

Julia Virtanen

# Prosessiventtiilin lämmityslaitteiston kehittäminen testaustoimintaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Insinöörityö  
13.5.2013

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Julia Virtanen Prosessiventtiilin lämmityslaitteiston kehittäminen testaustoimintaan 47 sivua 13.5.2013
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Markku Laukka Teknologian testauspäälikkö Juha Perttilä
<p>Insinööryön tarkoituksena on tutkia Metso Automation Oy:n prosessiventtiilien testaukseen erilaisia lämmitysjärjestelmäratkaisuja nykyisen lämmitysmenetelmän korvaajaksi. Testauksen aikana on saavutettava korkeita lämpötiloja. Yleisin korkealämpötilatestaus suoritetaan lämpötilalla 400 °C. Olisi toivottavaa, että lämmityslaitteisto simuloisi nykyistä menetelmää paremmin Metson venttiilituotteiden käyttöolosuhteita todellisissa teollisuusprosesseissa. Lisäksi lämmityslaitteiston on sovellettava erikokoisille ja -muotoisille venttiileille sekä erilaisiin testausympäristöihin.</p> <p>Tutkimuksessa pyrittiin ottamaan huomioon eri tuotetyyppien ominaisuuksia, muun muassa venttiilien materiaaliominaisuudet, koot ja lämmönkestävyydet. Lähemmin tarkasteltiin kuitenkin ainoastaan hyvin usein testattavaa Neles XG/XM 6"-venttiiliä. Tutkimuksen lähtökohtana on venttiilin emissiotestaus, joka suoritetaan ISO 15848-1 -standardin ja toimeksiantajan mukaisilla vaatimuksilla.</p> <p>Työn alussa tarkasteltiin Metson nykyistä lämmitysmenetelmää, joka perustuu lämmitysmattojen ja erillisen ohjausyksikön käyttöön, ja analysoitiin sen ongelmakohtat sekä mahdolliset ongelmien syyt. Tämän jälkeen kirjallisuuden perusteella tutkittiin erilaisia lämmitysvaihtoehtoja ja niiden sovellettavuutta venttiilien emissiotestauksitarkoituksiin. Käytiin muun muassa läpi termisen öljyn ja muiden nestekylpymenetelmien käyttö, liekkilämmitys, paineistettu höyry ja mahdollisia suora- ja epäsuorasähkölämmitysmenetelmiä.</p> <p>Kirjallisuustutkimuksen perusteella valittiin jatkotarkasteluun neljä menetelmää, joiden nähtiin parhaiten soveltuvan venttiilin lämmittämiseen emissiotestausta varten. Valitut menetelmät ovat infrapunasäteilyelementeistä koostuva uunijärjestelmä, induktiolämmitys, venttiilin lämmittäminen paineistetulla heliumilla ja venttiilin testilappoihin asennettavien kuumennuspatruunoiden käyttö. Valittujen menetelmien tehoa arvioitiin karkeasti Neles XG/XM 6" venttiilin lämmittämiseen.</p> <p>Valituille menetelmille tehtiin myös kustannusarvioinnit pohjautuen valmistajille tehtyihin kyselyihin. Lisäksi menetelmien tarkastelussa otettiin huomioon turvallisuusriskejä ja laitteiston hankintaan liittyviä ongelmia. Työssä tarkasteltiin myös pintapuolisesti vaihtoehtoisia eristysratkaisuja nykyisen alumiinisilikaattikuituvillan korvaajaksi.</p> <p>Menetelmien yleisen soveltavuuden, tehokkuuden ja kustannusarvioinnin perusteella yritykselle tehtiin suosituksia mahdollisista jatkotoimenpiteistä. Jos yritys on valmis tekemään ainoastaan pientä investointia, lämmityspatruunoita voitaisiin testata hankkimalla jollekin pienelle venttiilille tarvittava. Jos yritys pystyisi tekemään suuremman investoinnin, voisi olla kannattavaa tarkastella induktiolämmitysmenetelmää tarkemmin ja järjestää jonkin laitteistotoimittajan kanssa järjestelmän testausta.</p>	
Avainsanat	emissiotestaus, prosessiventtiilit, lämmitysprosessit, lämmitysmenetelmät, induktio, IR, infrapunalämmitys, kuumennuspatruunat

Author Title	Julia Virtanen Development of a Heating System for Process Valve Testing
Number of Pages Date	47 pages 13 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Juha Perttilä, Testing Technology Manager Markku Laukka, Principal Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis is to research various heating system solutions for valve testing in order to upgrade or replace the current heating method of Metso Automation. Some testing procedures require high temperatures. The most common high temperature testing procedure is carried out at a temperature of 400 ° C. The new heating system could possibly simulate the operating conditions Metso valves in industrial processes better than the current method. In addition, the heating system must be suitable for valves of various sizes and shapes, as well as a wide range of different testing conditions.</p> <p>The study analyzes different types of valve features, such as material properties, e.g. heat resistances, as well as different valve types and sizes. In this thesis the frequently tested Neles XG / XM 6 "- valve is used as a reference valve. The starting point for this research is valve fugitive emission testing, which is carried out in accordance with the ISO 15848-1 standard as well as Metso's own requirements.</p> <p>Firstly Metso's current heating method was investigated and its problem areas and possible problem causes were analyzed. The current method is based on heat conduction through heating mats, connected to a separate control unit. After that a variety of heating options and their applicability to valve fugitive emission testing was studied through relevant literature. In this thesis e.g. thermal oil and other liquid bath methods, flame heating, pressurized steam heating, as well as potential direct and indirect electric heating were considered.</p> <p>As a result of the literature study four heating methods, which were considered the most appropriate for valve emission testing, were selected for further research. The selected methods include an oven system, which consists of infrared radiation elements; induction heating; heating with pressurized helium as well as heating with cartridge heaters, installed into the testing flanges. The efficiencies of the selected methods were roughly estimated by calculating the heat flux rate for the Neles XG / XM 6 "valve.</p> <p>In order to compare the heating methods, cost estimates based on the manufacturer inquiries, were carried out. In addition, security risks and difficulties, connected with equipment purchase, were taken into account. This thesis also briefly covers alternative insulation solutions to replace the current aluminosilicate wool.</p> <p>Considering the applicability, effectiveness and cost-evaluation of the different methods, recommendations for further action were made to the company. In case the company is only willing to make a small investment, it is recommended to acquire heating cartridges for testing one of the smallest valves. However, if the company is able to make a larger investment, it might be worth to study induction heating and arrange system testing with an equipment supplier.</p>	
Keywords	Emission testing, process valves, heating systems, heating methods, induction, IR, infrared heating, cartridge heaters

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Vaatimukset	2
2.1	Emissiotestausjärjestelmä	2
2.2	ISO-standardista johtuvat vaatimukset lämmityslaitteistolle	2
2.3	Toimeksiantajan vaatimukset	3
3	Lähtötilanne	6
4	Lämmönsiirron teoriaa	7
4.1	Lämmönsiirto, sen mekanismit ja työllä muodostettu lämpö	7
4.2	Lämmönsiirron sovellukset	8
5	Valittujen menetelmien tarkastelu	11
5.1	Tarkasteltavan venttiilin valinta ja käytettävät parametrit	11
5.2	IR-säteilyelementit	13
5.2.1	Teoria	13
5.2.2	Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli	16
5.2.3	Laskentatulokset	21
5.3	Induktio	24
5.3.1	Teoria	24
5.3.2	Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli	26
5.3.3	Laskentatulokset	27
5.4	Helium	28
5.4.1	Teoria	28
5.4.2	Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli	31
5.4.3	Laskentatulokset	32
5.5	Nykyisen menetelmän parantaminen	35
6	Vaihtoehtoiset eristysratkaisut	37
7	Tarkasteltavien menetelmien ja nykyisen menetelmän parantamisen kustannusarviot	40
8	Suosituksien ja päätelmät	42
	Lähteet	46

## 1 Johdanto

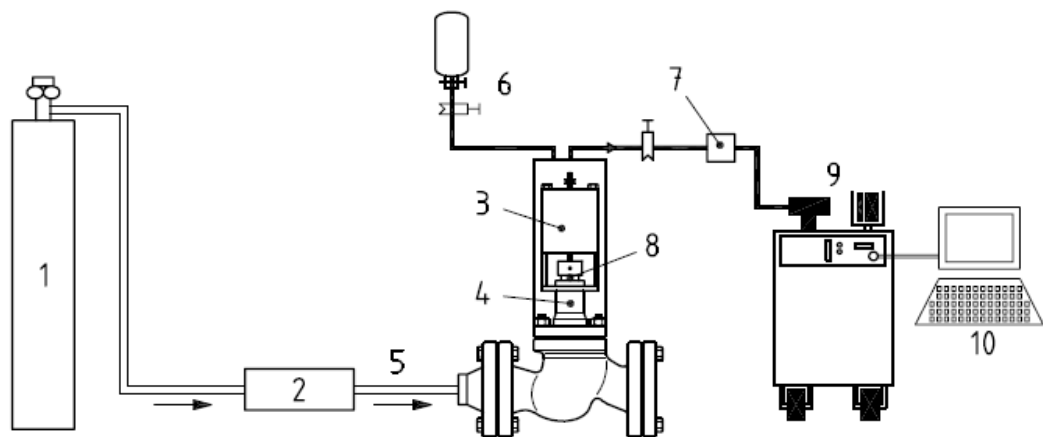
Metso Automation Oy:n Neles & Mapag -tuotelinjan teknologian testauksessa tarvitaan testaustarkoituksiin uusi venttiilin lämmityslaitteisto, joka vastaisi nykyistä laitteistoa paremmin Metson tuottamien venttiilien käyttöolosuhteita todellisissa teollisuusprosesseissa. Teollisissa prosesseissa venttiili kytketään putkistoon, jonka läpi virtaa nestettä tai kaasua, joka voi joissakin prosesseissa olla korkeassa lämpötilassa. Näin ollen venttiilejä on testattava korkeassa lämpötilassa ja tietyille venttiileille tehdään ISO 15848-1 -standardin mukainen tyyppitesti. Lämmityslaitteistoa tarvitaan mm. kyseisen standardin mukaisessa emissiotestauksessa, mihin tämä työ perustuu, mutta lämmityslaitteistoa on myös pystyttävä käyttämään muihin testausjärjestelyihin.

Insinööriyön tarkoituksena on tutkia erityyppisiä lämmitysvaihtoehtoja prosessiventtiilin testaustoimintaan. Uusien laitteistojen lisäksi työssä tarkastellaan myös toimenpiteitä, joilla nykyistä menetelmää voidaan parantaa. Nykyisessä menetelmässä on havaittu ongelmia korkeisiin käyttöolosuhteita vastaaviin lämpötiloihin pääsemiseksi. Työssä käsitellään erilaisia lämmitysmenetelmiä huomioon ottaen lämmityksen ohjaus, järjestelmän eristys sekä lämmön siirtyminen ja jakautuminen venttiilissä. Lisäksi työssä tehdään karkea kustannusarviointi erilaisille laitteistolle eri valmistajien hintojen perusteella. Tutkimuksen pohjalta pyritään suosittelemaan Metsolle jatkotoimenpiteitä testausta varten suoritettavan lämmityksen parantamiseksi.

## 2 Vaatimukset

### 2.1 Emissiotestausjärjestelmä

ISO 15848-1 -standardin mukaan emissiotestaus voidaan suorittaa kolmella eri menetelmällä: vakuuminenelmällä, jossa testikaasuna on käytettävä heliumia; huuhtelumenetelmällä, jossa testikaasuna voidaan käyttää heliumia tai metaania; imumenetelmällä, jossa myös voidaan käyttää jompaakumpaa kaasua [1]. Metson venttiilien testaus perustuu vakuuminenelmään, jonka testausjärjestelmä on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1. ISO-15848 -standardin mukainen emissiotestausjärjestelmä [1, s. 20].

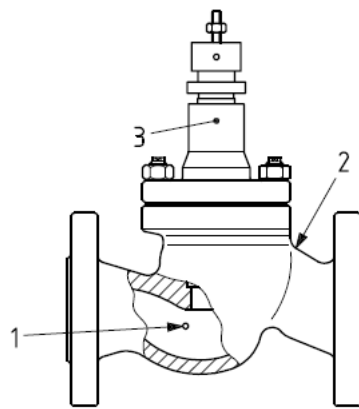
Kuviosta nähdään, että helium virtaa säiliöstä (1) paineohjausyksikköön (2), josta se virtaa venttiiliin. Kuviossa nähdään myös akselin tiiviste (poksi) (8) sekä se, että toimilaitteen (3) ympäri on kierretty vakuumikammio. Akselin tiivisteiden läpi vuotanut helium johdetaan helium-massaspektrometrille (9), jonka tulokset pystytään näkemään tiedon käsittelylaitteistolla (10). Standardivuodontestaus pystytään toteuttamaan säiliön (6) avulla, josta helium johdetaan massaspektrometrille, sen kalibroimiseksi. [1, s. 20.]

### 2.2 ISO-standardista johtuvat vaatimukset lämmityslaitteistolle

Lämmityslaitteiston suunnittelussa on huomioitava, että testauksen aikana venttiiliin pesän on oltava kuiva sekä puhdas öljystä, pölystä ja voiteluaineista. Testauskaasuna on käytettävä 97-%:sta puhdasta heliumia ja samaa kaasua on käytettävä koko testin aikana. [1, s. 4.] Vuotoa mitatessa venttiiliin on oltava pysäytettynä ”osittain auki”-asentoon [1, s. 6]. Testipainetta on ylläpidettävä  $\pm 5$  % vaihteluvälin sisällä venttiiliin

nimellispaineesta. Kun testilämpötila on asettunut valitulle lämpötila-arvolle, lämpötila ei saa vaihdella enemmän kuin 5 % ja korkeintaan 15 °C eikä venttiiliä saa ajaa lämpötilan muuttuessa. Aikaa, painetta, lämpötilaa, vuotoa ja venttiilin syklin kestoa on mitattava ja kirjattava. Sykliä minimimäärä on 20 000 [1, s. 7] ja testin kesto on pitkä, joten lämpötilan ylläpitäminen testin aikana on huomioitava. Lisäksi pitää ottaa huomioon, että toimilaitteen on oltava lämmitysjärjestelmän ulkopuolella ja pysyttävä mahdollisimman viileänä.

Standardi määrittelee myös ne kohdat venttiilissä, joissa lämpötila on mitattava. Nämä on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. ISO-15848 -standardin mukaiset lämmönmittauksen kohdat venttiilissä. Kuvassa (1) venttiilin pesä, (2) venttiilin runko, (3) akselin tiiviste (stuffing box) [1, s. 5].

### 2.3 Toimeksiantajan vaatimukset

Vaikkakin standardissa määritellään korkeimmaksi testilämpötilaksi 400 °C, toimeksiantaja toivoo, että testauksen aikana päästään tarvittaessa 600 °C:seen. Suurin osa korkealämpötesteistä suoritetaan kuitenkin 400 °C:n lämpötilassa. Lämmitysjärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon venttiilin paineluokka, jonka on oltava maksimissaan American Society of Mechanical Engineersin (ASME) määrittämä luokka 1500. ASME paineluokissa jokaista toimintalämpötilaa vastaa määrätty paine. Esimerkiksi 1500 paineluokan venttiilin paine 400 °C:ssa on 251,2 baria. Lisäksi laitteiston suunnitteluun vaikuttavana tekijänä on venttiilin koko ja massa, jotka riippuvat mm. paineluokasta. Tässä työssä käsiteltävien venttiilien maksimi paino on 1500 kg, maksimi pituus on 1 m ja maksimi ulkohalkaisija on 0,8 m.

Lämmityslaitteiston avulla on lämmitettävä eri venttiilityyppejä, mm. pallo-, läppä-, segmentti-, rotary globe - ja rotary plug - venttiilejä. Jokaisella venttiilityypillä on omat ominaisuudet ja vaatimukset, jotka on työssä otettava huomioon. Venttiilityyppeihin liittyvät ominaisuudet on esitetty taulukoissa 1, 2, 3 ja 4 [27].

