon. Säteilykilpinä käytetään tässä työssä alumiinifoliota, jonka lämmönjohtavuus voi olla jopa 10-kertainen verrattuna ruostumattomaan teräkseen, mikä pienentää lämpövastusta entisestään (Incropera & DeWitt 2002, 821).

Likavastuksilla voi olla tyhjiökammioissa yllättävän suuri merkitys, jos säteilypinnat pääsevät jostain syystä likaantumaan. Tyhjiökammion seinämien pintojen emissiviteettien tulisi olla yhtälön (7) mukaisesti mahdollisimman pieniä, jotta lämpövirta tyhjiökammioissa saadaan minimoitua. Käytännössä pienimmät emissiviteetit saavutetaan hyvin heijastavilla ja kiiltävillä pinnoilla. Pintojen likaantuminen voi kasvattaa emissiviteettien arvoja, mikä vastaavasti lisää lämpöhäviöitä. Myös varaston ulkopinnan likaantuminen voi samalla periaatteella nostaa lämpöhäviöitä. Säteilyn merkitys ulkopinnalta on kuitenkin niin vähäinen, että likaantumisen vaikutus olisi todella pieni. Kontaktilämpövastukset tai muut likavastukset toisaalta kasvattavat seinämän lämmön johtumisen lämpövastusta, mikä on eristykseen kannalta edullista. Työssä on kuitenkin kyse erittäin hyvin eristetyistä systeemistä, jolloin likavastusten tuoma lisä lämpövastuksiin on mitätön.

Käytetyt aineominaisuudet perliitille, ilmalle, ruostumattomalle teräkselle ja vuorivillalle ovat lämpötilan funktioita. Laskennassa on pääosin käytetty aineominaisuuksia keskimääräisessä lämpötilassa, mikä on laskettu suolaseoksen ja ympäristön lämpötilan perusteella. Villalla keskilämpötilan arvio on hyvä, kun taas ruostumattomalla teräksellä useat eri lämpötilassa olevat kerrokset ovat keskiarvoltaan lähellä keskilämpötilaa. Ruostumattoman teräksen vaikutus on muutenkin pieni, joten lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuudesta syntyvä virhe on pieni. Tyhjiökammioissa ja perliittikerroksissa keskimääräinen lämpötila on laskettu iteroiden, joten niissä aineominaisuuksien lämpötilariippuvuuden aiheuttama virhe on käytännössä nolla. Säteilypintojen emissiviteetit on oletettu lämpötilariippumattomiksi, mikä oletettavasti aiheuttaa virhettä. Todellisuudessa perliitin sisäpuolella olevien tyhjiökammioiden eristyskyky on tästä syystä luultavasti heikompi verrattuna ulkopuolisiin tyhjiökammioihin.

Useista virhetekijöistä huolimatta laskennan virheet eivät ole kovin haitallisia työn tavoitteen kannalta. Vaikka lukuarvot tuskin ovat kovin tarkkoja, päästään tuloksilla oikeaan suuruusluokkaan. Työn tärkein tehtävä on verrata erilaisia seinämärakenteita toisiinsa, ja lopullinen mitoitus ja optimointi voidaan tehdä muutenkin vasta koemittausten perusteella. Työssä laskettujen arvojen perusteella rakenteita voidaan verrata ja valita paras vaihtoehto, jolloin työn tärkein tavoite toteutuu.

## 4.2 Tyhjiökammioiden vaikutus eristykseen

Taulukon 3.3 mukaisesti tyhjiökammioiden lämpövastukset ovat isoja verrattuna esimerkiksi ruostumattomaan teräkseen, mutta selvästi pienempiä kuin perliittieristeellä. Tyhjiökammioiden osuus seinämäpaksuudesta on kuitenkin todella pieni, mikä tekee siitä tehokkaan eristyskeinon. Eri eristysratkaisujen lämpöhäviöitä vertaamalla voidaan päätellä, että seinämäpaksuutta kohden tyhjiökammio toimii erittäin hyvin eristeenä verrattuna myös perliittiin, kun painetaso on sopiva.

