

Utvikling av et hybrid varmerør for høytemperatur anvendelser

Kolbeinn Jakob Kristjansson

Master i produktutvikling og produksjon
Oppgaven levert: Februar 2011
Hovedveileder: Erling Næss, EPT
Biveileder(e): Geir Hansen, EPT

Oppgavetekst

Oppgaven har to hovedmål:

- i. Etablere en metode for sikker fylling av arbeidsmedium på varmerøret, samt vakuumering og forsegling av varmerøret
 - a) Litteraturstudium av eksisterende, publiserte metoder.
 - b) Utarbeide design av konsept for fylling, vakuumering og forsegling. På grunn av arbeidsmediets egenskaper skal det legges vekt på sikkerhet i forbindelse med fylling.
 - c) Utarbeide prosedyrer for vakuumering, fylling og forsegling.
 - d) I den grad tiden tillater skal det gjennomføres innledende forsøk på påfylling.
- ii. Kartlegge, ved hjelp av numeriske beregninger, hvordan den termiske oppførselen til et rektangulært varmerør påvirkes av ujevn varmedistribusjon på heteflaten.

Oppgaven gitt: 09. september 2010

Hovedveileder: Erling Næss, EPT

EPT-M-2010-nr

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Kolbeinn Kristjansson

Høsten 2010

Utvikling av et hybrid varmerør for høytemperatur anvendelser

Development of a hybrid heat pipe for high temperature applications

Bakgrunn

Bruk av varmerør (engelsk: "heat pipes") har vist seg å være en meget effektiv metode for varmetransport, og finner stadig nye anvendelsesområder. Institutt for Energi- og Prosessteknikk er involvert i forskning og utvikling av en ny type hybride varmerør for høytemperatur prosesskjøling og varmegjenvinning fra aluminiums elektrolyseceller. I denne sammenhengen er det flere viktige prosesser som må vurderes, blant annet metoder for sikker vakuumering, fylling og forsegling av et varmerør, samt analyser av varmerørets egenskaper ved ujevn varmebelastning.

Bruk av veker for sikring av effektiv distribusjon av arbeidsmediet i fordampersesjonen er av spesiell interesse, og det skal undersøkes hvordan distribusjonen av arbeidsmediet påvirkes av ujevn varmebelastning på fordamperflaten. Videre skal det bygges et laboratorieoppsett for måling av varmeovergangsforhold for denne typen varmerør, og i den sammenhengen skal det utarbeides metoder for sikker fylling av arbeidsmedium på varmerøret.

Oppgaven er en fortsettelse av prosjektarbeidet.

Mål

Oppgaven har to hovedmål:

- i. Etablere en metode for sikker fylling av arbeidsmedium på varmerøret, samt vakuumering og forsegling av varmerøret.
- ii. Kartlegge, ved hjelp av numeriske beregninger, hvordan den termiske oppførselen til et rektangulært varmerør påvirkes av ujevn varmedistribusjon på heteflatten.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Det skal utarbeides en metode for sikker vakuumering, fylling og forsegling av et rektangulært, hybrid varmerør som benytter kalium som arbeidsmedium. Følgende arbeidsoppgaver inngår:
 - a. Litteraturstudium av eksisterende, publiserte metoder.

- b. Utarbeide design av konsept for fylling, vakuumering og forsegling. På grunn av arbeidsmediets egenskaper skal det legges vekt sikkerhet i forbindelse med fylling.
- c. Utarbeide prosedyrer for fylling, vakuumering og forsegling.
- d. I den grad tiden tillater skal det gjennomføres innledende forsøk for påfylling.

Arbeidet skal dokumenteres, og erfaringer fra de innledende forsøkene skal presenteres og vurderes mhp. mulige forbedringstiltak.

- 2. Det skal utarbeides en numerisk beregningsmodell for væsketransport i en rektangulær vekestruktur samt overflatefordamping ved både uniform og ujevnt distribuert varmpådrag på heteflaten. Modellen skal inkludere de viktigste prosessene for væskedistribusjon og –fordamping, og skal i primært kunne beskrive oppførselen for fordamperflaten på et rektangulært varmerør med ujevn varmebelastning, eksempelvis ved delvis gjennombrenning av isolasjonen på en elektrolysecelle. Modellen skal presenteres, og de ulike delmodellene skal beskrives og diskuteres.
- 3. Det skal gjennomføres beregninger med simuleringsmodellen for å kartlegge hvordan arbeidsmediet distribueres ved ulike varmpådrag. Resultatene skal presenteres og diskuteres.
- 4. Det skal utarbeides forslag til videre arbeid.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.


Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de regler og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesseteknikk.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.


Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maksimalt én maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til eventuelle medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og eventuelt leveres direkte til de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 24. august 2010.



Olav Bolland
Instituttleder



Erling Næss
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder

Geir Hansen, ph.d.-student, Inst. for energi- og prosessteknikk

Forord

Dette er en masteroppgave gjennomført ved Institutt for energi- og prosessteknikk ved NTNU. Arbeidet mitt med varmerør har gitt meg muligheten til å jobbe helt fra tidlig konseptfase og frem til bygging, og har gitt meg mer innsikt i hva som trengs for å gjennomføre et prosjekt.

Jeg vil takke Geir Hansen og Erling Næss, som som har hjulpet til med gjennomføringen av denne masteroppgaven. Jeg vil også takke Rolf Dahl for tips til komponentbruk i vakuummriggen.



Kolbeinn Jakob Kristjansson, 2. februar 2011

Sammendrag

Det første målet med denne masteroppgaven er å utvikle en prosedyre for å vakuu- mere, fylle og forsegle et varmerør (heat pipe). Varmerør benyttes for å transportere varme med lave temperaturdifferanser. Ved høye temperaturer er det fordelaktig å ta i bruk kalium som arbeidsmedium i varmerør.

I denne rapporten er det utarbeidet en metode for sikker vakuuering, fylling og forsegling av et varmerør med kalium som arbeidsmedium. Det er i tillegg utviklet en prosedyre for hvordan hele prosessen skal gjennomføres.

En turbomolekylærpumpe skal brukes for å generere vakuu, og sammen med varmeelement utgasse varmerøret. Et påfyllingskammer benyttes for å smelte og overføre kalium, mens induksjonssveising skal benyttes for å forsegle varmerøret. Med prosedyren som er utviklet er det ventet at man vil få et lekkasjefritt varmerør med veldig ren kalium som arbeidsmedium.

Det andre målet med denne oppgaven er å utarbeide en numerisk beregningsmo- dell for strømming i porøse medium. Beregningsmodellen skal kunne vise effekten av ujevnt varmepådrag på strømmingen i veken. Et høyt varmepådrag i et lite område av veken vil gi mye avdamping i dette området. Dette vil føre til at man får 3D strømming. På grunn av at tykkelsen til veken er veldig liten, er det ventet at man får lite variasjon i tykkelsesretningen, og modellen kan forenkles til 2D strømming.

Beregningsmodellen som er utarbeidet benytter Darcys lov, i kombinasjon med kontinuitetsligningen for masse, for å beregne det stasjonære trykk- og hastighets- feltet som oppstår på grunn av et varmepådrag. Varmepådraget kan være uniformt eller ujevnt. Fordelingen av varmefluksen har mye å si for total varmetransportka- pasitet for veken. En varmedistribusjon som fører til en høy fluks øverst i veken vil gi en lavere total varmestrøm enn en tilsvarende varmedistribusjon der den høye fluksen er plassert nede i veken. Det er sett på mange ulike varmepådrag, og effekten disse varmepådragene har på vekekapasiteten.

Summary

The first objective with this thesis is to develop a procedure for evacuation, charging and sealing of a heat pipe. Heat pipes are used to transport large amounts of heat over small temperature differences. At high temperatures potassium is an excellent working fluid in heat pipes. Potassium has a low saturation pressure at the working temperature of the heat pipe, and the working pressure in the heat pipe is therefore lower than atmospheric pressure.

A method for secure evacuation, charging and sealing of a potassium heat pipe is developed in this report. In addition, a detailed procedure for the whole process has been made. A turbomolecular vacuum pump is used for the evacuation, while 'wrap around heaters' heat the heat pipe for outgassing purposes. A fill chamber store and melt potassium, and facilitate charging of the heat pipe. The heat pipe is sealed by induction welding. The developed procedure will produce a leak free heat pipe with a pure working fluid.

The second objective of this thesis is to develop a numerical model that can calculate fluid flow in porous media. The model must be able to account for the effect of an uneven heat flux on the fluid flow. A high heat flux in a small area will lead to increased evaporation in that area. This will cause 3D fluid flow. Because of the small thickness of the wick, the flow can be approximated as 2D.

The model is derived from Darcy's Law and the continuity equation for mass. The model calculates the pressure- and velocity fields that develop because of a heat flux. The model can handle uniform and uneven heat fluxes.