Taulukko 1. Palloventtiilien ominaisuudet

Venttiilityyppi	ASME paineluokka	Maksimi lämpötila	Sisähalkaisija	Rungon ja pesän materiaalit
E-sarjan keraaminen palloventtiili	150, 300	375 °C	1" - 8"	ruostumaton teräs AISI 316; sirkonium-keraami
D-sarjan palloventtiili	150, 300, 600	600 °C	2" - 36"	ruostumaton teräs ASTM A 351; hiiliteräs ASTM A 216
M1-sarjan palloventtiili	150, 300	260 °C	1" - 16"	ruostumaton teräs CF8M; ruostumaton teräs AISI 316
M2-sarjan palloventtiili	150, 300	260 °C	1" - 16"	ruostumaton teräs CF8M; ruostumaton teräs AISI 316
X-sarjan palloventtiili (tarkasteltava XG/XM-venttiili kuuluu tähän sarjaan)	150, 300, 600	400 - 600 °C	1" - 16"	ruostumaton teräs CF8M tai hiiliteräs WCB; ruostumaton teräs AISI 316
T5-sarjan rotary säätöventtiili	300, 600	450 °C	2" - 16"	hiiliteräs CF8M; kobolttipohjainen kova päällyskerros
XU-sarjan palloventtiili	600	600 °C	1" - 4"	ruostumaton teräs ASTM A 351

Taulukko 2. Läppäventtiilien ominaisuudet

Venttiilityyppi	ASME paineluokka	Maksimi lämpötila	Sisähalkaisija	Rungon ja pesän materiaalit
L9B/L90B-sarjan läppäventtiili	150	250 °C	8" - 56"	teräs ja ruostumaton teräs
L1/L2-sarjan läppäventtiili	150, 300	600 °C	16" - 48"	hiiliteräs ASTM A 216, ruostumaton teräs ASTM A 351
L6-sarjan läppäventtiili	150, 300, 600	600 °C	4" - 28"	hiiliteräs ASTM A 216; ruostumaton teräs ASTM A 351
LW & LG - sarjan läppäventtiili	150, 300	600 °C	3" - 16"	hiiliteräs ASTM A 216; ruostumaton teräs ASTM A 351
L12-sarjan läppäventtiili	150	600 °C	3" - 56"	ruostumaton teräs

Taulukko 3. Segmenttiventtiilien ominaisuudet.

Venttiilityyppi	ASME paineluokka	Maksimi lämpötila	Sisähalkaisija	Rungon ja pesän Materiaalit
RA-sarjan V-aukko segmenttiventtiili	300	260 °C	1" - 10"	ruostumaton teräs ASTM A 351; AISI 329
R-sarjan V-aukko segmenttiventtiili	150, 300	260 °C	2" - 16"	ruostumaton teräs ASTM A 351; AISI 329; titaani ASTM B 367
RE-sarjan V-aukko segmenttiventtiili	150, 300	260 °C	1" - 28"	hiiliteräs ASTM A 216; ruostumaton teräs ASTM A 351
R-sarjan segmenttiventtiili, RE-laipat, RE1-kiekko	150, 300	260 °C	1" - 28"	hiiliteräs ASTM A 216; ruostumaton teräs ASTM A 351
RE2-sarjan V-aukko segmenttiventtiili	ei luokiteltu	260 °C	1" - 4"	ruostumaton teräs ASTM A 351; AISI 329

Taulukko 4. Muiden venttiilien ominaisuudet.

Venttiilityyppi	ASME paineluokka	Maksimi lämpötila	Sisähalkaisija	Rungon ja pesän materiaalit
Rotary Globe ZX - sarjan säätöventtiili	150, 300, 600, 900, 1500	425 °C	0,5" - 4"	ruostumaton teräs CF8M; hiiliteräs WCC
Rotary Plug FC - ja FG - sarjan säätöventtiili	150, 300, 600	425 °C	1" - 10"	ruostumaton teräs CF8M; hiiliteräs WCC

### 3 Lähtötilanne

Tällä hetkellä Metso käyttää lämmitysjärjestelmänä Heatmastersin valmistamaa lämpökäsittely-yksikköä ja lämmityselementtejä. Lämpökäsittely-yksikkö on tyyppiä HM403T-R26 vastaava, mutta vanhempi malli. Lämpökäsittely-yksikössä on 3 kanavaa. Laitteeseen voidaan kytkeä 12 vakiokokoista lämmityselementtiä, 4 elementtiä kullekin kanavalle. Kullakin kanavalla maksimiteho on 3,45 kW (kokonaisteho 41,4 kW). Lämpökäsittely-yksikkö on kuitenkin täysin manuaalinen, ja sitä ei pystytä ohjelmoimaan. Laitteistolle on olemassa erillinen ohjelmoitava ohjausyksikkö, mutta se on hankittava erikseen.

Lämmityselementteinä käytetään lämmitysmattoja, jotka kierretään venttiililaippojen ympäri ja joiden avulla lämpö siirretään venttiiliin. Metsolla on käytössä kolme lämmitysmattoa. Kutakin mattoa käytetään omalla lämpökäsittely-yksikön kanavalla, eli kunkin teho on alle 3,45 kW. Lämmitysmaton sisällä on vastus, joka on valmistettu nikkelin ja kromin seoksesta. Loppupään johtimet on valmistettu nikkelistä, joka ei lämpene testin aikana. Johtimet on ympäröity alumiinioksidisilla keraamisilla listoilla, joilla on hyvä lämmönjohtavuus.

Ongelmana on laitteiston epätarkkuus ja venttiilipesän hidas lämpeneminen. Nyky menetelmällä XG/XM 6" -venttiiliin lämmittämiseen 400 °C:seen kuluu monta tuntia. Lisäksi ohjelmoitu ja todellinen lämpötila eivät yleensä täsmää (esim. jos ohjelmoidaan lämpötilaksi 600 °C, saadaan 400 °C), joten joko nykyistä menetelmää on parannettava tai on keksittävä parempi lämmitysratkaisu. Työssä ei lähemmin käsitellä lämpökäsittely-yksikön ohjelmointia.

## 4 Lämmönsiirron teoriaa

### 4.1 Lämmönsiirto, sen mekanismit ja työllä muodostettu lämpö

Lämmönsiirto on tieteenala, joka käsittelee lämpöenergian siirtymistä kahden systeemin välillä, huomioiden lämmönsiirron nopeuden. Tämä tapahtuu systeemien lämpötilaerojen avulla. [2, s. 2.] Lämmönsiirto perustuu termodynamiikan pääsääntöihin: ensimmäiseen sääntöön, joka määrää energian säilymisen, ja toiseen sääntöön, joka määrää, että lämpövirta kulkee aina lämpimämmästä systeemistä viileämpään [3, s. 4]. Lämmönsiirto voi tapahtua kolmella mekanismilla: konduktiolla, konvektiolla tai lämpösäteilyllä [3, s. 5].

Konduktio, eli johtuminen, tarkoittaa lämmön siirtymistä aineen sisällä tai johtumalla kappaleesta toiseen, mikäli kappaleet ovat kosketuksissa toisiinsa. Lämmönsiirron tehokkuus riippuu useista tekijöistä, mm. materiaalien termisistä ominaisuuksista ja kosketuksessa olevien materiaalien lämpötilaerosta, kosketuspinta-alasta, kosketuspaineesta ja rajapinnassa olevan kaasun, nesteen tai kiinteän kalvon luonteesta. [2, s. 17 - 18]

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä lämpenevään aineeseen siihen kosketuksessa olevasta virtaavasta fluidista, eli nesteestä tai kaasusta. Virtaava kuuma tai kylmä neste tai kaasu toimii tällöin lämmön kantajana. Mitä suurempi fluidin virta on, sitä suurempi lämmönsiirtoteho on. [2, s. 25.] Teollisuudessa käytetään yleensä pakotettua konvektiota, jossa kaasu tai neste on suunnattu puhaltimen tai pumpun avulla kohti lämmitettävää materiaalia. Lisäksi on olemassa luonnollinen konvektio, joka perustuu kaasun tai nesteen tiheyseroon eri lämpötiloissa. [2, s. 26.]

Säteily on energiaa, jonka materiaali emittoi elektromagneettisena säteilynä atomin tai molekyylin siirtyessä energiatilalta toiselle. Säteily ei tarvitse väliainetta energian siirtymiseen, eikä säteilyssä tapahdu häviöitä matkalla, jos kappaleiden välissä on tyhjiö. [2, s. 27.] Lämmönsiirrossa säteilyllä tarkoitetaan yleensä lämpösäteilyä, joka johtuu kappaleiden lämpötilasta. Lämpösäteily tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla 0,1 - 100  $\mu\text{m}$  (infrapuna-, näkyvä ja uv-alueilla) [2, s. 685].

Kun konduktion ja konvektion lämpövuot ovat likimääräisesti lineaarisesti riippuvaisia kappaleiden lämpötilaeroon nähden, lämpösäteilyssä lämpövuoto on likimääräisesti riippuvainen lämpötilan neljänteen potenssiin. Esimerkiksi säteilylämmön

lämmönsiirrossa lähteen lämpötilan kaksinkertaistaminen korottaa säteilyenergian tiheyden tekijällä 16. Näin ollen, lämpösäteilystä tulee hallitseva mekanismi lämmönsiirrossa suhteessa konvektioon ja konduktioon korkealämpöisissä sovellutuksissa kuten palamisessa ja ydinreaktioissa. [4, s. 574.]

Energian vuorovaikutus on lämmönsiirtoa, jos liikkeellepaneva voima on lämpötilaero, muuten vuorovaikutus on työtä [2, s. 9]. Työllä lämmittäviä menetelmiä ovat mm. mikroaaltoihin, magneettiseen induktioon ja lämmitettävän kappaleen vastukseen perustuvat.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan teollisuudessa tyypillisesti käytettäviä lämmönsiirtoon ja työhön perustuvia sovelluksia. Nämä on usein teollisuuden prosessien sovelluksissa jaoteltu alueisiin, joissa usein yhdistyy lämmönsiirron mekanismeja ja mahdollisesti lämpöä muodostava työ.

#### 4.2 Lämmönsiirron sovellukset

Tyypillisiä teollisuuden lämmönsiirtosovelluksia, joilla päästään korkeisiin lämpötiloihin (yli 250 °C), ovat terminen öljy, liekkilämmitys, paineistettu höyry, epäsuora sähkölämmitys ja suora sähkölämmitys [5]. Näitä menetelmiä on joissakin tapauksissa mm. taloudellisista syistä järkevä yhdistää, esim. paperikuivauksessa yhdistetään sähköinen infrapunateknologia ja polttoaineella toimiva kuivatin [6].

Terminen öljy voidaan sulkea pois, koska sillä ei päästä tarpeeksi korkeisiin lämpötiloihin [7]. Nestekylpylämmittäminen ei yleisestikään sovellu työn tarkoitukseen, koska tarpeeksi korkeaan lämpötilaan ei päästä käytännössä millään teollisuudessa käytettävällä nesteellä paitsi suolasulalla tai metallisulalla. Sitä paitsi lämpöantureiden kiinnittäminen ISO-standardin mukaisiin kohtiin olisi hankalaa.

Lämpömenetelmillä, jotka perustuvat liekkilämmitykseen eli polttoaineen käyttöön, lämpö tuotetaan polttamalla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Lämmönsiirto voi olla suoraa, eli savukaasut ovat kosketuksissa materiaaliin, tai epäsuoraa, jolloin savukaasut on erotettu materiaalista ja työkappaleen lämmittäminen tapahtuu esimerkiksi säteilypaneelin, poltinputken tai muhveliuunin avulla [6, s. 8]. Suoraa liekkilämmitystä käytettäessä lämmön siirtäminen puhtaasti testikappaleeseen on haasteellista ja tasaisen lämmön ylläpitäminen on vaikeaa. Yleisesti liekkilämmitystä

koskevia ongelmia ovat mm. savukaasujen puhdistus ja polttoaineen varastointi. Tällaisen järjestelmän rakentaminen voisi olla investoinnin kannalta melko epätaloudellista, ja voidaan täten sulkea pois lähemmältä tarkastelulta.

Järjestelmissä, joissa lämpö tuodaan materiaaliin vesihöyryn avulla, lämmönsiirto voi olla suoraa, jolloin höyry ruiskutetaan kaasuun tai nesteeseen, joka lämmittää työkappaleen. Jos käytetään epäsuoraa lämmönsiirtoa, käytössä on lämmönvaihdin, jonka avulla höyry jäähdytetään ja kondensoidaan putkiin ja lämmitetty putki siirtää lämpöä nesteeseen tai kaasuun, joka lämmittää työkappaleen [8]. Höyryjärjestelmän pääongelmina ovat riittävän lämpötilan saavuttaminen, suuret kustannukset sekä turvallisuus.

Paineistetun höyryn käyttö, eli veden kondensaatio putken sisällä voidaan sulkea pois sen takia, että ISO-standardi vaatii venttiilin olevan kuiva. Venttiilin lämmittäminen ulkopuolelta kondenssilämmittämällä vaatii suhteellisen haasteellisen laitteiston, koska testattavat venttiilit ovat erikokoisia, ja näin paineistettua höyryä sisältävän laitteiston toteuttaminen on vaativaa.

Energiaa voidaan tuoda lämmitysprosessiin muun muassa sähkön avulla. Sähköä voidaan hyödyntää lämmitysprosesseissa sekä suorasti että epäsuorasti. Esimerkiksi aiemmin esitetyissä höyry- ja nestekylpyratkaisuissa primäärisen lämmön lähteenä voitaisiin käyttää sähköä. Suorasähköön perustuvat lämmitysmenetelmät ovat työhön eikä lämmönsiirtoon perustuvia menetelmiä. Näissä lämmitysjärjestelmissä materiaalin lämmitys voidaan toteuttaa käyttämällä sähkövirtaa tai magneettikenttää [6, s. 3]. Suorasähköllä materiaalia voidaan lämmittää kolmella eri tavalla: sähkövirta kulkee materiaalin läpi (Joule-lämpö); sähkövirtaa indusoidaan materiaaliin; materiaalin atomeja tai molekyyliä viritetään sähkömagneettisen säteilyn avulla (esim. mikroaallot) [6, s. 3]. Sähkövirran johtaminen materiaalin läpi ei ole teräksiselle venttiilille kannattavaa sen pienen vastuksen ansiosta, koska tällöin virran on oltava kohtuuttoman suuri ja tämä herättää turvallisuuskysymyksiä ainakin työssä tutkittavalla sovellusalueella. Mikroaaltolämmittäminen ei juurikaan sovellu metallien lämmittämiseen, ja perinteiset lämmitysmenetelmät soveltuvat korkean johtavuuden omaaville materiaaleille paremmin [9, s. 1063 - 1064].

Suorasähkömenetelmistä induktiolämmittäminen taas soveltuu metallien kuumentamiseen. Itse asiassa induktiolämmittämisen yleisimmät sovellukset ovat

metallinkäsittelyyn liittyviä laajalla lämpötila-alueella [10, s. 5 - 6], joten induktiolämmittäminen valitaan yhdeksi lähemmin tarkasteltavaksi menetelmäksi.

Epäsuorissa sähkölämmitysmenetelmissä yhtä näistä esitetyistä suorasähkömenetelmistä käytetään lämmittämään lämpöelementtiä, josta lämpö siirtyy konduktion, konvektion, säteilyn tai niiden yhdistelmän kautta lämmitettävään materiaaliin [6, s. 3]. Sovelluksia, jossa epäsuoraa sähkölämmitystä hyödynnetään, ovat mm. konvektioon, IR-säteilyyn tai näiden yhdistelmään perustuva uuni; sähkölämpövastusten asettaminen kontaktiin lämmitettävän materiaalin kanssa; lämmönvaihtimiin perustuvat höyry-, kaasu- tai nesteratkaisut. Muilla ratkaisuilla kuten valokaarilämmityksellä ei ole käytännön sovelluksia tutkittavalla sovellusalueella.