Tyhjiökammiot kannattaa useimmiten sijoittaa seinämässä perliitin ulkopuolelle. Laskennan mukaan ulkopuoliset tyhjiökammiot ovat lämpöhäviöiden kannalta keskimäärin parempia kuin sisäpuoliset tyhjiökammiot. Lisäksi säteilypinnan emissiviteetin lämpötilariippuvuutta ei ole huomioitu, mikä parantaa ulkopuolisten tyhjiökammioiden eristyskykyä verrattuna sisäpuolisiin. Sisäpuolisissa tyhjiökammioissa pintalämpötilat ovat korkeampia, mikä oletettavasti kasvattaa pintojen emissiviteettiä ja lämpövirtaa. Jos eristyksessä käytetään tyhjiökammioita, kannattaa ne sijoittaa peräkkäin. Tällöin voidaan hyödyntää ohuita säteilykilpiä ruostumattomien teräskerroksien sijaan ja valmistus on helpompaa kuin erillisten tyhjiökammioiden tapauksessa.

Tyhjiökammioiden eristyskyky on kuvan 3.6 mukaisesti erittäin paineriippuvainen. Painevalilla 4–200 Pa perliitti toimii paremmin eristeenä, joten näissä paineissa tyhjiökammioita ei kannata käyttää. Jos varasto kuitenkin suunnitellaan tälle painealueelle, mutta paineen pysyvyydestä ei ole varmuutta, voidaan eristystä tehostaa tyhjiökammioilla. Erittäin pienillä paineilla ja yli 200 Pa paineilla tyhjiökammiot eristävät perliittiä paremmin. Näissä paineissa kannattaa käyttää mahdollisimman montaa kerrosta tyhjiökammioita. Hieman alle 4 Pa paineissa on syytä kuitenkin käyttää tyhjiökammioiden lisäksi perliittiä, koska käytön myötä paine luultavasti pääsee nousemaan hieman. Yli 200 Pa paineilla perliitin käytölle ei ole samanlaista käyttöperustetta, koska tyhjiökammioiden eristyskyky ei käytännössä enää heikkene näissä paineissa, mutta perliitillä lämmönjohtavuus kasvaa vielä voimakkaasti.

Lisäetuna tyhjiökammioiden vähäisemmälle paineriippuvuudelle yli 200 Pa paineissa on mahdollisuus valmistaa ne jopa normaalipaineisiksi. Tällöin kyseessä olisi enemmän säteilykammio. Tutkituilla tapauksilla, joissa käytetään sekä perliittiä että tyhjiökammioita, normaalipaineiset säteilykammiot kasvattaisivat lämpöhäviöitä enintään vain muutamia prosentteja tyhjiökammioihin verrattuna, kun perliitin painetaso on 100 Pa tai suurempi. Jopa normaalipaineessa säteilykammioiden eristyskyky on kohtuullisen hyvä, joten valmistettavuuden kannalta ylimääräiset säteilykilvet lämpövaraston ulkopinnalla olisivat edullinen ja helppo tapa tehostaa eristyksen toimivuutta. Normaalipaineiset säteilykammiot helpottavat säteilypintojen puhdistusta, jos sille on tarvetta, jolloin likaantumisen mahdolliset haittavaikutukset saadaan minimoitua. Säteilykammioistakin on syytä tehdä suljettuja, koska näin saadaan estettyä ulkopuolisten aineiden pääsy säteilytilaan tai sen pinnoille, eikä konvektiota pääse syntymään pintojen välille yhtä helposti.

### **4.3 Käyttöympäristön vaikutus lämpöhäviöihin**

Lämpövaraston käyttöympäristöllä on luonnollisesti suuri vaikutus lämpöhäviöihin. Ympäristön lämpötila vaikuttaa suoraan lämpöhäviöihin: kylmemmässä ympäristössä lämpöhäviöt ovat suuremmat. Lämpövaraston sijainnin suojaisuus on myös tärkeä tekijä. Jos lämpövarasto on tuulisella alueella, konvektiolämmönsiirto kasvaa varaston ulkopinnalta. Suojaisa alue, esimerkiksi joku ulkorakennus tai sisätilat laskevat konvektiolämmönsiirtokerrointa.