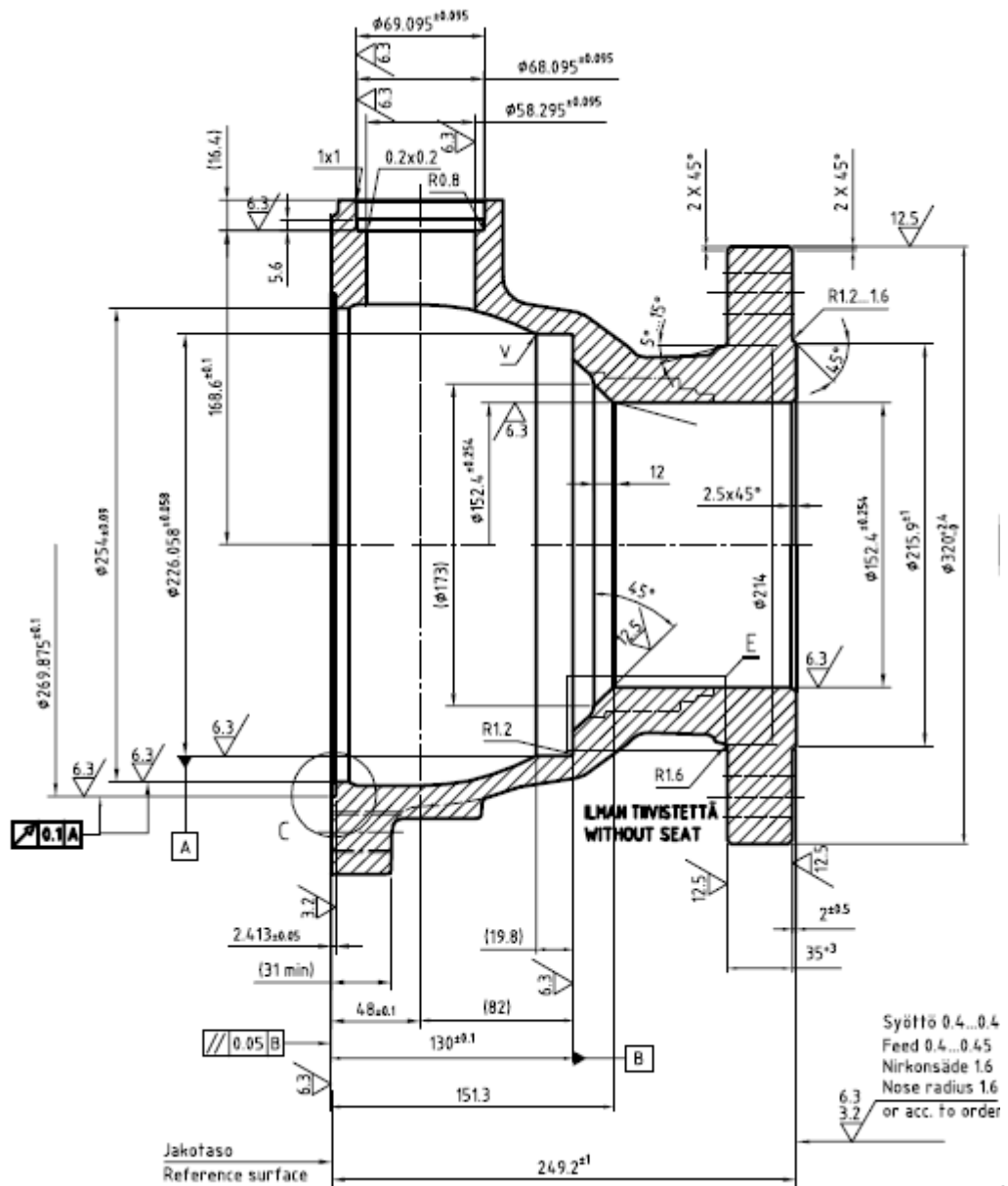
Uuniratkaisuja ovat perinteiset luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon perustuvat uunit, IR-säteilyelementteihin perustuvat ratkaisut sekä näiden yhdistelmät. IR-uunien hyötyjä ovat hyvä lämmönsäätö [6, s. 9] ja kappaleen tehokas lämpeneminen (riippuen tosin kappaleen kyvystä absorboida IR-säteilyä). Näin ollen IR-säteilyelementteihin perustuvaa uunia päätettiin tarkastella tarkemmin.

Koska venttiilin lämpötilaa on ylläpidettävä testin ajan ja koska venttiilin on oltava kuiva testin aikana, päädyttiin tarkastelemaan lähemmin ratkaisua, jossa venttiiliä lämmitettäisiin käyttämällä testikaasua heliumia välittäjä-aineena. Koska liekkiratkaisut on käytännön syistä suljettu pois, lämmitettäisiin heliumia luultavimmin suorasähkömenetelmällä.

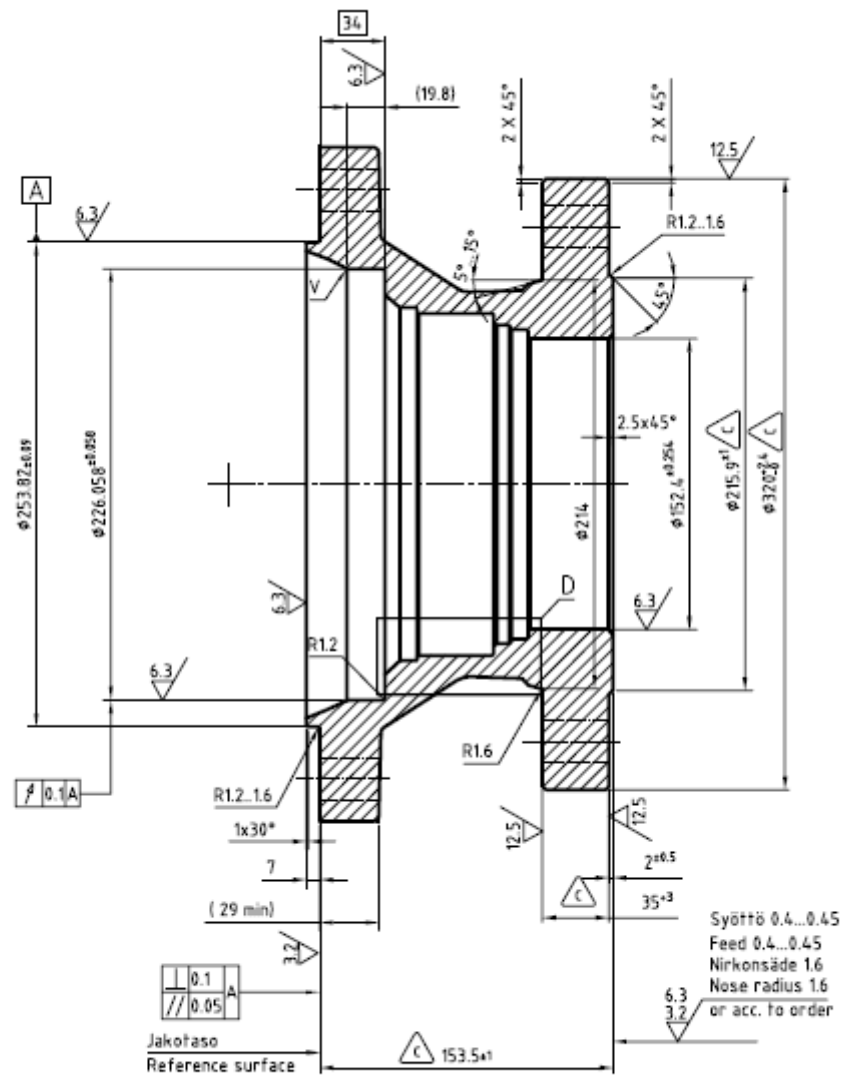
## 5 Valittujen menetelmien tarkastelu

### 5.1 Tarkasteltavan venttiilin valinta ja käytettävät parametrit

Lämmitysjärjestelmän valinta perustuu tarkkuuden, tehokkuuden ja toteutettavuuden maksimoimiseen ja kustannusten minimoimiseen. Tässä työssä tarkastellaan neljää eri menetelmää, joille valitaan realistiset parametrit, huomioiden kuitenkin tehokkuus, lämmön tasainen jakautuminen ja kustannukset. Usein menetelmiä vertaillaessa on tiedossa tavoiteaika, joka pyritään muut muuttujat huomioiden saavuttamaan. Tässä insinööriyössä on kuitenkin päätetty vertailla menetelmiä laskemalla jokaiselle menetelmälle venttiilin lämmitysteho prosessin alussa ja lopussa sekä karkea arvio lämmittämiseen kuluva ajasta, johtuen siitä, että tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita siitä, millaisiin lämmitysaikoihin menetelmillä voidaan parhaimmillaan päästä. Todellisuudessa ajat ovat kuitenkin pitempiä, kun pyritään huomioimaan lämmön tasainen jakaantuminen venttiilissä, jotta materiaalissa ei tapahtuisi muodonmuutoksia. Menetelmien tarkastelua varten on valittu yksi Metson yleisimmin testatuista venttiilityypeistä, joka on kuusituumainen XG/XM-sarjan palloventtiili. Venttiilin runko on valmistettu WCB-hiiliteräksestä ja suljin (pallo) on valmistettu ruostumattomasta teräksestä (AISI 316). Venttiilin lämpötilan on toimeksiantajan ohjeiden mukaisesti nouseva 400 °C:seen emissiotestin suorittamista varten. Kyseisen venttiilin massa on 125 kg ja sen rakenne on esitetty kuvioissa 3 ja 4.



Kuvio 3. Venttiilin poikkileikkaus, osa 1.



Kuvio 4. Venttiilin poikkileikkaus, osa 2.

## 5.2 IR-säteilyelementit

### 5.2.1 Teoria

Sähköinfrapunateknologialla on suuri potentiaali teollisuudessa [11]. Infrapunateknologiaa käytetään usein tarkkaa lämmönsäätelyä vaativissa prosesseissa. Sitä sovelletaan mm. pintojen lämpökäsittelyssä, kovetuksessa sekä kuivauksessa. [6, s. 9.] Sähköinfrapunälämmitys soveltuu sekä jatkuviin että panosprosesseihin [11]. Infrapunälämmitystä voidaan käyttää irrallisina IR-säteilyelementteinä. Tällöin hyvä puoli on sovellettavuus ennalta määrittelemättömän muotoisten ja kokoisten lämmitettävien kappaleiden kuumentamiseen. Pienen koon ja

helpon asennuksen ansiosta säteilyelementtejä käytetään usein parantamaan lämmityksen tehoa perinteisiin menetelmiin, konvektioon ja konduktioon, nähden [11]. Kun infrapunalämmityksen ominaisuudet on ymmärretty ja teknologiaa on sovellettu oikein, se tarjoaa teollisuudelle paljon etuja prosessien lämmityksessä [11]. Double R Controls -infrapunalaitteiden valmistaja kiteyttää internetsivullaan säteilylämmön edut konduktioon ja konvektioon verrattuna [11]:

- Kontakti lämmitettävän materiaalin kanssa ei ole tarpeellinen.
- Voidaan käyttää suuria lämmitystehoja.
- Lämmitysaika on paljon lyhyempi.
- Järjestelmät reagoivat yleensä nopeasti.

Sähkömagneettisen säteilyn kohdattaessa materiaalia, voi tapahtua kolme eri prosessia: heijastuminen, läpikulku ja absorptio. Ainoastaan absorptio tuottaa lämpöä. Murto-osa säteilyvuosta, joka absorboituu materiaaliin, on materiaalin absorptiokerroin  $\alpha$ . Absorptiokerroin riippuu materiaalin lisäksi säteilyn sisääntulosuunnasta sekä aallonpituudesta. Kappaleen pinnan säteilemä energia suhteessa kappaleen lämpöön riippuu materiaalin emissiivisyydestä  $\epsilon$ , joka voidaan määrittää kappaleen emittoiman säteilymäärän ja täysin mustan kappaleen, joka on samassa lämpötilassa, emittoiman säteilymäärän suhteena. Emissiivisyys riippuu materiaalin lisäksi säteilyn ulostulosuunnasta sekä emittoituvasta aallonpituudesta. Musta kappale määritetään täydellisenä emittoijana ja absorboijana. Musta kappale absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn, ja mikään muu kappale ei voi lämpötilaansa nähden emittoida enemmän säteilyä kuin musta kappale. Lisäksi musta kappale on sekä diffuusi emittoija ( $\epsilon_{\theta}(T) = \text{vakio}$ ) että absorboija, eli se absorboi ja emittoi säteilyä yhtä paljon riippumatta säteilyn tulosuunnasta. Todellisuudessa materiaalin emissiivisyys on aina pienempi kuin yksi. Tällaisia materiaaleja tarkastellaan usein harmaina kappaleina. Harmaa kappale tarkoittaa kappaletta, jolla aallonpituudesta riippumatta on vakio emissiivisyys tietyllä lämpötilalla ja ulostulosuunnalla. [2, s. 687 - 707]

Kirchhoffin sääntö määrittää, että emissiivisyys tietyssä kappaleessa on yhtä suuri kuin absorptio, jos säteilynlähteenä toimiva kappale on saman lämpöinen kuin kappale, johon säteily absorboituu. Tällöin säteilyn suunnan  $\theta$  ja aallonpituuden  $\lambda$  on myös oltava samat. [2, s. 707]

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(T) = \alpha_{\lambda,\theta}(T) \quad (1)$$

Eri materiaalit absorboivat infrapunasäteilyä eri mekanismein. Useimmat epämetalliset materiaalit absorboivat infrapunasäteilyä, koska niiden molekyylit värähtelevät tietyn infrapuna-aallon taajuudella. Metallit taas absorboivat infrapunasäteilyä sähkömagneettisen energian ja metallien atomien elektronirakenteen vuorovaikutuksen ansiosta. [11.] Infrapunamenetelmän soveltuvuuden tarkastelua varten on tutkittava, absorboiko lämmitettävä materiaali merkittävästi infrapunasäteilyä ja mikä IR-säteilylähde soveltuu parhaiten materiaalin lämmittämiseen [6, s. 9]. Tätä voidaan tarkastella mittaamalla materiaalin emissiivisyyttä (Kirchhofin säännön mukaan tämä kuvaa myös absorptiota) eri IR-säteilylähteillä [6, s. 9].

Mitä korkeampi säteilylämpötila on, sitä pienempi säteily-spektrin huipun aallonpituus siitä emittoituvalla säteilyllä on ja sitä suurempi on säteilyn energia. IR-säteily jaetaan yleensä aallonpituudeltaan kolmeen tai useampaan eri ryhmään. International Commission on Illumination (CIE) jakaa IR-alueen säteilyn kolmeen alueeseen: IR-A:han (0,78  $\mu\text{m}$  - 1,4  $\mu\text{m}$ ), IR-B:hen (1,4  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$ ) ja IR-C:hen (3  $\mu\text{m}$  - 1000  $\mu\text{m}$ ) [12]. IR-säteilyelementtien valmistajat jakavat usein myös tuotteensa aallonpituusalueisiin.

Mustan kappaleen lämpötilan ja säteily-spektrin huipun aallonpituuden välinen suhde ilmaistaan Wienin siirtymälain avulla, jonka mukaan mustan kappaleen säteilyn spektrin huippua vastaava aallonpituus  $\lambda_{max}$  on kääntäen verrannollinen kappaleen lämpötilaan [2, s. 689]:

$$(\lambda T)_{\max \text{ power}} = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

missä

$T$  on kappaleen lämpötila kelvineinä (K);

$\lambda$  on spektrin huippua vastaava aallonpituus mikrometreinä;

verrannollisuuskerroin 2897,8  $\mu\text{mK}$  (mikrometrikelvin) on luonnonvakio.

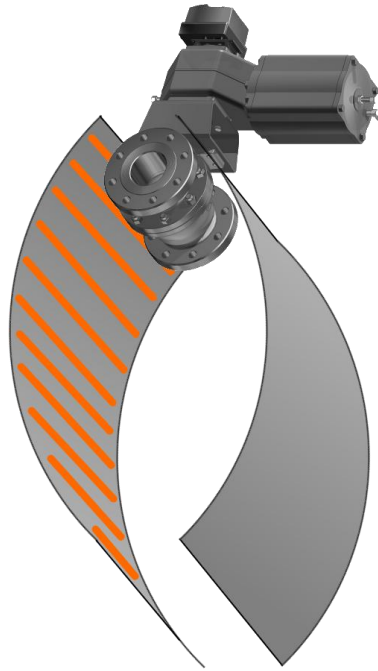
Sähköllä toimivat säteilyelementit koostuvat ainakin lampuista (lasiin kapseloitu hehkulanka) ja heijastimesta. Tyypillisin hehkulankamateriaali on volframilanka, joka on kelattu pinta-alan suurentamista varten. Lampun takana olevan heijastimen tulee olla mahdollisimman hyvin säteilyä heijastava ja hehkulangan emissiivisyyden tulee olla mahdollisimman korkea.

Vaikka teollisuudessa laajasti käytetään pelkkää infrapunasäteilyä lämmitysmenetelmänä, on myös useita prosesseja, joissa sitä voidaan käyttää tehokkaammin yhdistettynä muihin lämmitysmenetelmiin, erityisesti konvektioon (esim. kuuma ilma). Tässä tapauksessa infrapunasäteilyä käytetään osana uunia. Uuni voisi myös sisältää tuulettimen, joka mahdollistaa pakotetun konvektion.