Jos varasto on avoimessa paikassa alttiina ympäristön säteilylle, riippuvat lämpöhäviöt sääolosuhteista. Kirkkaalla pakkassäällä säteilyn merkitys ja samalla lämpöhäviöt kasvavat, mutta aurinkoisella kelillä säteily voi jopa lämmittää varastoa. Myös ympäristön kosteus vaikuttaa lämpöhäviöihin. Jos varasto on esimerkiksi alttiina vesisateelle tai pinta pääsee muulla tavalla kastumaan, sitoutuu veden haihtumiseen paljon lämpöä varaston pinnasta.

Yleisesti ottaen lämpöhäviöiden kannalta lämpövarasto kannattaa sijoittaa mahdollisimman lämpimään paikkaan, tuulensuojaan ja useimmiten varjoon. Auringonpaiste tai suora

valaistus lämpövaraston pintaan alentaa lämpöhäviöitä, milloin varastoa ei kannattaisi pitää varjossa. Ympäristön olisi syytä olla mahdollisimman puhdas, jotta lämpövaraston pinta ei likaannu.

#### 4.4 Eristysratkaisun valinta

Tässä työssä laskettujen tuloksien perusteella yksinkertainen perliittieristys, eli tapaus P on paras vaihtoehto lämpövaraston eristeeksi. Eristyksen rakenne on sisäpuolelta alkaen: ruostumaton teräs, perliitti, ruostumaton teräs. Tapauksen P lämpövirta painevälillä 4–200 Pa on lasketuilla eristyspaksuuksilla pienin, ja rakenne on todella yksinkertainen. Käytettäessä pelkkää perliittiä eristeenä paineen tulisi olla noin 5–50 Pa, jotta lämpöhäviöt ovat käytetyllä eristyspaksuudella riittävän pienet.

Painevälillä 50–100 Pa tapauksen P eristyspaksuutta tulee luultavasti kasvattaa, jotta saavutetaan riittävän pienet lämpöhäviöt. Vaihtoehtoisesti näissä paineissa voi olla järkevää hyödyntää myös tyhjiökammioita tai normaalipaineisia säteilykammioita, jos niiden valmistuskustannukset ovat pienet perliittieristykseen verrattuna. Näillä paineilla tyhjiökammioiden eristyskyky ei enää ole merkittävästi normaalipaineisia säteilykammioita parempi, joten säteilykammioiden käyttö voi olla taloudellisesti tyhjiökammioita tai jopa ylimääräistä perliittiä parempi vaihtoehto.

Yli 100 Pa paineessa perliitin lisäksi on järkevää hyödyntää tyhjiö- tai säteilykammioita, eli käyttää esimerkiksi tapausta PT tai PTT. Jos paine kasvaa käytön ja kulutuksen myötä, toimivat tyhjiö- tai säteilykammiot hyvänä lisäeristeenä suuremmissa paineissa. Näin suurissa paineissa eristepaksuutta täytyy kasvattaa riittävän pienien lämpöhäviöiden saavuttamiseksi. Mitä suurempaa painetta käytetään, sitä enemmän tyhjiö- tai säteilykammiota tulisi hyödyntää. Eristystä ei kannata suunnitella yli 100 Pa paineisiin, koska lämpöhäviöt olisivat jo lähellä vertailutapausta V.

Selvästi alle 4 Pa paineissa pelkkien tyhjiökammioiden tapaus 10T on paras vaihtoehto. Mitä pienemmät paineet ovat, sitä selkeämpi on tyhjiökammioiden etu perliittiin nähden. Jos paineen pysyvyydestä ei ole takeita tai suunniteltu paine on noin 3–5 Pa, kannattaa

käyttää sekä perliittiä että tyhjiökammioita. Näillä painetasoilla tyhjiökammioiden eristyskyky heikkenee paineen kasvaessa todella nopeasti perliittiin verrattuna. Esimerkiksi tapaus TTPTT on hyvin soveltuva eristysratkaisu, mutta kaikki tyhjiökammiot kannattaa sijoittaa luvun 4.2 perustelujen mukaisesti peräkkäin perliittikerroksen ulkopuolelle.

Lopullista valintaa varten täytyy selvittää paineen taso ja paineen pysyvyys mahdollisimman tarkasti. Kun tunnetaan järkevästi saavutettava paineen taso, voidaan valita paineelle paras eristysvaihtoehto. Myös paineen pysyvyyttä on hyvä tutkia, jotta eristysratkaisun valinnassa voidaan varautua mahdolliseen paineen nousuun. Kun käytettävissä oleva painetaso on selvitetty ja eristysratkaisu valittu, voidaan eristepaksuudet optimoida haluttujen lämpöhäviöiden mukaan.

Eristystä voidaan tehostaa tavoittelemalla matalampia painetasoja, lisäämällä eristepaksuutta tai käyttämällä eri materiaaleja. Myös paineen pysyvyyttä voi pyrkiä parantamaan, jolloin eristysratkaisu voidaan valita tarkemmin juuri tietylle paineelle. Sopiva tehostuskeino voidaan valita vertaamalla lämpöhäviöiden laskemiseen vaadittavia kustannuksia. Matalammilla painetasoilla lämpöhäviöt luonnollisesti alenevat, mutta parhaassa tapauksessa voidaan valita myös halvemmin valmistettavissa oleva rakenne, joka toimii alennetulla paineella alkuperäistä paremmin. Eristepaksuuden kasvattaminen on helppo ja yleensä edullinen tapa vähentää lämpöhäviöitä, mutta samalla varaston koko kasvaa. Tässä työssä tavoitellaan mahdollisimman pienen seinämäpaksuuden vaativaa eristysratkaisua, joten seinämäpaksuutta ei ole järkevää kasvattaa liikaa.

Erilaisia materiaaleja hyödyntämällä voidaan päästä huomattavasti laskettuja tuloksia pienempiin lämpöhäviöihin kohtuullisilla paineilla ja seinämäpaksuuksilla. Esimerkiksi pyrogeenisen piidioksidin eristyskyky ei ole läheskään yhtä herkkä paineen muutoksille kuin perliitin eristyskyky, mikä tekee siitä helpommin hyödynnettävän eristemateriaalin (Fuchs, Hofbeck & Faulstich 2012, 257). Ilman syrjäyttäminen jollain toisella täyttökäksellä on myös varteenotettava vaihtoehto lämpöhäviöiden pienentämiseksi, mutta tällöin paineen pysyvyyden täytyy olla erittäin hyvä (Demharter 2011, 109-112). Jos käytettäviä materiaaleja muutetaan, täytyy laskenta tehdä uusilla aineominaisuuksilla uudestaan optimaalisen seinämärakenteen selvittämiseksi.

## 5 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin optimaalinen seinämärakenne sulasuolalämpövaraston eristykseksi. Tarkasteltava varasto esiteltiin yleisellä tasolla ja tutkittavat seinämärakenteet ja -materiaalit valittiin laskentaa varten. Lämpöhäviöt ratkaistiin kaikille rakenteille paineissa 1–100 000 Pa. Laskettujen arvojen perusteella valittiin optimaalinen seinämärakenne paineen mukaan, ja arvioitiin erityisesti tyhjiökammioiden eristyskykyä.

Kandidaatintyön tavoite saavutettiin. Alle 4 Pa paineissa tapauksella 10T saavutetaan pienimmät paineet. Noin 3–5 Pa paineissa kannattaa käyttää sekä tyhjiökammioita että perliittiä. Sopiva tapaus on esimerkiksi tapaus TTPTT, mutta tyhjiökammiot kannattaa sijoittaa peräkkäin perliitin ulkopuolelle. Noin 5–100 Pa paineissa tapaus P eli yksinkertainen perliittieristys toimii parhaiten. Laajan ja kohtuullisesti saavutettavan painealueen sekä yksinkertaisen rakenteen takia tapaus P on yleisesti ottaen paras vaihtoehto seinämärakenteeksi. Suuremmissa paineissa kannattaa hyödyntää lisäksi tyhjiö- tai säteilykammioita, tapauksien PT tai PTT mukaisesti. Yli 100 Pa paineita ei kuitenkaan kannata tavoitella, koska lämpöhäviöt ovat jo lähellä vertailutapausta V.