Infrapunalämmityksessä on ongelmana mm. se, että kun säteily absorboituu lämmitettävän kappaleen pinnalle, pinta ei saisi tulla materiaalien kestävyyskannalta liian kuumaksi. Tämän työn tapauksessa infrapunauunin ongelmana on myös uunin koko, koska uunin tulisi olla tarpeeksi iso suurimmalle lämmitettävälle venttiilille. Lisäksi testin aikana toimilaitteen on oltava lämmitysjärjestelmän ulkopuolella. Ratkaisuna näihin ongelmiin voisi olla uuni, joka koostuu palasista ja jonka kokoa pystytään muuttamaan.

#### 5.2.2 Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli

Infrapunauunin tehokkuuden arviointia varten on tehtävä oletuksia uunin rakenteesta. Aikaisemmin todettiin, että erikokoisia venttiileitä on pystyttävä lämmittämään tehokkaasti ja toimilaitteen on pysyttävä säteilylämmöltä suojattuna. Työssä valittiin tarkasteltavaksi järjestelmä, joka koostuu neljäsosasynterin muotoisista uunipalasista. Venttiilin ympärille kootaan joko 2 tai 4 palasta riippuen venttiilin koosta. Palasen on oltava tarpeeksi pitkä suurimmalle venttiilille. Uunijärjestelmässä IR-säteilyelementit asetettaisiin venttiilin läpivirtauksen suuntaisesti. Ongelmana palasista koottavassa infrapunauunissa olisi mm. kokoamisesta aiheutuva työmäärä sekä järjestelmän palasten välinen eristäminen. Kuviossa 5 on esitetty pienikokoinen venttiili sekä 2 tällaista neljäsosasynteristä uunipalasta. Kuviossa järjestelmä on esitetty mahdollisimman yksinkertaisesti: päätyosat, eristeet ja testauslaitteisto on jätetty pois.



Kuvio 5. Kooltaan laskuissa käytettyä venttiiliä vastaava venttiili ja tarkasteltavan järjestelmän kuvaus, jossa suurikokoisimman venttiilin lämmittämiseen tarkoitettut elementit puolitettu korkeussuunnassa tämän pienen venttiilin lämmittämiseen.

Säteilylämpö on yleensä pääasiallinen mekanismi järjestelmissä, jotka toimivat yli 650 °C:ssa kuten infrapunasäteilyelementtien tapauksessa [13, s. 177]. Näin olleen laskuissa konvektiota ei oteta huomioon. Lisäksi ei huomioida ilman absorptiota eikä konduktiota testauslaitteistoon.

Oletetaan, että uuni ja venttiili ovat molemmat harmaita ja diffuuseja kappaleita ja tapaukseen voidaan soveltaa Kirchhoffin yhtälöä. Tällöin uunin ja venttiilin välisen säteilyn netto säteilyteho  $\dot{Q}_{21}$  voidaan laskea seuraavan kaavan avulla [2, s. 752]:

$$\dot{Q}_{21} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2} + \frac{1}{A_2F_{21}} + \frac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1}} \quad (3)$$

missä

$\sigma$  on Stefan Boltzmannin vakio,

$T_2$  on ulkoisen sylinterin lämpötilä,

$T_1$  on sisäisen sylinterin lämpötilä,

$\varepsilon_2$  on ulkoisen sylinterin emissiivisyys,

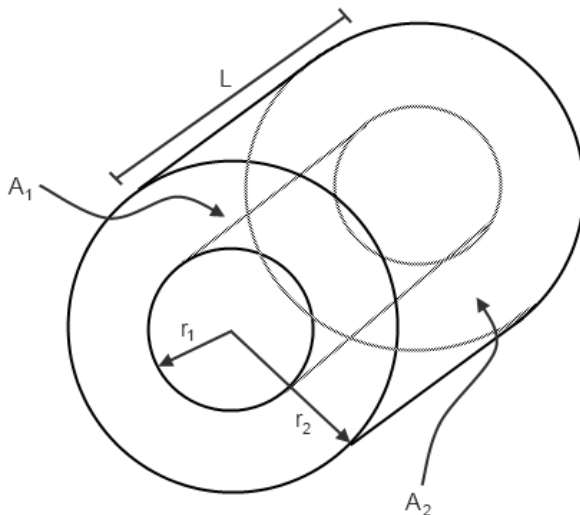
$\varepsilon_1$  on sisäisen sylinterin emissiivisyys,

$A_2$  ulkoisen sylinterin pinta-ala,

$A_1$  sisäisen sylinterin pinta-ala,

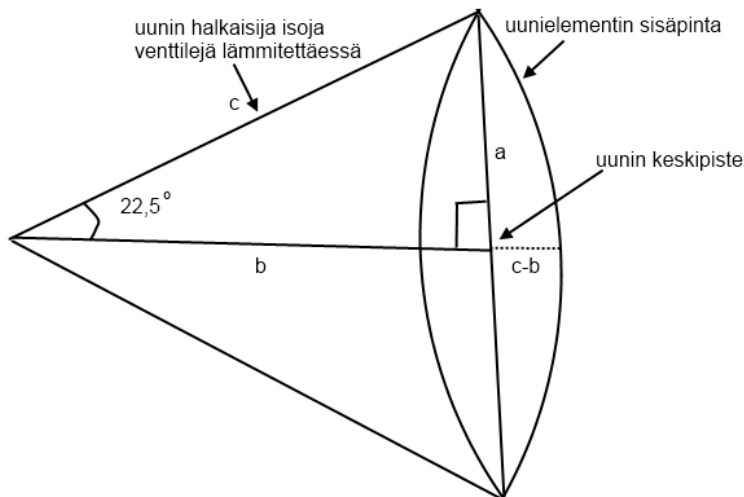
$F_{21}$  on näkyvyyskerroin ulkoisesta sylinteristä sisäiseen sylinteriin.

Laskutoimituksen yksinkertaistamiseksi oletetaan, että sekä venttiili että uuni ovat sylinterinmuotoisia. Lisäksi oletetaan, että venttiili saadaan keskelle uunia ja että koko venttiilin massa on sen ulkopinnalla. Lisäksi laskuissa ei huomioida materiaalissa tapahtuvaa konduktiota. Laskuissa käytetty järjestelmä on esitetty kuviossa 6, missä  $r_1$  on sisäisen sylinterin säde ja  $r_2$  ulkoisen sylinterin säde.



Kuvio 6. Laskuissa käytetty järjestelmä infrapunamenetelmän tehokkuuden arvioinnissa.

Kuvion 5 mukaisen järjestelmän ulkopinta-alan säde lasketaan kuvion 7 avulla, jossa hypotenuusa  $c$  kuvaa uunin halkaisijaa lämmitettäessä suuria venttiilejä ja  $a$  kuvaa puolta uunin korkeudesta.



Kuvio 7. Uunin poikkileikkaus laskennassa käytetyn ulomman sylinterin säteen määrittämiseksi.

Uunin keskipisteen ja sisäpintojen etäisyyden keskiarvo voitaisiin kuvion 7 perusteella laskea tarkasti integroimalla keskipisteen ympäri, mutta koska laskentamalli kuitenkin on niin karkea, arvioidaan kuvion 6 järjestelmän ulomman sylinterin säde kuvion 7 uunin keskipisteen ja uunielementin sisäpinnan etäisyyksien minimin ja maksimin keskiarvona. Kuvion 7 hypotenuusan  $c$  arvo saadaan kun tiedetään, että suurimman lämmitettävän venttiilin maksimisäde on 0,40 m, ja tämän tulisi mahtua ”kokonaiseen uuniin”, joten oletetaan kokonaisen uunin säteen  $c$ :n olevan 0,60 m. Näin ollen pienen uunin laskennassa käytettäväksi säteeksi saadaan trigonometrian ja kuvion 7 avulla:

$$r_2 = r_{avg} = \frac{r_{max} + r_{min}}{2} = \frac{c \cdot \sin(22,5^\circ) + c(1 - \cos(22,5^\circ))}{2} =$$

$$\frac{0,60 \text{ m} \cdot (\sin(22,5^\circ) + 1 - \cos(22,5^\circ))}{2} \approx 0,416 \text{ m}$$

Approksimoidaan kuvioiden 3 ja 4 avulla venttiilin keskisäde eli laskentamallin sisäisen sylinterin säde:

$$r_1 \approx \frac{2 \cdot 160 \text{ mm} \cdot 35 \text{ mm} + 168 \text{ mm} \cdot (48 \text{ mm} + 29 \text{ mm}) + 83 \text{ mm} \cdot 241 \text{ mm} + 117,2 \text{ mm} \cdot 89,5 \text{ mm}}{2 \cdot 35 \text{ mm} + (48 \text{ mm} + 29 \text{ mm}) + 241 \text{ mm} + 89,5 \text{ mm}} \approx$$

$$0,11 \text{ m}$$

Molempien sylintereiden pituudeksi oletetaan lämmitettävän venttiilin pituus  $L$  (kuviosta 3 ja 4:  $L = 153,5 \text{ mm} + 249,2 \text{ mm}$ ), eli oletetaan laskuissa, ettei IR-lämmityselementtejä

tarvitse käyttää koko uunin pituudelta. Tällöin venttiin näkyvyystekijästä  $F_{21}$  saadaan arvio Heat and Mass Transfer kirjan kahden äärellisen konsentrisen sylinterin järjestelmän  $F_{21}/(r_1/r_2)$ -kuvaajasta [2, s. 738]. Näin näkyvyystekijäksi saadaan

$$F_{21}(r_1 = 0,114 \text{ m}, r_2 = 0,416 \text{ m}, L = 153,5 \text{ mm} + 249,2 \text{ mm} \approx 0,403 \text{ m}) \\ \Rightarrow F_{21}\left(\frac{r_1}{r_2} = 0,26, \frac{L}{r_2} = 0,95\right) \approx 0,15$$

Oletetaan, että uunin muodostavien paneelien seiniin on kiinnitetty useita infrapunasäteilyelementtejä. Prosessilämmittämisessä on yleensä suositeltavaa, että valitaan infrapunaemissiolähteen aallonpituus niin, että lähteen emissiopiikki osuu lämmitettävän pinnan selektiiviselle absorptio aallonpituudelle [14]. Ruostumattomalle teräkselle emissiivisyys, jonka voidaan olettaa kuvaavan myös absorptiota, nousee tasaisesti aallonpituuden laskiessa [2, s. 703]. Oletetaan tämän pätevän myös tavalliselle hiiliteräkselle, joten valitaan laskuihin Heraeus Noblelight Oy:n valmistamat Fast Response Medium Wave -infrapunasäteilyelementit [15]. Tehokkuuden kannalta olisi voitu valita myös lyhyempiaaltoinen säteilylähde. Laskuihin tarvittavat ominaisuudet kyseisistä IR-säteilyelementeistä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Heraeus Noblelight Oy:n IR-säteilyelementtien laskuihin tarvittavat ominaisuudet [15].

Kokonaisleveys (sisältäen heijastinmateriaalin)	34 mm
Intensiivisyysmaksimin aallonpituus	1,4 – 1,6 $\mu\text{m}$
Keskimääräinen teho elementin pituusyksikköä kohden	45 W/cm
Hehkulangan lämpötila	1500 - 1800 °C

Cengelin Heat and Mass Transfer -kirjasta saadaan arviot teräksen emissiivisyydelle [2, s. 888]. Valitaan venttiilien materiaaliksi emissiivisyyden arviointiin Commercial Sheet, siksi että venttiin pinta on raakateräspinta, eli ei kiillotettu eikä erityisen hapettunut. Lämpötilalla 500 K emissiivisyys on 0,2 ja 1200 K:ssä se on 0,32 [2, s. 888]. Kirchhoffin yhtälön soveltamiseksi oletetaan, että absorptio venttiilissä on sen emissiota merkittävämpi järjestelmässä, ja valitaan säteilylähteen lämpötilaa vastaava emissiivisyys. Oletetaan, että emissiivisyys on lineaarinen lämpötilan funktiona. Näin ollen tämä arvioidaan ekstrapoloimalla emissiivisyysarvo hehkulangan lämpötilan vaihteluvälin keskellä (taulukko 5), eli 1923 K:ssä. Arvioksi venttiin emissiivisyydestä saadaan 0,44.

Laskuissa näkökulmana voisi olla halutun tehon saaminen, jolloin infrapunasäteilyelementtien lukumäärä laskettaisiin tavoitellun tehon mukaan. Tässä työssä pyritään kuitenkin arvioimaan parhaimmillaan realistisesti saavutettava teho, joten valitaan infrapunasäteilyelementtien lukumäärä mahdollisimman suureksi. Näin ollen infrapunasäteilyelementtien väliseksi etäisyydeksi valitaan 50 mm.

Infrapunauunin lämmönsiirrosta tulee helposti erittäin monimutkaisia laskutoimituksia, joten laskutoimituksen yksinkertaistamiseksi tässä karkeassa arviossa mallinnetaan uunia, joka koostuu lämpöenergian tuovasta hehkulangasta sekä säteilyn lämmitettävään kohteeseen heijastavasta pinnasta. Heijastavaa pintaa nostetaan niin korkeaan teoreettiseen lämpötilaan, että saatu säteilyvuo vastaa oikeilla heijastinlangoilla aikaansaattua säteilyvuota. Tällöin heijastinmateriaalin emissiivisyys voidaan valita huomioiden ainoastaan lämmitettävästä venttiilistä tuleva säteily ja sen heijastuminen.

Heraus Noblelight ilmoittaa elementtien olevan kultapinnoitettuja. Näiden lasisten kultapinnoitettujen IR-säteilyelementtien pinnan emissiivisyyden arvioiminen voi olla vaikeaa. Lisäksi on huomioitava IR-säteilyelementtien välissä olevan tilan pinta. Näin ollen, uunielementtien sisäpinnan keskimääräisen emissiivisyyden valitsemiseksi täytyy tehdä karkeita arvioita. Tiedetään, että usein säteilyelementit koostuvat kvartsiin enkapsyloidusta hehkulangasta sekä sen takana olevasta heijastimesta. Oletetaan koko uunin sisäpinnan olevan suhteellisen heijastava, ja heijastinmateriaaliin tulevan säteilyn tulevan venttiilistä, jonka lämpötila on alussa 298 K ja lopussa 673 K. Materiaaliksi valitaan kiillotettu teräs ja saadaan emissiivisyyden arvoksi alussa 0,08 (300 K) ja lopussa 0,14 (500 K) [2, s. 888]. Nämä ovat erittäin karkeita oletuksia, jotka täytyy huomioida laskentatulosten luotettavuudessa.

### 5.2.3 Laskentatulokset

Venttiiliä kuvaavan sisäisen sylinterin pinta-alaksi saadaan:

$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 0,114 \text{ m} \cdot 0,403 \text{ m} \approx 0,29 \text{ m}^2$$

Uunia kuvaavan ulkoisen sylinterin pinta-alaksi saadaan:

$$A_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 0,416 \text{ m} \cdot 0,403 \text{ m} \approx 1,05 \text{ m}^2$$

IR-säteilyelementtilaitteiston valmistajan tiedoista, jotka on esitetty taulukossa 5, pystytään arvioimaan uunin pinnalta tulevan säteilyn teho. Mahdollisimman suuren tehon mahdollistamiseksi uuniin pyritään asettamaan mahdollisimman monta IR-säteilyelementtiä. Laitteistovalmistajalta ei löytynyt tietoa siitä kuinka tiheästi elementtejä voidaan asettaa. Oletetaan, että IR-säteilyelementtien asettaminen viiden senttimetrin etäisyydelle toisistaan on realistista. Infrapunalämpöelementtien lukumäärän arvioimiseksi lasketaan uunin sisäpinnan, eli ulkoisen sylinterin, kehä  $C_{uuni}$ .

$$C_{uuni} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 0,416 \text{ m} \approx 2,61 \text{ m}$$

Lasketaan montako infrapunalämpöelementtiä mahtuu uunin seinille.

$$n = \frac{C_{uuni}}{L_{elementti} + L_{väli}} = \frac{2,61 \text{ m}}{0,034 \text{ m} + 0,050 \text{ m}} \approx 31,1 \text{ kpl} \Rightarrow 31 \text{ kpl}$$

missä

$n$  on säteilyelementtien lukumäärä,

$L_{elementti}$  on yhden IR-säteilyelementin leveys,

$L_{väli}$  on säteilyelementtien etäisyys toisistaan.

Lasketaan infrapunalämmittimen teho  $P_{IR-Elementti}$ , jos oletetaan sen olevan venttiilin pituinen.

$$\begin{aligned} P_{IR-Elementti} &= L \cdot (\text{keskimääräinen teho pituusyksikköä kohden}) \\ &= 40,3 \text{ cm} \cdot 45 \text{ W / cm} = 1810 \text{ W} \end{aligned}$$

Seuraavaksi voidaan laskea uunin pinnalta tuleva säteilyvuo  $E_{emit-uuni}$ .

$$E_{emit-uuni} = \frac{n \cdot P_{IR-elementti}}{A_2} = \frac{31 \cdot 1810 \text{ W}}{1,05 \text{ m}^2} = 53400 \text{ W / m}^2$$

Kun tiedetään uunin pinnalta emittoitunut säteilyvuo, voidaan arvioida uunin sisäpinnan, eli heijastepinnan, teoreettinen lämpötila  $T_2$ , jolla pyritään huomiomaan hehkulangalta suoraan tuleva sekä uuninpinnalta heijastuva säteilyvuo venttiiliä kohti lämmityksen alkaessa alussa ja loppuessa:

$$E_{emit-uuni} = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \Rightarrow$$

$$T_{2(alussa)} = \left( \frac{E_{emit-uuni}}{\varepsilon_2(alussa) \cdot \sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{53400 \text{ W/m}^2}{0,08 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}} \right)^{1/4} \approx 1850 \text{ K}$$

$$T_{2(lopussa)} = \left( \frac{E_{emit-uuni}}{\varepsilon_2(lopussa) \cdot \sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{53400 \text{ W/m}^2}{0,14 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}} \right)^{1/4} \approx 1610 \text{ K}$$

Nyt voidaan kaavan 3 avulla laskea lämmönsiirtoteho alussa, jossa venttiili on huoneenlämpöinen (298 K):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{21}(T_{1(alussa)} = 298 \text{ K}; \varepsilon_1 = 0,44; \varepsilon_2(alussa) = 0,08) &= \frac{\sigma(T_{2(alussa)}^4 - T_{1(alussa)}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_2(alussa)}{A_2 \varepsilon_2(alussa)} + \frac{1}{A_2 F_{21}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1}} \\ &= \frac{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \cdot ((1850 \text{ K})^4 - (298 \text{ K})^4)}{\frac{1 - 0,08}{1,05 \text{ m}^2 \cdot 0,08} + \frac{1}{1,05 \text{ m}^2 \cdot 0,15} + \frac{1 - 0,44}{0,29 \text{ m}^2 \cdot 0,44}} \approx 31 \text{ kW} \end{aligned}$$

sekä lopussa, jossa venttiilin lämpötila on 673 K. Tällöin lämmönsiirtotehoksi saadaan:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{21}(T_{1(lopussa)} = 673 \text{ K}; \varepsilon_1 = 0,44; \varepsilon_2(lopussa) = 0,14) &= \frac{\sigma(T_{2(lopussa)}^4 - T_{1(lopussa)}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_2(lopussa)}{A_2 \varepsilon_2(lopussa)} + \frac{1}{A_2 F_{21}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1}} \\ &= \frac{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \cdot ((1610 \text{ K})^4 - (673 \text{ K})^4)}{\frac{1 - 0,14}{1,05 \text{ m}^2 \cdot 0,14} + \frac{1}{1,05 \text{ m}^2 \cdot 0,15} + \frac{1 - 0,44}{0,29 \text{ m}^2 \cdot 0,44}} \approx 22 \text{ kW} \end{aligned}$$

Lämmitykseen kuluva aika voidaan arvioida alku- ja lopputehoista saadulla keskiarvolla, kun oletetaan, että säteilyn lämmönsiirtoteho muuttuu lineaarisesti ajan funktiona. Venttiilin lämmittämiseen 673 K:iin (400 °C) tarvittava aika lasketaan täten seuraavasti (venttiilimateriaalin teräksen ominaislämpökapasiteetti otettu ESS-ohjelmasta [16]):

$$Q = mc_p \Delta T \tag{4}$$

missä

$c_p$  on hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti keskilämpötilassa 212,5 °C, jonka arvo on 0,5127kJ\*kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> [16],

$m$  on venttiilin massa.

Lämmitysajaksi tulee:

$$Q = mc_p \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta T}{t} = \frac{\dot{Q}}{mc_p} = \frac{26,5 \text{ kW}}{125 \text{ kg} \cdot 0,5026 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} = 0,422 \text{ K/s}$$

$$\Rightarrow t = \frac{375 \text{ K}}{0,422 \text{ K/s}} = 890 \text{ s} \approx 15 \text{ min}$$

Tuloksista nähdään, että uunin lämmitysteho laskee aika merkittävästi suhteessa venttiilin lämpötilaan. Kaavan 3 sekä Heat and Mass Transfer -kirjan [2, s.738]  $F_{21} / (r_1/r_2)$  -kuvaajan avulla pystytään toteamaan, että uunin koon kasvaessa uunin lämmitysteho suhteessa uunin kokonaistehoon laskee merkittävästi. Näin ollen, palasista koottavassa uunissa voisi olla hyötysuhteen osalta etua kiinteäkokoiseen uunin nähden.

### 5.3 Induktio

#### 5.3.1 Teoria

Induktiolämmityslaitteisto koostuu kolmesta pääasiallisesta osasta: vaihtovirtalähteestä, käämiä vastaavasta työkelasta sekä lämmitettävästä työkappaleesta, joka on valmistettu sähköä johtavasta materiaalista. Työkappale sijoitetaan työkelan sisään. Työkelassa kulkee korkeataajuuksinen vaihtovirta ja sen sisällä muodostuu värähtelevä magneettikenttä. Kappale ei ole kosketuksissa kelaan ja materiaalin lämpeneminen perustuu sähköisiin pyörrevirtahäviöihin ja työkappaleen materiaalissa tapahtuviin magneettisiin hystereesihäviöihin. Pyörrevirtahäviöt on ainoa mekanismi ei-magneettisille materiaaleille ja pääasiallinen mekanismi ferromagneettisille materiaaleille. Ferromagneettisiin materiaaleihin vaikuttavat myös hystereesihäviöt, joiden vaikutus kuitenkin häviää Curie-lämpötilan yläpuolella, jossa materiaali menettää magneettisuutensa. [10, s. 9]

Pyörrevirtahäviöt syntyvät siitä, että kelassa kulkeva vaihtovirta aiheuttaa värähtelevän magneettikentän, josta työkappaleeseen indusoituu virtaa ja syntyy Joule-lämpöä. Ferromagneettisissa materiaaleissa, kuten raudassa ja joissakin terästyypeissä, tapahtuvat hystereesihäviöt perustuvat siihen, että värähtelevä magneettikenttä työkelan sisällä toistuvasti magnetoi ja demagnetoi metallin molekyyliä ja niiden välille syntyy kitkaa, joka aiheuttaa materiaalin lämpenemistä [10, s. 9 - 10].

Lämmitystehoon vaikuttavat mm. vaihtovirran taajuus, työkappaleen muoto, materiaalin magneettiset ja sähköiset ominaisuudet, työkelan etäisyys lämmitettävästä työkappaleesta sekä magneettikentän voimakkuus. Magneettikentän voimakkuus vuorostaan riippuu työkelan virrasta ja häviöistä. [10, s. 20 - 25]

Työkelassa kulkevan vaihtovirran taajuus on välillä 5 - 400 kHz. Taajuuden valinta perustuu työkappaleen materiaalin ominaisuuksiin ja työkappaleen paksuuteen. Mitä suurempi vaihtovirran taajuus, sitä ohuempi on materiaalin pintakerros, johon lämpöenergia syntyy. Pintakerroksen lämpeneminen johtuu ahtovirrasta, eli siitä, että indusoitunut virta ahtautuu materiaalin pinnalle. Tämä vaikeuttaa induktiota materiaalin sisäisimmillä kerroksilla [10, s.13 - 15]. Paksuimmille kappaleille sopiva taajuus on noin 5 - 30 kHz [17].

Käytännön induktiolämmitysjärjestelmät voivat sisältää työkelan, työkappaleen ja vaihtovirtalähteen lisäksi myös impedanssisovituksen vaihtovirtalähteen ja työkelan välillä hyvän tehonsiirron varmistamiseksi [10, s. 29]. Suuritehoisissa induktiolämmittimissä on yleensä myös erillinen vesijäähdytysjärjestelmä, joka poistaa hukkalämpöä työkelasta. Lisäksi lämpötilan säätämiseksi induktiojärjestelmissä käytetään usein ohjauslaitteistoon kytkettyjä lämpöantureita.

Induktiolämmityksen vahvana etuna on se, että lämmitettävän materiaalin ja työkelan välillä ei tarvita suoraa kontaktia, koska lämpö syntyy suoraan työkappaleen sisällä. Tästä syystä lämpöhäviöt ympäristöön ovat merkittävästi pienemmät ja lämmitysprosessi on tehokkaampi kuin perinteisillä lämmitysmenetelmillä, joissa lämpöä johdetaan työkappaleeseen konduktio-, konvektio- tai säteilymekanismilla. Induktiolämmityksen etuina ovat myös tasainen lämmönjakautuminen työkappaleessa, nopea työkappaleen lämpeneminen, laitteiston nopea käynnistys, ohjauksen yksinkertaisuus, pienet lattiapinnan vaatimukset, helppo ylläpito sekä hiljainen, turvallinen ja puhdas työympäristö [10, s. 7 - 8]. Näistä syistä induktiolämmityksellä on joitakin ainutlaatuisia sovellutuksia teollisuudessa ja sitä käytetään muun muassa sulatuksessa, induktioliesissä ja eri materiaalien lämpökäsittelyssä.

Tämän työn kannalta magneettiseen induktioon perustuvan lämmityksen ongelmana on venttiilien eri kokoluokat, joten kiinteää työkelaa ei voida käyttää. Erikokoisten venttiilien lämmittämiseen sopisi ainoastaan joustava työkelatai induktiomatto.

### 5.3.2 Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli

Tarvittava induktiolämmittimen teho voidaan arvioida seuraavan kaavan avulla [10, s. 23 - 25]:

$$P_{tarvittava} = P_l + P_s + P_i \quad (5)$$

missä

$P_l$  on työkappaletta lämmittävä todellinen teho,

$P_s$  on kappaleen säteilylämpöhäviö,

$P_i$  on työkelassa tapahtuvat häviöt.

Tässä työssä konvektiota ympäröivään ilmaan ei oteta huomioon, koska tiedetään, että konvektion aiheuttamat lämpöhäviöt ovat yleensä pieniä nopeassa lämmittämisessä [10, s. 24].

Induktiokäämihäviöiden arviointi voidaan tehdä seuraavan kaavan avulla:

$$P_{induktiokäämihäviöt} = I_c^2 \cdot R_c \quad (6)$$

missä

$I_c$  on työkelassa kulkeva virta,

$R_c$  on työkelan vastus.

Työkelan vastus riippuu mm. taajuudesta, työkelan rakenteesta ja työkelan ja lämmitettävän kappaleen välissä olevasta etäisyydestä [10, s. 25]. Eri laitteistotoimittajien tiedoista induktiohäviöitä on vaikea arvioida tarkkaan, mutta tiedetään, että induktiolaitteiden hyötysuhde on yleensä erittäin korkea, joten voidaan olettaa, että induktiohäviöt ovat suhteellisen pieniä.

Induktiolämmittimen tehon tiheys tulisi pitää suhteellisen alhaisena, koska lämpö siirtyy konduktiivisesti kappaleen ulkokerroksista materiaalin sisälle ja sitä syystä lämmitysajan on oltava riittävän pitkä [10, s. 25]. Kappaleen ulko- ja sisäpinnan välillä olevasta lämpötilagradientista ei kuitenkaan päästä eroon, mutta sitä pystytään minimoimaan säätämällä huolellisesti induktiolämmityksen parametreja [10, s. 25]. Tässä työssä laskettiin kuitenkin maksimi lämmityksen teho.

Muista menetelmistä poiketen oletetaan, että venttiiliä ei ole eristetty lainkaan. Näin ollen, jos kappaleen oletetaan olevan harmaa ja diffuusi sekä sijaitsevan huoneenlämpöisessä ympäristössä, lämmitettävän kappaleen säteilyn lämmönsiirtoteho on

$$P_{\text{säteilylämpöhäviö}} = E_{\text{emit-venttiili}} = \varepsilon_{\text{venttiili}}(T_{\text{venttiili}}) \cdot A_{\text{venttiili-ulko}} \cdot \sigma(T_{\text{venttiili}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4)$$

Infrapuna-uunitehoa laskiessa venttiilimateriaalille valittiin seuraavat parametrit: 500 K:ssä emissiivisyys on 0,2 ja 1200 K:ssä 0,32 [2, s. 888]. Lineaarisella interpoloinnilla lämpötilalle 673 K emissiivisyydeksi saadaan 0,23. Näin ollen säteilylämpöhäviöksi saadaan:

$$E_{\text{emit-venttiili(lopussa)}} = \varepsilon_{\text{venttiili(lopussa)}} \cdot A_{\text{venttiili-ulko}} \cdot \sigma(T_{\text{venttiili}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4) = 0,23 \cdot 0,290 \text{ m}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \cdot ((673 \text{ K})^4 - (673 \text{ K})^4) = 745 \text{ W}$$

### 5.3.3 Laskentatulokset

Oletetaan, että hankitaan laite, jonka teho  $P_{\text{tarvittava}} - P_{\text{induktiokäämihäviöt}}$  on 35 kW, koska esim. RiTeR Inductionin pienitehoisin työn lämmitykseen soveltuvan laitteiston nimellisteho on 40 kW [18]. Tällöin, jos säteilylämpöön häviää keskimäärin 370 W, on lämmityksen teho noin 34,6 kW. Venttiilin lämmitysaika voidaan laskea yhtälöstä 4:

$$Q = mc_p \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta T}{t} = \frac{\dot{Q}}{mc_p} = \frac{34,6 \text{ kW}}{125 \text{ kg} \cdot 0,5026 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} = 0,557 \text{ K/s}$$

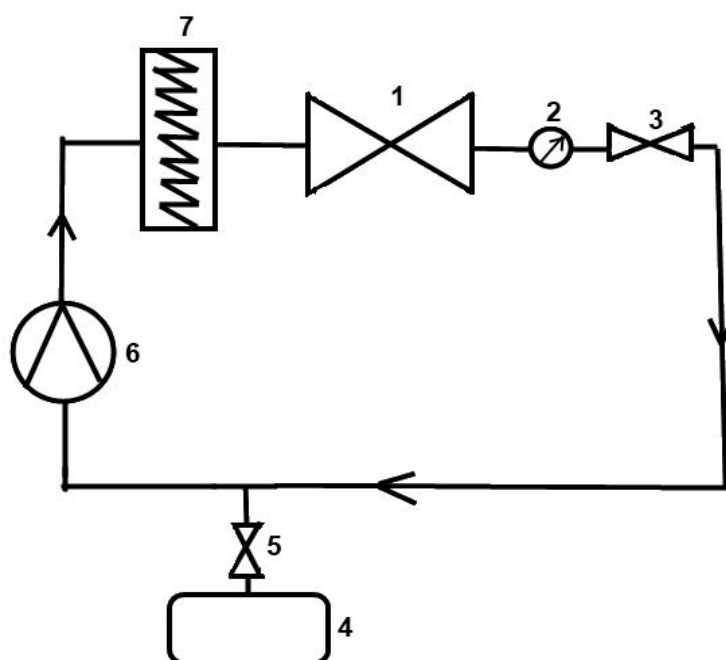
$$\Rightarrow t = \frac{375 \text{ K}}{0,557 \text{ K/s}} \approx 11 \text{ min}$$

Tuloksista voidaan nähdä, että tarkasteltavan venttiilin kohdalla, säteilylämpöhäviöt ovat suhteellisen pieniä suhteessa induktiomenetelmien tehoon. Suurikokoisten venttiilien tapauksessa, voi kuitenkin olla tarpeellista eristää venttiili lämmitystehon parantamiseksi. Toisaalta säteilylämpöhäviöt lämmitettävän kappaleen pinnalta voivat hieman alentaa venttiilin pinnan lämpötilaa, joka ahtovirrasta johtuen voi olla kappaleen sisempiä kerroksia kuumempi. Venttiilin tasaista lämpenemistä kaikissa sen osissa tulisi miettiä venttiilikohtaisesti ja se tulisi huomioida induktiolaitteiston tehonsäätelyssä.

## 5.4 Helium

### 5.4.1 Teoria

Emissiotestin aikana venttiilin sisällä on heliumia, jota voitaisiin hyödyntää lämmönvälittäjänä. Paineistetun heliumin avulla voidaan imitoida venttiilin käyttöolosuhteita rakentamalla putkijärjestelmä, johon erikokoiset testattavat venttiilit kiinnitetään erikokoisten välikappaleiden avulla. Putkijärjestelmässä kulkeva kuuma paineistettu helium siirtäisi lämpöä venttiiliin. Tätä työtä varten suunniteltiin alustava rakenne mahdolliselle putkistojärjestelmälle heliumin virtaukselle ja pakotetulle konvektiolle. Järjestelmän rakenne on esitetty kuviossa 8.