Suurimmat yksittäiset virhetekijät työssä ovat luultavasti laskenta stationääritilassa ja säteilypintojen emissiviteetin oletus lämpötilariippumattomaksi. Varasto ei oletettavasti saavuta stationääritilaa käytännössä missään tilanteessa, joten lasketut arvot tuskin toteutuvat kovin tarkasti. Emissiviteettien lämpötilariippumattomuus aiheuttaa luultavasti virhettä tyhjiökammioiden eristyskykyyn, mutta tämä on huomioitu eristysratkaisujen valinnassa. Virheistä huolimatta arvot soveltuvat hyvin suuruusluokkien hahmottamiseen ja eri tapauksien keskinäiseen vertailuun, mikä on työn tavoitteen kannalta tärkeintä.

Lopullisen eristysratkaisun valintaa varten täytyy ehdottomasti selvittää taloudellisesti saavutettavissa oleva painetaso. Kun käytettävissä oleva paineen taso on selvitetty, voidaan perustellusti valita käytettävä seinämärakenne ja optimoida seinämäpaksuus sallittujen lämpöhäviöiden mukaan. Tarvittaessa voidaan myös harkita muiden eristemateriaalien tai täyttökaasujen käyttöä, jos lämpöhäviöitä täytyy pienentää mutta seinämäpaksuutta tai painetta ei haluta muuttaa.

## LÄHDELUETTELO

Chieruzzi Manila, Cerritelli Gian F, Miliozzi Adio & Kenny José M. 2013. Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage. *Nanoscale Research Letters*, 2013: 8:448. 9s.

Demharter Matthias. 2011. Heat Transport in Evacuated Perlite Powder Insulations and Its Application in Long-Term Hot Water Storages. Master Thesis. Technische Universität München, Physics Department. Garching. 114s.

Fuchs Benjamin, Hofbeck Klaus & Faulstich Martin. 2012. On Vacuum-Insulated Thermal Storage. *Energy Procedia*, 2012: 30. 255-259.

Incropera Frank P & DeWitt David P. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5th edition. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. 981s. ISBN 0-471-38650-2.

Kwon Jae-Sung, Jang Choong Hyo, Jung Haeyong & Song Tae-Ho. 2009. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 2009: 52. 5525-5532.

Winroc-SPI. 2014. Mineral Wool Pipe Insulation [www-tuotedokumentti]. [viitattu 6.4.2017]. Saatavissa: <http://www.spi-co.com/pdf/Mineral-Wool-Pipe-Insulation-Datasheet.pdf>



## LIITE 1. LASKENNASSA KÄYTETYT YHTÄLÖRYHMÄT

Tapaus V

$$q = \frac{T_i - T_4}{R_{1-4}}$$

$$q = \frac{T_4 - T_o}{R_{5,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot \varepsilon_{rt} \cdot (T_4^4 - T_o^4)$$

Tapaus P

$$q = \frac{T_i - T_4}{R_{1-4}}$$

$$q = \frac{T_4 - T_o}{R_{5,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot \varepsilon_{rt} \cdot (T_4^4 - T_o^4)$$

Tapaus TP

$$q = \frac{T_i - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{al}} + \frac{1 - \varepsilon_{al}}{\varepsilon_{al}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{T_3 - T_6}{R_{4-6}}$$

$$q = \frac{T_6 - T_o}{R_{7,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_6 H \cdot \varepsilon_{rt} \cdot (T_6^4 - T_o^4)$$

### Tapaus TTP

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_3 H \cdot (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_3}{r_4} \right)} + \frac{T_3 - T_4}{R_{4,g}}$$

$$q = \frac{T_4 - T_7}{R_{5-7}}$$

$$q = \frac{T_7 - T_0}{R_{8,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_7^4 - T_0^4)$$

### Tapaus PT

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_{1-4}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot (T_4^4 - T_5^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_4}{r_5} \right)} + \frac{T_4 - T_5}{R_{5,g}}$$

$$q = \frac{T_5 - T_6}{R_6}$$

$$q = \frac{T_6 - T_0}{R_{7,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_6 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_6^4 - T_0^4)$$

Tapaus PTT

$$q = \frac{T_i - T_4}{R_{1-4}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot (T_4^4 - T_5^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_4}{r_5} \right)} + \frac{T_4 - T_5}{R_{5,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_5 H \cdot (T_5^4 - T_6^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_5}{r_6} \right)} + \frac{T_5 - T_6}{R_{6,g}}$$

$$q = \frac{T_6 - T_7}{R_7}$$

$$q = \frac{T_7 - T_o}{R_{8,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_7^4 - T_o^4)$$