Kuvio 8. Putkistojärjestelmä heliumin virtaukselle ja pakotetulle konvektiolle siitä. Kuviossa (1) testattava venttiili, (2) paine-anturi, (3) venttiili, (4) kaasusäiliö, (5) venttiili, (6) pumppu, (7) lämmitin.

Suunnitellussa menetelmässä helium ohjataan kaasusäiliöstä (4) putkistoon venttiilin (5) avulla. Tällä venttiilillä säädellään putkiston paine. Putkistossa helium virtaa korkeapainekompressoriin (6), josta se virtaa lämmittimen (7) kautta testattavan venttiilin (1) läpi. Järjestelmän rakenteesta voidaan nähdä, että painetta ei saada kaasusäiliöpainetta korkeammaksi. Lisäksi, heliumin lämpötilan noustaessa lämmittimessä sen paine myös nousee, joten pumpun jälkeisen paineen on oltava

haluttua painetta matalampi ja painetta tulisikin säädellä esim. testattavan venttiilin sisällä tai läheisyydessä olevan paine-anturin (2) avulla.

Järjestelmä vaikuttaa lupaavalta, mutta kuitenkin virtausnopeuden ohjaus ja säätö sekä järjestelmän rakentaminen voi olla erittäin haastavaa, koska tarvitaan putkijärjestelmän lisäksi erikokoisia liitososia, pumppu (kompressori tai puhallin), lämmitin ja ohjausventtiilejä, joten laitteiston hinta voisi olla aika korkea. Lisäksi laitteiston suunnittelu ja testaaminen voisi olla kallista ja siihen voisi kulua paljon työaika. Emissiotestin aikana virtausnopeuden on oltava lähellä nollaa, joten virtaus on pysäytettävä lämmityksen jälkeen. Näin ollen venttiilin korkea lämpötila on ylläpidettävä tehokkaan eristeen avulla ja mahdollisesti luonnollisen konvektion avulla. Lisäksi ongelmana on pumpun (puhaltimen tai kompressorin) kyky kestää korkea lämpötila ja painetta. Tällaisen pumpun hankinta voisi olla haastavaa. Toki lämmitys voitaisiin tehdä matalammassa paineessa, mutta tällöin lämmönsiirto olisi tehottomampaa ja laitteisto voisi tulla aika monimutkaiseksi.

Heliumin kulkiessa venttiilin läpi lämmönsiirto tapahtuu sisäisen pakotetun konvektion avulla. Jos putkijärjestelmällä ja venttiilillä on pyöreä poikkipinta-ala, fluidin nopeus vaihtelee nolasta, putken pinnalla, maksimiarvoon, putken keskikohdassa. Lämmönsiirtotehoa laskiessa käytetään kaasun keskimääräistä nopeutta, joka pysyy vakiona kokoonpuristumattoman virtauksen tapauksessa, jos putken poikkipinta-ala on vakio [2, s. 467]. Keskinopeus lasketaan seuraavasta yhtälöstä:

$$V_{avg} = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} \quad (7)$$

missä

$\dot{m}$  on fluidin massavirta,

$\rho$  on fluidin tiheys annetuissa olosuhteissa,

$A_c$  on putkiston keskimääräinen poikkipinta-ala [2, s. 467].

Kun fluidia lämmitetään tai jäädytetään sen kulkiessa putken läpi, fluidin lämpötila vaihtelee lämpötila-arvosta putken pinnalla maksimi- (tai minimi-) arvoon putken keskellä. Fluidin kuljettaman energian tietyn poikkipinta-alan läpi todellisessa virtauksessa on oltava yhtä suuri kuin saman poikkipinta-alan läpi kuljettaman energian, jos fluidin keskilämpötila  $T_m$  pysyisi vakiona [2, s. 468].

Lämmönsiirtoenergiaa laskiessa pitää ottaa huomioon virtauksen ominaisuudet. Virtaus voi olla laminaarinen tai turbulენტtinen. Sen määrittämiseksi on määritettävä fluidille Reynoldsin luvun arvo, joka pyöreälle putkelle lasketaan seuraavasta yhtälöstä:

$$\text{Re} = \frac{\rho V_{avg} D_h}{\mu} \quad (8)$$

missä

$\rho$  on fluidin tiheys annetuissa olosuhteissa,

$V_{avg}$  on fluidin keskinopeus,

$D_h$  on putken hydraulinen halkaisija,

$\mu$  on fluidin dynaaminen viskositeetti.

Jos Reynoldsin luku on 2 300:aa pienempi, kyseessä on laminaarinen virtaus. Reynoldsin luvun ollessa välillä 2 300 ja 10 000 kyseessä on välirajavirtaus. Kun Reynoldsin luvun arvo ylittää 10 000:n, virtaus on turbulენტtinen. [2, s. 468]

Kun tiedetään virtauksen ominaisuuksia, voidaan määrittää virtauksen Nusseltin luku, josta lasketaan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin seuraavan yhtälön avulla:

$$h = \frac{k}{D_h} Nu \quad (9)$$

missä

$k$  on fluidin lämmönjohtavuus,

$D_h$  on putken hydraulinen halkaisija,

$Nu$  on annetulle virtaukselle määritelty Nusseltin luku [2, s.482].

Lämmönsiirtoteho voidaan määrittää Newtonin jäädytyslain mukaisesti seuraavasta yhtälöstä:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (10)$$

missä

$h$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin,

$T_s$  on lämmitettävän materiaalin pintalämpötila hetkellä 0,

$A_s$  on fluidin ja lämmitettävän materiaalin kosketuspinta-ala,

$T_\infty$  on tarpeeksi kaukana materiaalin pinnasta olevan fluidin lämpötila [2, s.474].

#### 5.4.2 Oletukset, parametrit ja laskennassa käytetty malli

Oletetaan, että pyritään lämmittämään tarkastelussa oleva venttiili 400 °C:seen ja että helium tulee testattavan venttiilin sisään 500 °C:n lämpötilassa. Tätä arvoa voitaisiin muuttaa, mutta mitä lähempänä 400 °C:ta se on, sitä kauemmin lämmitys kestää. Tällöin venttiilin lämpötilan lähestyessä 400 °C:ta, esim. ulkopinnalta mitattuna, heliumin lämpötila lasketaan niin, että venttiilin lämmitys pysähtyy 400 °C:seen. Heliumin paineen on oltava ASME B16.34-2009 -standardin mukaisessa paineessa lämmitettävän venttiilin paineluokan (300) ja lämpötilan (400 °C) mukaisesti (28,2 baria) [19].

Oletetaan laskuissa venttiili putkeksi. Lisäksi laskuissa ei huomioida venttiilissä tapahtuvaa konduktiota, eli oletetaan, että koko venttiilin massa on venttiilin sisäpinnalla.

Lämmönsiirtötehon määrittämiseksi tarvitaan mm. heliumin virtausnopeuden arvo. Pitää ottaa huomioon, että helium jäähtyy jatkuvasti kulkiessaan putkijärjestelmän läpi ja sen lämpötilaa on ylläpidettävä 500 °C:ssa, joten heliumia on lämmitettävää lämmittimen avulla. Näin ollen virtausnopeuden on oltava riittävän matala, jotta kaasua ehdittäisiin lämmittää realistisella tehonmäärällä huomioiden lämmityslaitteiston rajoitteet sovelluksessa. Kaasun virtausnopeudeksi valittiin 1,2 m/s, joka on tässä tapauksessa matalin mahdollinen arvo turbulenttisen virtauksen saavuttamiseksi.

### 5.4.3 Laskentatulokset

Heliumin lämmönjohtavuus on kuusi kertaa korkeampi kuin ilman, ja sen arvoksi annetuissa olosuhteissa saadaan kirjallisuudesta  $k = 0,3012 \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$  (500 °C ja 28,2 bar) [20, s. 41].

Aluksi approksimoidaan heliumin ja teräksen kosketuspinta-ala, eli venttiilin sisäinen pinta-ala, jonka likimääräinen arvo saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$A_s = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0,093 \text{m} \cdot 0,403 \text{m} = 0,24 \text{m}^2$$

missä

$r_s$  on venttiilin approksimoitu sisähalkaisija,

$L$  on venttiilin pituus.

Kaikki arvot saatiin kuvioista 3 ja 4.

Lämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi täytyy laskea Reynoldsin, Nusseltin ja Prandtlin lukujen arvoja [2].

Kaavasta 3 nähdään, että Reynoldsin luku riippuu kaasun tiheydestä ja dynaamisesta viskositeetista. Tiheys lasketaan molaaritulavuuden avulla, joka saadaan yhtälöstä

$$V_m = \frac{RT}{P} = \frac{8,314 \text{Jmol}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot 773 \text{K}}{2820 \text{kPa}} = 2,279 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{mol}$$

Heliumin tiheydeksi annetuissa olosuhteissa saadaan

$$\rho = \frac{M}{V_m} = \frac{4,00602 \text{g} / \text{mol}}{2,279 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{mol}} = 1,758 \text{kg} / \text{m}^3$$

Heliumin dynaaminen viskositeetti tarkistettiin Engineering Equation Solver -ohjelman avulla ja sen arvoksi saatiin  $\mu = 0,00003849 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$  [16]. Seuraavaksi voidaan laskea Reynoldsin luku kaavasta 8:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\rho v \cdot 2r_s}{\mu} = \frac{1,758 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,2 \text{ m/s} \cdot 2 \cdot 0,093 \text{ m}}{0,00003849 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}} = 10194,$$

missa

$D_h$  on venttiilin hydraulinen halkaisija, joksi approksimoitiin venttiilin pesän keskihalkaisija 0,186 m.

Reynoldsin luvun arvo on suurempi kuin 10 000, joten virtaus on täysin turbulenttinen. Turbulenttiselle virtaukselle Nusseltin luku voidaan laskea Dittus-Boelterin yhtälön avulla:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} = 0,023 Re^{0,8} \left( \frac{c_p \mu}{k} \right)^{0,3} =$$

$$0,023 \cdot 10194^{0,8} \left( \frac{5193 \text{ J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 0,00003849 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{0,3012 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \right)^{0,3} = 32,63$$

missa

$c_p$  on heliumin ominaislämpökapasiteetti annetuissa olosuhteissa,

$\mu$  on heliumin dynaaminen viskositeetti,

$k$  on heliumin lämmönjohtavuus,

$Re$  on Reynoldsin luku.

Ominaislämpökapasiteetti  $c_p$  on lämpötilasta riippuva, mutta heliumin lämpötila pysyy vakiona, koska lämpötilaa ylläpidetään jatkuvasti lämmittimen avulla.

Kun tiedetään Nusseltin luku, voidaan laskea heliumin lämmönsiirtokerroin yhtälön 9 avulla:

$$h = \frac{k}{D_h} Nu = \frac{0,3012 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1}}{0,186 \text{ m}} \cdot 32,63 = 52,8 \text{ Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Newtonin jäähdytyslain mukaan heliumista teräkselle siirtynyt energia lasketaan yhtälöstä 10:

$$\dot{Q} = hA_s (T_s - T_\infty)$$

jossa  $\dot{Q}$  ja  $T_s$  ovat ajasta riippuvaisia. Laskuissa  $h$  oletetaan ajasta riippumattomaksi heliumin pienen lämpötilaeron takia (katso heliumin ulostulolämpötila).

Kaavasta 10 pystytään ratkaisemaan konvektiivinen lämmönsiirtoteho. Lämmönsiirtotehoksi lämmitysprosessin alussa saadaan:

$$\dot{Q}_{conv(alussa)} = hA_s (T_{s(alussa)} - T_\infty) = 52,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \cdot 0,24 \text{ m}^2 \cdot (773 \text{ K} - 298 \text{ K}) = 6,0 \text{ kW}$$

Konvektiiviseksi lämmönsiirtotehoksi lopussa saadaan:

$$\dot{Q}_{conv(lopussa)} = hA_s (T_{s(lopussa)} - T_\infty) = 52,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \cdot 0,24 \text{ m}^2 \cdot (773 \text{ K} - 673 \text{ K}) = 1,27 \text{ kW}$$

Oletetaan, että lämmönsiirtoteho muuttuu lineaarisesti ajan funktiona, joten sen keskiarvon avulla voidaan laskea lämmitykseen tarvittava aika. Teräksen lämpötilan muutos saadaan kaavan 4 mukaan:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{\dot{Q}_{keskiarvo}}{mc_p} = \frac{3,64 \text{ kW}}{125 \text{ kg} \cdot 0,5127 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} = 0,057 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$$

Venttiilin lämmitysajaksi saadaan noin 1 h 50 min.

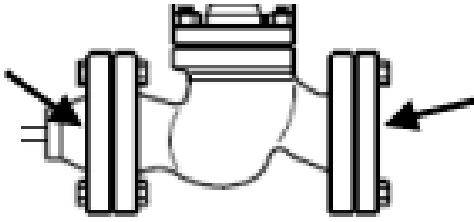
Valituilla parametreilla saatu lämmitysteho on selvästi alempi kuin muilla menetelmillä. Arvioitu lämmitysaika on kuitenkin hyväksyttävissä suhteessa nykyiseen menetelmään. Voidaan siis todeta, että tämä lämmitysmenetelmä voisi olla riittävän tehokas ainakin tarkasteltavalle venttiilille, jos löydettäisiin pumppuratkaisu, jolla päästäisiin laskuissa käytettyyn tai korkeampaan massavirtaan sekä sovellutukseen sopiva lämmitin. Lämmittimen teho tulisi riittää prosessin suurimman tarvittavan venttiiliä lämmittävän lämmönsiirtotehon lisäksi myös putkistossa, venttiilissä ja pumppuratkaisussa aiheutuneisiin lämpöhäviöihin, joita ovat mm. säteilylämpöhäviöt, luonnollinen konvektio huoneilmaan sekä konduktio testauslaitteistoon. Suurimman tarvittavan venttiiliä lämmittävän lämmönsiirtotehon arvioimisen tulisi perustua siihen, että suurimman venttiilin kohdalla päästäisiin tarpeeksi lyhyeen lämmitysaikaan. Tällöin tulisi kuitenkin huomioida se, että tasaisen lämmityksen mahdollistamiseksi heliumin lämpötila ei saisi kasvaa liian suureksi. Pumppuratkaisusta riippuen massavirtaa voitaisiin kasvattaa, jotta heliumin lämpötilaa voitaisiin laskea.

## 5.5 Nykyisen menetelmän parantaminen

Nykyinen järjestelmä, jossa lämmitysmatto kierretään venttiililaipan ympäri, perustuu lämmönjohtamiseen ja IR-säteilyyn lämpöelementeistä. Pääongelmana on lämmönsäädön epätarkkuus. Epätarkkuus johtuu lämpökäsittely-yksiköstä, jonka vaihtaminen tai päivittäminen olisi kuitenkin suhteellisen kallista. Tarkkuutta voitaisiin myös mahdollisesti parantaa muokkaamalla lämpökäsittely-yksikön ohjelmaa, mutta nykyisessä laitteistossa käytetään manuaalista säätöä, ja sen automatisointi aiheuttaisi lisäkustannuksia. Tällöin erilaisia ohjelmia voitaisiin testata, ja niiden tuloksia tutkia, optimoiden lämmityksen tehokkuus ja tarkkuus. Ohjauksen parantamisen saavuttamiseksi voitaisiin myös vaihtaa tai muokata joitakin komponentteja lämmityslaitteistossa, kuten lämpöantureita ja niiden paikkoja.

Konduktio ja osin säteily lämmitysmekanismina tuo myös mukanaan ongelmia korkeisiin lämpötiloihin pääsemiseksi, johtuen siitä, että lämmitysmekanismit perustuvat lämpötilaeroon lämpöelementtien ja lämmitettävän venttiilin välillä. Tällöin lämmitettävän venttiilin lähestyessä lämpöelementin lämpötilaa, lämmönsiirtoteho laskee huomattavasti. Lämmitysmaton lämpötila on kuitenkin sen verran korkea, että menetelmän pitäisi pysyä suhteellisen tehokkaana. On tärkeää huomioida se, että nykyisessä mattomenetelmässä säteilylämpöhäviöt matoista ovat merkittäviä, ja siksi eristäminen on ehdottoman tärkeää, mutta toisaalta myös työllistävää.

Edullinen vaihtoehto, jolla nykyisen menetelmän tehokkuutta voitaisiin hieman parantaa, on lämmityselementtiratkaisun vaihtaminen tai lämmitystehon nostaminen lämmityselementtejä lisäämällä. Yksi tällainen vaihtoehto voisi olla esimerkiksi upotettavien lämmitysvastuksien (kuumennuspatruunojen) sijoittaminen testilappoihin (esitetty kuviossa 9) porattuihin reikiin. Korkealämpöisten kuumennuspatruunoiden ollessa istutettuna reikiin, kuumennuspatruunoiden pinta-ala, joka olisi kontaktissa ympäristöön, olisi erittäin pieni. Näin ollen energiahäviöt, suoraan lämmittimistä ympäristöön, olisivat vähäisiä. Lisäksi työn toimeksiantaja toivoi, että kuumennuspatruunoiden tehokkuutta ja sovellettavuutta tarkasteltaisiin. Kuumennuspatruunoiden käytön heikkouksia ovat lämpötilaerosta riippuvuus ja tehon aleneminen venttiilin lämpötilan kasvaessa. Lämmönsiirtotehon korottamista korkeilla lämpötiloilla voidaan parantaa valitsemalla kuumennuspatruunat, joiden pintalämpötila on mahdollisimman korkea.



Kuvio 9. Testilaitteet esitettynä testausjärjestelmässä.

Tarkasteltavan venttiilin kohdalla oletetaan, että testilaitteen paksuus on sama kuin venttiilin kiinnityskohdan paksuus, eli 35 mm. Lisäksi oletetaan, että kuumennuspatruunat upotetaan testilaitteiden ruuvireikiin (2x12 kpl) väleihin porattuihin reikiin (2x12 kpl).

Esimerkiksi otetaan Omegan CIR 0,5" (todellinen halkaisija 0.498"=1,265 cm) kuumennuspatruunat, joiden pituus on 1,25" (3,175 cm). Maksimiteho tämänkokoisille ja -tyyppisille kuumennuspatruunoille jännitteellä 240 V on 250 W (tyyppi: CIR-30122/240). Vastaavan ¾" kuumennuspatruunan pintalämpötila on 816 °C, joten voidaan olettaa, että kuumennuspatruunoiden tehokkuus säilyy jossain määrin myös korkeimmilla testauslämpötiloilla. [21]

Pelkällä nimellisteholla laskettuna 24 kuumennuspatruunasta saadaan lämmitystehoa 6 kW. Tämä teho voitaisiin tarkasteltavan venttiilin kohdalla lisätä ainakin neljäsosalla upottamalla kuumennuspatruunoita myös umpitestilaitteen keskelle.

Kuumennuspatruunoihin perustuvalla järjestelmällä on muutamia ongelmakohtia. Lämmitys tapahtuu venttiilin päistä testilaitteiden kautta, joten tämän aiheuttama lämpögradientti tulisi ottaa huomioon. Lisäksi eristyksestä riippuen säteilylämpöhäviöitä tulisi tarkastella. Induktiolaskuista tiedetään, että venttiilistä säteilevä energiahäviö on ilman eristystä maksimissaan tarkasteltavilla lämpötiloilla 745 W.

Kuumennuspatruunamenetelmä voitaisiin tarvittaessa yhdistää toiseen menetelmään, esimerkiksi infrapuna-uuniin tai nykyiseen menetelmään.

## 6 Vaihtoehtoiset eristysratkaisut

Nykyistä lämmitysmenetelmää käytettäessä lämpöhäviöiden minimoimiseksi ja lämpötilan pitämiseksi pienen vaihteluvälin sisällä venttiili peitetään eristeellä. Tällä hetkellä eristysnä käytetään nk. ”alumiinivillaa” eli alumiinisilikaattikuituvillaa, ASW (Aluminosilicate Wool). Venttiili peitetään tällä hetkellä levittämällä villakuitua venttiilin ympärille. Villaa on vaikea käsitellä, ja se voi mahdollisesti aiheuttaa hengitysvaikeuksia työntekijöille. Näistä syistä johtuen tässä työssä pohditaan vaihtoehtoisia eristysmenetelmiä.

Eristemateriaalin tehtävänä on estää lämpöhäviöitä ympäristöön mahdollisimman tehokkaasti. Eristyksen tehokkuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten eristysmateriaalin lämmönjohtavuus, ulko- ja sisäpintojen emissiivisuudet, eristeen paksuus ja tiheys sekä eristemateriaalin ominaislämpökapasiteetti. Lämpöhäviö on voimakkaasti riippuvainen myös käyttölämpötilatasosta. [22]

Kaikkiin muihin työssä tarkasteltuihin menetelmiin paitsi infrapunauuniratkaisuun soveltuvat ainoastaan eristemateriaalit, joita voidaan käyttää erimuotoisten ja -kokoisten venttiilien eristämiseen, siksi eristyslevyjen tai muiden kiinteiden eristerakenteiden käyttö ei sovellu venttiilin eristämiseen. Näin ollen mm. polystyreenin ja polyuretaanin käyttö voidaan pois sulkea muilta kuin uuniratkaisuilta. Uuniratkaisussa eriste voitaisiin asentaa kiinteästi esim. uunin ulkopinnalle. Tämänhetkinen tapa kuitumateriaalin levittämiseksi venttiilin ympärille soveltuu hyvin muille työssä esitetyille ratkaisuille. Lisäksi eristemattojen käyttöä voidaan pohtia, mutta mattojenkin soveltaminen voi olla hankalaa erimuotoisten venttiilien sekä toimilaitteen johdosta.

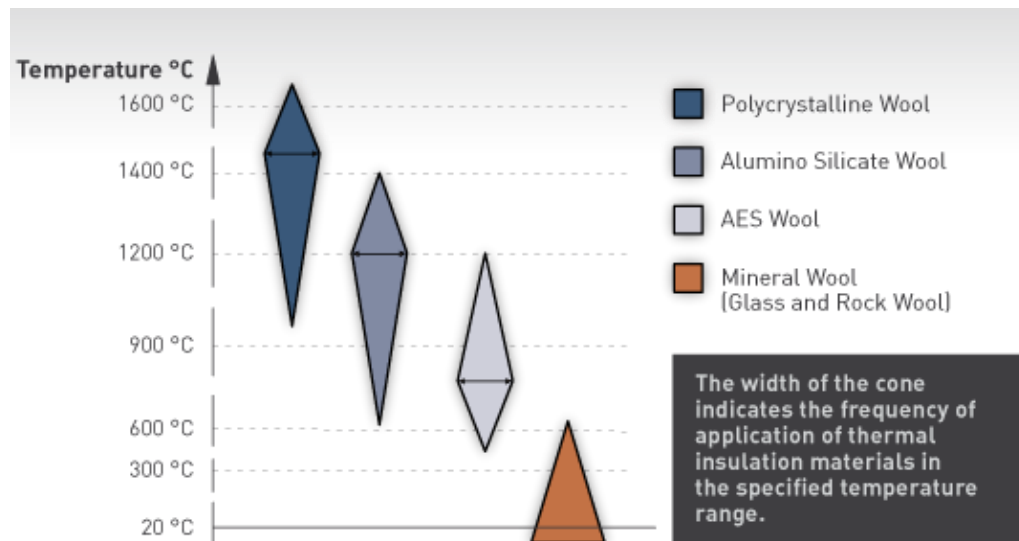
Perinteisiä eristysratkaisuja ovat mm. mineraalivillat, kivivilla ja lasivilla. Kivivilla on mineraalivilla, jota valmistetaan pääasiassa emäksisistä kivilajeista. Paroc Oy:n kivivilla tuotteiden maksimi käyttölämpötila on 750 °C [22]. Toisen mineraalivillan, lasivillan, maksimi käyttölämpötila on yleensä hieman matalampi, kuin kivivillalla. Myös Isover Oy valmistaa mineraalivillatuotteita, jotka mahdollistavat maksimi käyttölämpötiloja 700 °C:seen asti [23].

Nykyinen eristysmateriaali, alumiinisilikaattikuituvilla, on korkean lämpötilan eristevilla, HTIW (High Temperature Insulation Wool), ja soveltuu näin ollen käytettäväksi nykyisen menetelmän kanssa, jossa eristevillalla peitetään lämmitysmatto, jonka

lämpötila on noin 1000 °C. Aiemmin esitetyt kivi- ja lasivillaratkaisut eivät sovellu nykyisen menetelmän kanssa käytettäviksi. Niitä voisi tosin käyttää sovelluksissa, jossa eriste asetettaisiin suoraan venttiin päälle (lämpötila alle 600 °C), kuten pelkkiä kuumennuspatruunoita tai induktiolämmitystä käytettäessä. Induktiolämmityksen osalta eristysmateriaalin soveltuvuutta joudutaan mahdollisesti tarkastelemaan myös siltä näkökulmalta, ettei siihen indusoituisi energiaa (esim. alumiinifoliopinnoitteeseen), vaikkakin eriste pyritään asettamaan työkelan ulkopuolelle.

Muita korkean lämpötilan eristeilloja ovat maa-alkaalisilikaattivilla, AES (engl. Alkaline Earth Silicate Wool), ja monikiteinen villa, PCW (Polycrystalline Wool) [24]. Näistä PCW:n käyttölämpötila on 600 - 1700 °C ja AES:n käyttölämpötila on alle 1200 °C [24]. Molempia vaihtoehtoja voitaisiin käyttää nykyisen menetelmän eristämiseen alumiinisilikaattikuituvillan sijaan. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että kaikilla esitetyillä korkean lämpötilan eristeilloilla voi olla terveydelle haitallisia vaikutuksia, johtuen niiden aiheuttamasta pölystä, jos ei niiden käytössä menetellä oikein ja seurata HTIW:itä koskevia turvallisuusohjeita. Näin ollen vastaavanlainen huolellisuus on kuitenkin säilytettävä, vaikka alumiinisilikaattikuituvilla vaihdettaisiin toiseksi HTIW:ksi.

Tässä työssä ei tarkastella eristeiden tehokkuuksia, johtuen siitä, että tehokkuudet riippuvat käyttöympäristöstä. Jos lämmitysmenetelmä päätetään vaihtaa, ja näin perinteisiä eristysratkaisuja voitaisiin käyttää, tulisi erilaisten eristysten tehokkuutta tarkastella erikseen huomioiden käyttölämpötila sekä muu käyttöympäristö. Jos nykyistä menetelmää käytettäessä päädytään vaihtamaan HTIW-eristemateriaali, on sen turvallisuutta ja tehokkuutta verrattava nykyiseen eristemateriaaliin. Kuviossa 10 on esitetty erilaisten eristeiden käyttölämpötila-alueet.



Kuvio 10. Erialaisten eristemateriaalien käyttölämpötila-alueet. Kuviossa eristemateriaaleja kuvaavien kartioiden leveys ilmaisee niiden suosion kyseisellä lämpötilalla. [24]

## **7 Tarkasteltavien menetelmien ja nykyisen menetelmän parantamisen kustannusarviot**

Infrapuna- säteilyelementeistä koostuva uuni on kustannuksiltaan kallis. Heraeus Noblelightin Suomen myyntiä hoitavan IPL Oy Insinööritoimiston mukaan kahdesta puolisyylinteristä rakennettu uuni, jonka seinille kiinnitettäisiin 31 infrapunasäteilyelementtiä, joiden pintatehot olisivat 45 W/cm, maksaisi noin 65 000 - 75 000 € [25]. Tähän hintaan sisältyisi myös tehonsäätö-yksikkö ja ohjauskeskus. Infrapunauunijärjestelmä ei kuitenkaan vaadi erillistä eristystä, koska uunin seinät toimivat eristeinä.

Induktiolämmitysmenetelmä vaatii pelkän induktiolämmitysjärjestelmän hankinnan eikä vaadi erillistä termostaattiyksikköä, koska se sisältyy useimmiten järjestelmään kuten myös jäähdytysjärjestelmä. Generaattorin tehoksi riittää 40 kW, joka on RiTeR Inductionin pienitehoisin käyttötarkoitukseen soveltuva laitteisto [18], koska tämä on riittävä teho vähentäen lämmitysaikaa jo merkittävästi nykyiseen menetelmään nähden. Joustavan RiTeR Inductionin työkelan pituus on noin 25 m. RiTeR Inductionin mukaan tällainen laitteisto maksaa noin 65 000 €. Kiinalaisilta valmistajilta tai toimittajilta (esim. DaWei Induction Heating Machine) vastaavalta vaikuttava laitteisto (60 kW:n ilmajäähdytteinen induktiolämmitysjärjestelmä), joka sisältää 30 m pitkän joustavan induktiokelan, maksaa noin 20 000 €. Tämä kuitenkin herättää laatukysymyksiä ja vaikeuttaa laitteiston testausta ennen hankintaa [26].

Paineistettu helium -menetelmä vaatii laitteistoa, joka on rakenteeltaan monimutkainen ja sen hankinta voi olla hankalaa. Ongelmaksi menetelmässä osoittautui pumppuratkaisun löytäminen: korkeapainekompressorit eivät kestä korkeaa sisääntulolämpöä, ja puhallinratkaisuja selatessa ei löytynyt puhallinta, joka kestäisi ISO-standardin määrittämiä painetta ja kaasun lämpötilaa. Ratkaisuna tähän voisi olla kaasun esijäädyttäminen ennen pumppua ja lämmittäminen pumpun jälkeen. Tämä kuitenkin olisi lämmitystehohäviöt huomioiden erittäin huono ratkaisu. Lisäksi on rakennettava putkijärjestelmä, johon voidaan kytkeä erikokoisia venttiilejä. Järjestelmän rakentaminen on haastavaa, koska putkiston lisäksi on hankittava erikokoisia välivosia. Pitää myös ottaa huomioon, että järjestelmässä ei saa olla vuotoa, joten liitosten tulee olla erityisen hyvin tiivistettyjä. Pumpun ja putkijärjestelmän lisäksi tarvitaan lämmitintä, joka lämmittäisi heliumia 500 °C:seen ja huolehtisi lämpötilan ylläpidosta. Lisäksi tarvitaan ohjausventtiileitä heliumsäiliön ja putkijärjestelmän välillä sekä testattavan venttiilin ja pumpun välillä. Menetelmä vaatii myös erillistä termostaattia sekä eristystä.

Sen lisäksi, että järjestelmän pumppua koskevat ongelmat on ratkaistava, hinta muodostuu monista tekijöistä ja sen arviointi on hyvin vaikeaa.

Nykyisen menetelmän parantaminen kuumennuspatruunoilla on kustannuksiltaan halvin. Kuumennuspatruunoiden hinta on noin 50 € / kpl [21], joten kokonaishinnaksi tulisi tarkastellulle venttiilille noin (24 x 50 €) 1 200 €. Suurimmalle testattavalle (56") venttiilille ympärysmittalla suhteutettuna saataisiin lämmittimien lukumääräksi yli 200 kpl. Oletetaan, että ympärysmittaan nähden tehoa voitaisiin pienentää suuremmille venttiileille, ja että 100 kuumennuspatruunaa (kokonaisnimellisteho noin 25 kW) riittäisi suurimmille venttiileille. Tällöin kuumennuspatruunoiden hinta olisi 5000 €. Nykyisellä lämpökäsittely-yksiköllä pystyttäisiin mahdollisesti myös ohjaamaan kuumennuspatruunoita, olettaen, että nykyiset ongelmat eivät liity lämpökäsittely-yksikköön (uuden lämpökäsittely-yksikön hinta on noin 15 000 €).

Infrapunauuni- ja kuumennuspatruunamenetelmiä voitaisiin myös mahdollisesti yhdistää ja käyttää hybridimenetelmänä, jossa lämmitys tapahtuisi sekä testilaitan sisältä, että venttiilin ulkopuolelta. Infrapunauuni toimisi sekä lämmittimenä että eristeenä ja uunijärjestelmä sisältäisi myös lämmönohjausta, jolla voitaisiin myös ohjata kuumennuspatruunoita. Tämän ratkaisun kokonaishinnaksi tulisi noin 65 500 - 75 500 €.

Kustannuksia verrattaessa nähdään, että infrapunälämmitys ja induktiolämmitys ovat suunnilleen yhtä kalliita. Paineistettu helium -järjestelmä tulisi mahdollisesti myös verrattain kalliiksi, mutta pumppujärjestelmän hintatietojen puuttuessa kustannusarviointia ei pystytty tekemään.

## 8 Suositukset ja päätelmät

Insinöörityössä on tarkasteltu neljää eri lämmitysmenetelmää: induktiolämmitystä, paineistetulla heliumilla lämmittämistä, infrapunauunia sekä kuumennuspatruunoiden käyttämistä lämmittämiseen.