Tapaus TPT

$$q = \frac{T_i - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{T_3 - T_6}{R_{4-6}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_6 H \cdot (T_6^4 - T_7^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_6}{r_7} \right)} + \frac{T_6 - T_7}{R_{7,g}}$$

$$q = \frac{T_7 - T_8}{R_8}$$

$$q = \frac{T_8 - T_0}{R_{9,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_8 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_8^4 - T_0^4)$$

Тапаву TTPT

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_3 H \cdot (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_3}{r_4} \right)} + \frac{T_3 - T_4}{R_{4,g}}$$

$$q = \frac{T_4 - T_7}{R_{5-7}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot (T_7^4 - T_8^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_7}{r_8} \right)} + \frac{T_7 - T_8}{R_{8,g}}$$

$$q = \frac{T_8 - T_9}{R_9}$$

$$q = \frac{T_9 - T_0}{R_{10,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_9 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_9^4 - T_0^4)$$

Tapaus TPTT

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{T_3 - T_6}{R_{4-6}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_6 H \cdot (T_6^4 - T_7^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_6}{r_7} \right)} + \frac{T_6 - T_7}{R_{7,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot (T_7^4 - T_8^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_7}{r_8} \right)} + \frac{T_7 - T_8}{R_{8,g}}$$

$$q = \frac{T_8 - T_9}{R_9}$$

$$q = \frac{T_9 - T_0}{R_{10,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_9 H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_9^4 - T_0^4)$$

Tapaus TTPTT

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_3 H \cdot (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_3}{r_4} \right)} + \frac{T_3 - T_4}{R_{4,g}}$$

$$q = \frac{T_4 - T_7}{R_{5-7}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot (T_7^4 - T_8^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_7}{r_8} \right)} + \frac{T_7 - T_8}{R_{8,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_8 H \cdot (T_8^4 - T_9^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_8}{r_9} \right)} + \frac{T_8 - T_9}{R_{9,g}}$$

$$q = \frac{T_9 - T_{10}}{R_{10}}$$

$$q = \frac{T_{10} - T_o}{R_{11,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_{10} H \cdot \varepsilon_{\text{it}} \cdot (T_{10}^4 - T_o^4)$$

Tapaus 10T

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_2 H \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} + \frac{T_2 - T_3}{R_{3,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_3 H \cdot (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_3}{r_4} \right)} + \frac{T_3 - T_4}{R_{4,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_4 H \cdot (T_4^4 - T_5^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_4}{r_5} \right)} + \frac{T_4 - T_5}{R_{5,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_5 H \cdot (T_5^4 - T_6^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_5}{r_6} \right)} + \frac{T_5 - T_6}{R_{6,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_6 H \cdot (T_6^4 - T_7^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_6}{r_7} \right)} + \frac{T_6 - T_7}{R_{7,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_7 H \cdot (T_7^4 - T_8^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_7}{r_8} \right)} + \frac{T_7 - T_8}{R_{8,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_8 H \cdot (T_8^4 - T_9^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_8}{r_9} \right)} + \frac{T_8 - T_9}{R_{9,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_9 H \cdot (T_9^4 - T_{10}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_9}{r_{10}} \right)} + \frac{T_9 - T_{10}}{R_{10,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_{10} H \cdot (T_{10}^4 - T_{11}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_{10}}{r_{11}} \right)} + \frac{T_{10} - T_{11}}{R_{11,g}}$$

$$q = \frac{\sigma \cdot 2\pi r_{11} H \cdot (T_{11}^4 - T_{12}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{al}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{al}}}{\varepsilon_{\text{al}}} \left( \frac{r_{11}}{r_{12}} \right)} + \frac{T_{11} - T_{12}}{R_{12,g}}$$

$$q = \frac{T_{12} - T_{13}}{R_{13}}$$

$$q = \frac{T_{13} - T_o}{R_{14,g}} + \sigma \cdot 2\pi r_{13} H \cdot \varepsilon_{\text{rt}} \cdot (T_{13}^4 - T_o^4)$$