Tehokkuudeltaan parhaaksi osoittautui induktiolämmitysmenetelmä. Menetelmän suurimpana etuna on lämmön tasainen jakaantuminen työkappaleessa lyhyestä lämmitysajasta huolimatta. Tasaisen lämpenemisen ansiosta materiaalin muutokset ja rakoilu, johtuen materiaalin lämpölaajenemisesta, vähenee. Toisaalta induktiolämmitinratkaisussa on huomioitava ahtovirta, joka voi aiheuttaa kappaleen sisäisen lämpögradientin. Induktiolämmitin sisältää ohjauslaitteistoa, joten lämpötilansäätö ja ohjaus on helppoa, eikä yllättäviä yhteensopivuusongelmia pitäisi ilmetä. Induktiolämmityksessä vesijähdytteinen joustava kela kierretään venttiin ympäri. Haluttu venttiin maksimilämpötila sekä generaattorin teho määrittävät lämmitysajan. Lämpötilan ylläpitäminen tapahtuu automaattisesti ohjaamalla generaattoria päälle ja pois päältä lämpöanturin avulla. Esimerkiksi, jos induktiolämmitin asetetaan 400 °C:seen, lämmitettävä kappale ei ylitä tätä arvoa, vaan lämpö ohjautuu lämpöanturin mukaisesti. Kun pinta saavuttaa 400 °C, generaattori pysähtyy automaattisesti. Kun lämpötila putoaa noin 3 astetta, generaattori käynnistyy uudelleen [18]. Induktiolaitteiston hankinta on helppoa, koska laitteistoa, johon sisältyvät kaikki tarvittavat laitteet, voidaan ostaa valmiina valmistajalta tai toimittajalta. Järjestelmän yhteydessä voidaan kuitenkin käyttää erillistä eristettä, koska lämmitetty teräs luovuttaa lämpöä ympäristölle, jolloin energiaa menee hukkaan. Työn laskutoimituksissa tarkastetulla venttiilillä esim. säteilylämpöhäviöillä ei ollut merkittävää vaikutusta, mutta eristeellä on mahdollisesti merkittävä vaikutus suurilla venttiileillä, mitä on tarkasteltava lähemmin, jos päädytään hankkimaan induktiolämmitysjärjestelmä. Kustannusten näkökulmasta laitteisto on kuitenkin melko kallis, ja sen arvioitu hinta on 65 000 €.

Vaihtoehto venttiin lämmittämiseen on pakotettuun konvektioon perustuva kuuma paineistettu helium. Tämän menetelmän hyvää puoli on venttiin sisällä olevan kaasun hyödyntäminen. Lisäksi menetelmän etuna on se, että helium imitoi parhaiten venttiin käyttöolosuhteita, koska todellisessa teollisuusprosessissa venttiin sisällä kulkee kaasu tai neste, ja lämmönjakelu tapahtuu vastaavalla tavalla. Laskutuloksista nähdään, että menetelmän lämmönsiirtoteho on mahdollisesti riittävän hyvä laskuihin valitulla virtausnopeudella (valittiin pienin virtaus turbulenttiselle virtaukselle ko.

venttiilissä), mutta kuitenkin selvästi pienempi kuin esim. induktiolämmittimellä. Heliumvirtausmenetelmän heikkous on se, että merkittäviä lämpöhäviöitä syntyy putkistoon ja muuhun laitteistoon absorboituneesta lämmöstä. Lisäksi tarvittavan pumppuratkaisun esimerkiksi putkistoon asennettavan puhaltimen tai kompressorin on selvitävä korkeasta paineesta ja kestävä korkea lämpötilaa, kun huomioidaan, että painetta laskiessa taas menetelmän teho vähenee. Sopivan puhaltimen tai kompressorin löytäminen on osoittautunut haastavaksi. Putkijärjestelmän rakentamisen hinta huomioiden kaikki tarvittavat laitteet voi olla korkea ja sen tarkka arviointi vaikeutuu pumppuratkaisun saatavuus- ja hintatietojen puuttuessa. Näin ollen tämän järjestelmän kannattavuus on kyseenalaista, ja sen rakentaminen on haastavaa, koska on hankittava iso määrä erilaisia laitteita eri toimittajilta ja varmistettava niiden yhteensopivuus. Lisäkustannuksia aiheuttavat eristykset ja lämmönohjaus. Kokonaishintaa on mahdoton arvioida tehdyn tutkimuksen perusteella. Lisäksi järjestelmän toiminnan varmuutta on syytä tarkista. Järjestelmää on testattava ennen käyttöä, ja testaamista vaikeuttaa se, että tällaisen järjestelmän rakentaminen on erittäin asiakaskohtaista ja vaatii monien osapuolien osallistumista. Tähän järjestelmään liittyy myös turvallisuusriski johtuen kuumasta paineistetusta kaasusta. Järjestelmä ei ole kilpailukykyinen muihin tarkasteltuihin menetelmiin nähden, ja se voidaan sulkea pois lämmitysvaihtoehtona venttiilin emissiotestaukseen.

Kolmas tarkasteltu vaihtoehto on infrapunauuni. Tarkastellussa infrapunalämmityksessä tulee lisätyötä siitä, että järjestelmä joudutaan kokoamaan infrapunauunielementeistä. Jos taas järjestelmä koostuu ainoastaan kiinteäkokoisesta uunista, johon suurinkin venttiili mahtuu, järjestelmän geometriasta johtuvat häviöt pienillä venttiileillä voivat koitua liian suuriksi. Lisäksi ongelmana infrapunalämmityksen käytössä on se, että toimilaitteen tulisi olla lämmityksen ulottumattomissa, kun toisaalta erikokoisia venttiilejä on pystyttävä lämmittämään. Infrapunalämmitystä käytetään metallien lämmittämiseen teollisuudessa, mutta on kuitenkin huomioitava, että metalleilla on yleensä suhteellisen pieni emissiivisyys eli myös absorptio. Infrapunalämmitys on kuitenkin osoittanut tehokkaaksi, mutta lämmönjakelu kappaleessa on epätasaista ja kappaleen pinta lämpenee hyvin nopeasti, joten lämmitysaikaa on pidennettävä esimerkiksi laskemalla tehoa. Työn laskennassa ja hinta-arvioinnissa käytettyä lukumäärää infrapunasäteilyelementeistä tulisi uudelleen tarkastella, jos päädyttäisiin hankkimaan infrapuna-uuni. On tosin huomioitava, että myös suurimmat venttiilit on pystyttävä lämmittämään suhteellisen tehokkaasti infrapunauunista saadulla kokonaisteholla.

Neljäntenä vaihtoehtona tarkasteltiin lämmityselementtien (lämmityspatruunoiden) sijoittamista testilaipan sisälle. Voidaan todeta, että menetelmällä pystytään tuomaan suhteellisen paljon lämpöä testilappoihin (nimellisteho venttiilistä riippuen). Menetelmää voidaan käyttää nykyisen menetelmän (lämmitysmatto) tai infrapunauunin rinnalla nopeuttamassa lämmitysprosessia ja kasvattamassa lämmityspinta-alaa. Menetelmän käyttöönotto nykyisen menetelmän rinnalla olisi edullista ja helppoa: lämmityspatruunat 100 kpl maksavat noin 5 000 € ja asentaminen onnistuisi poraamalla reikiä kaikkiin erikokoisiin testilappoihin. Jos ongelma nykyisessä menetelmässä liittyy nykyiseen lämpökäsittely-yksikköön tai sitä ei pystyttäisi soveltamaan lämmityspatruunoille, uuden lämpökäsittely-yksikön hankkiminen tulisi suhteellisen kalliiksi (alustavien tiedustelujen perusteella noin 15 000 €). Lämmityspatruunoiden käyttöönotto ja termostaatin vaihtaminen yhdessä on kuitenkin muihin menetelmiin verrattuna edullisin (20 000€). Menetelmän lämmitysaika tosin on hitain, mutta toisaalta tasaisen lämmönjakautumisen mahdollistamiseksi (lämpölaajeneminen tapahtuu hitaasti ja materiaalin muodonmuutoksia voidaan tästä syystä välttää) muita menetelmiä ei mahdollisesti kuitenkaan voida ajaa täydellä teholla, eikä näin käytännön tehoero mahdollisesti olisi kovin suuri.

Suurikokoisten venttiilien osalta infrapunauunilämmityksessä venttiiliin voi paksun seinämän johdosta syntyä suuri lämpötilagradientti. Tätä voidaan tosin pienentää vähentämällä uunin tehoa, lisäten tosin lämmitysaikaa. Kyseistä lämmitysgradienttia voitaisiin vähentää testilappoihin asennettavilla lämmityspatruunoilla, jotka tosin muodostaisivat toisen venttiiliin virtauksen suuntaisen lämpögradientin (viilein kohta keskellä venttiiliä). Infrapunauunin testaaminen käytännössä ennen käyttöönottoa voisi olla hankalaa, koska uuni on rakennettava jo testausta varten.

Induktiolämmityksessä ei uskoisi käytännössä muodostuvan suurta ongelmaa ahtovirrasta, kun venttiilien seinämät kuitenkin ovat suhteellisen kapeita, mutta ahtovirta tulisi huomioida, jos päädyttäisiin hankkimaan induktiolämmitysjärjestelmä. Toinen ongelma induktiolämmityksessä on laitteiston käyttäminen käytännössä: miten työkela olisi kierrettynä erikokoisten venttiilien ympärille ja pystytäänkö ohjauslaitteistoa soveltamaan venttiilien ollessa kytkettynä testauslaitteistoon. Induktiolämmittimen osalta positiivista on se, että koska laitteisto sisältää itsessään kaikki tarvittavat oheislaitteet, sen testaamisen laitteistotoimittajan kanssa luulisi olevan helposti järjestettävissä.

Lämmityspatruunoita voitaisiin käyttää infrapunauunin yhteydessä, mutta sen lisäksi myös yksinään tai nykyisen lämmitysmattoratkaisun kanssa. Lämmityspatruunoiden käyttöönottoaminen nykyisen menetelmän rinnalla olisi kustannuksiltaan edullisin ratkaisu ja erittäin edullinen, jos nykyistä ohjauslaitteistoa voitaisiin hyödyntää. Toisaalta lämmityspatruunat eivät eroa nykyisestä menetelmästä siinä mielessä, että nekin perustuvat perinteisiin lämmönsiirtomekanismeihin, jossa lämpövuon suuruus on suhteessa lämmityselementin ja lämmitettävän kappaleen lämpötilaeroon. Tämä vähentää menetelmän tehoa venttiilin lämmitessä.

Lämmityspatruunoita voitaisiin testata hankkimalla jollekin pienelle venttiilille tarvittava määrä ja upottamalla ne kyseisen venttiilin testilappoihin sekä testaamalla niiden tehokkuutta kytkemällä ne nykyiseen ohjauslaitteistoon. Tällaista testausta varten tehtävä investointi olisi erittäin pieni. Jos pystytään tekemään suurempi investointi, voisi olla kannattavaa tarkastella induktiomenetelmää tarkemmin ja järjestää jonkin laitteistotoimittajan kanssa järjestelmän testausta. Eristysratkaisua kannattaisi tarkastella siinä tapauksessa, jos lämmitysmenetelmää muutetaan.

## Lähteet

- 1 ISO 15848-1:2006. Industrial valves: Measurement, test and qualification procedures for fugitive emissions: Part 1: Classification system and qualification procedures for type testing of valves. 2006.
- 2 Cengel, Yunus & Ghajar, Afshin. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications: 4th Edition in SI Units. McGraw-Hill, 2011.
- 3 Minea, Alina. Advances in Industrial Heat Transfer. CRC Press, 2012.
- 4 Bejan, Adrain & Kraus, Allan. Heat Transfer Handbook. John Wiley & Sons, 2003.
- 5 Process heating - Introducing energy saving measures for business. (WWW-dokumentti.) Carbon Trust.  
<[http://www.carbontrust.com/media/147550/ctv064\\_\\_process\\_heating.pdf](http://www.carbontrust.com/media/147550/ctv064__process_heating.pdf)>. Luettu 13.5.2013.
- 6 Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry: 2nd Edition. (WWW-dokumentti.) U.S. Department of Energy.  
<[http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech\\_assistance/pdfs/process\\_heating\\_sourcebook2.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/process_heating_sourcebook2.pdf)>. Luettu 13.5.2013.
- 7 Process Heating with Molten Salts. (WWW-dokumentti.) Bertrams Heatec.  
<[http://www.bertrams-heatec.com/fileadmin/user\\_upload/dokumente/2008/heatec\\_salz\\_e.pdf](http://www.bertrams-heatec.com/fileadmin/user_upload/dokumente/2008/heatec_salz_e.pdf)>. Luettu 13.5.2013.
- 8 Ask an Energy Expert: Optimizing process: Thekdi Arvind. (WWW-dokumentti.) Reliable Plant. <<http://www.reliableplant.com/Read/11894/energy-process>>. Luettu 13.5.2013.
- 9 Thostenson, E. T., & Chou, T. W. Microwave processing: fundamentals and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 30 (9), 1055-1071. 1999.
- 10 Zinn, Stanley & Semiatin, Lee. Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications. ASM International, 1988.
- 11 The Principles of Infrared. (WWW-dokumentti.) Double R Controls.  
<<http://www.drc.co.uk/DRC/TECH-DOCS/infraRed.aspx>>. Luettu 21.4.2013.
- 12 Non-Contact Thermometry: Measurement Errors: Chapter 2. (WWW-dokumentti.). SPIE Poland Chapter. <<http://www.spie.pl/ch2theory.pdf>>. Luettu 13.5.2013.
- 13 Theodore, Louis. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. John Wiley & Sons, 2011.
- 14 Technical Information: Radiant Infrared Heating – Theory & Principles. (WWW-dokumentti.) Chromalox.  
<<http://www.chromalox.com/catalog/resources/technical-information/Heat-Loss->

- Calculations-and-Heater-Selection-Radiant-Infrared-Heating.pdf>. Luettu 21.4.2013.
- 15 Fast Response Medium Wave IR Heaters. (WWW-dokumentti.). Heraus Noblelight. <[http://www.noblelight.net/infrared\\_heaters/fast\\_response\\_mediumwave\\_infrared\\_heaters.shtml](http://www.noblelight.net/infrared_heaters/fast_response_mediumwave_infrared_heaters.shtml)>. Luettu 13.5.2013.
  - 16 Engineering Equations Solver -tietokoneohjelma: Limited Academic Version 8.486D. F-Chart Software, 2009.
  - 17 Induction Heating Guide. (WWW-dokumentti.) GH Induction Atmospheres LLC. <<http://www.gh-ia.com/pdf/GH-IA-Induction-Heating-Guide.pdf>>. Luettu 21.4.2013.
  - 18 RiTeR Induction. Tiedonanto sähköpostitse. 19.4.2013.
  - 19 ASME B16.34-2004. Valves - Flanged, Threaded, and Welding End. 2004.
  - 20 Petersen, Helge. Risö Report 224: The properties of Helium: Density, Specific heat, Viscosity, and Thermal Conductivity at Pressures from 1 to 100 bar and from Room Temperature to about 1800 K. Danish Atomic Energy Commission. 1970.
  - 21 Incoloy Sheath CIR Series High Watt Density Cartridge Heaters 1/2" (1.27cm) and 5/8" (1.59cm) Diameter. (WWW-dokumentti.) Omega. <[http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=CIR\\_12&Nav=head01](http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=CIR_12&Nav=head01)>. Luettu 13.5.2013.
  - 22 Teollisuuden eristysratkaisut: Tekniset eristeet. (WWW-dokumentti.) Paroc Oy. <<http://www.paroc.fi/~media/Files/Brochures/Finland/Industrial-Solutions-Paroc-FI.ashx>>. Luettu 12.5.2013.
  - 23 Teollisuus. (WWW-sivusto.) Isover Oy. <<http://www.isover.fi/tuotteet/tekniset-eristeet/teollisuus/>>. Luettu 12.5.2013.
  - 24 High Temperature Wool Industry. (WWW-sivusto.) The European Ceramic Fibre Industry Association. <<http://www.ecfia.eu/products.htm>>. Luettu 12.5.2013.
  - 25 IPL Oy Insinööritoimisto. Tiedonanto sähköpostitse. 8.5.2013.
  - 26 DaWei Induction Heating Machine. Tiedonanto sähköpostitse. 17.4.2013.
  - 27 Metso Intranet-sivusto. <<http://avenue.metso.com>>. Luettu 6.3.2013.