## LIITE 2. LASKENNASSA KÄYTETYT AINEOMINAISUUDET, JOTKA OVAT LÄMPÖTILAN FUNKTIOITA

Mineraalivilla (Winroc-SPI 2014)

$T$ [K]	$k$ [W/mK]
269	0,0318
297	0,0345
311	0,0365
366	0,0432
422	0,0504
477	0,0553
533	0,0669
589	0,0792
644	0,0952

Ruostumaton teräs (AISI 304) (Incropera & DeWitt 2002, 907)

$T$ [K]	$k$ [W/mK]
100	9,2
200	12,6
400	16,6
600	19,8
800	22,6
1000	25,4

Ilma (Incropera & DeWitt 2002, 917)

$T$ [K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$k$ [W/mK]	Pr [-]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
250	1,3947	1006	0,00001596	0,0223	0,72	0,0000159
300	1,1614	1007	0,00001846	0,0263	0,707	0,0000225
350	0,995	1009	0,00002082	0,03	0,7	0,0000299
400	0,8711	1014	0,00002301	0,0338	0,69	0,0000383
450	0,774	1021	0,00002507	0,0373	0,686	0,0000472
500	0,6964	1030	0,00002701	0,0407	0,684	0,0000567
550	0,6329	1040	0,00002884	0,0439	0,683	0,0000667

600	0,5804	1051	0,00003058	0,0469	0,685	0,0000769
650	0,5356	1063	0,00003225	0,0497	0,69	0,0000873
700	0,4975	1075	0,00003388	0,0524	0,695	0,000098
750	0,4643	1087	0,00003546	0,0549	0,702	0,000109
800	0,4354	1099	0,00003698	0,0573	0,709	0,00012
850	0,4097	1110	0,00003843	0,0596	0,716	0,000131
900	0,3868	1121	0,00003981	0,062	0,72	0,000143
950	0,3666	1131	0,00004113	0,0643	0,723	0,000155
1000	0,3482	1141	0,00004244	0,0667	0,726	0,000168

### LIITE 3. PERLIITIN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Perliitin efektiivinen lämmönjohtavuus  $k_{p,eff}$  [W/mK] (Demharter 2011, 103). Yhtälöiden sijoituksissa on käytettävä ilmoitettuja yksiköitä.

$$k_{p,eff} = k_{säteily} + k_{kiinteä} + k_{kaasu} + k_{liitos}$$

Lämmönjohtavuuden säteilytekijä  $k_{säteily}$  [W/mK] (Demharter 2011, 103-104).

$$k_{säteily} = \frac{16\sigma T_{rad}^3}{3\rho \cdot (5,32 \cdot 10^{-4} \cdot T_{rad}^2 - 0,4503 \cdot T_{rad} + 130,31)}$$

missä  $T_{rad}$  säteilylämpötila [K]

$\rho$  tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Säteilylämpötila  $T_{rad}$  [K] (Demharter 2011, 103).

$$T_{rad} = \sqrt[3]{0,25 \cdot (T_i^2 + T_o^2) \cdot (T_i + T_o)}$$

missä  $T_i$  lämpötila sisäpinnalla [K]

$T_o$  lämpötila ulkopinnalla [K]

Kiinteän aineen lämmönjohtavuus  $k_{kiinteä}$  [W/mK] (Demharter 2011, 104).

$$k_{kiinteä} = (0,0709 \cdot \rho - 1,4499) \cdot 10^{-3}$$

$\rho$  tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Kaasun lämmönjohtavuus ilmalle  $k_{\text{kaasu}}$  [W/mK] (Demharter 2011, 104-105).

$$k_{\text{kaasu}} = \frac{(24,17 + 0,075 \cdot T - 2,88 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \cdot 10^{-3}}{1 + 1,38/p}$$

missä  $T$  keskilämpötila [°C]

$p$  paine [mbar]

Lämmönjohtavuuden liitostekijä ilmalle  $k_{\text{liitos}}$  [W/mK] (Demharter 2011, 104-105).

$$k_{\text{liitos}} = \frac{0,54 \cdot (24,17 + 0,075 \cdot T - 2,88 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \cdot 10^{-3}}{1 + 38,6/p}$$

missä  $T$  keskilämpötila [°C]

$p$  paine [mbar]