The heat flux distribution has a big impact on the total heat transport capacity of the wick. A high heat flux on the upper portion of the wick will cause a lower heat transport capacity for the wick than a similar high heat flux in the lower part of the wick. The effect of many different heat flux distributions has been calculated and discussed in this report.

Innhold

1	Utgassing, påfylling og forsegling av varmerør	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Litteraturgjennomgang	3
1.2.1	Heat Pipes	3
1.2.2	Heat Pipe Science and Technology	4
1.2.3	Filling and sealing sodium heat pipes	5
1.2.4	Diskusjon	6
1.3	Konsept	7
1.3.1	Vakuumering og utgassing	7
1.3.2	Påfylling	8
1.3.3	Forsegling	9
1.3.4	Sikkerhet	10
1.3.5	Oppsummering	12
1.4	Utarbeidelse av Prosedyre	13
1.4.1	Vakuumering	13
1.4.2	Krav til utgassingsvarighet og -temperatur	17
1.4.3	Oppvarmingsmetoder for å oppnå utgassingstemperatur	23
1.4.4	Påfylling	34
1.4.5	Forsegling	43
1.5	Komponentvalg og riggoppsett	45
1.5.1	Riggoppsett	45
1.5.2	Komponentvalg	45
1.6	Vakuuerings-, påfyllings- og forseglingsprosess	51
1.7	Sikkerhet	53
2	Vekestrømning - Numeriske beregninger	54
2.1	Strømning i porøse medier	54
2.2	Beregningsmodell	56
2.3	Resultat av numeriske beregninger	62
3	Konklusjon og forslag til videre arbeid	68
4	Vedlegg	70

Figurer

1.1	Vakuumkanmer benyttet i <i>Heat Pipes</i> [2]	4
1.2	Påfyllingsrigg vist i <i>Heat Pipe Science & Technology</i> [1]	5
1.3	Tidlig diagram over vakuumriggen	13
1.4	Andel fremdeles adsorbent CO ₂ -gass plottet mot tid	19
1.5	Overflateplott av stasjonær temperatur med direkte elektrisk oppvarming	25
1.6	Energistrømmer som er tatt med i temperaturberegning av varmerøret og vakuumkanmeret	28
1.7	Temperatur til vakuumkanmeret som funksjon av konvektivt varmeovergangstall	30
1.8	Termogravimetrisk forsøk utført på nikkelpulver [17]	32
1.9	Prinsipiell skisse av påfyllingskammeret	34
1.10	Kraftbalanse for en halvkule av kalium	35
1.11	Overtrykk som trengs for å overvinne overflatespenningen ved ulike rørradier	36
1.12	Dråper kan ha større diameter enn røret	37
1.13	Maksimal dråpestørrelse for ulike rørradier	38
1.14	Den laveste temperaturen avhenger av grensetemperaturen og varmetap	39
1.15	Temperaturfordeling i påfyllingsstuss	41
1.16	Temperaturforløp i påfyllingsstuss	41
1.17	Skisse over endelig oppsett av påfyllingsriggen	46
1.18	Vakuumkanmer	47
1.19	Oversikt over induksjonsspoleposisjon	48
1.20	Påfyllingskammer	49
1.21	Oversikt over ventiler og varmekretser	51
2.1	Grensebetingelser	59
2.2	Posisjon for gjennombrenning for de ulike beregningene	63
2.3	Resulterende totalt trykkfelt for høyfluksposisjoner 1, 2, 3, 4, 5, og 6, hvor høy fluks er 10 ganger normal fluks	64
2.4	Resulterende totalt trykkfelt for høyfluksposisjon 1, 2, 3, 4, 5, og 6, hvor høy fluks er 300kW/m ²	65

Tabeller

1.1	Adsorpsjonsenergi for ulike gasser i kontakt med nikkel [8, side 223].	17
1.2	Fordampningsenergi for ulike gasser ved kokepunktet eller 273K, hentet fra <i>Heat and Mass transfer</i> [14, side 842/843]	18
1.3	Overflateareal inne i varmerøret	20
1.4	Varmestrømmenes plassering i forhold til figur 1.6	29
1.5	Varmetap for inertgasskammer	31
1.6	Grensebetingelser for numeriske beregninger for påfyllingsrør	40
1.7	Grensebetingelser for numeriske beregninger for påfyllingsstuss	40
1.8	Sveiseparametre som ble valgt for de ulike prøvene	43
2.1	Geometriske mål og vekeegenskaper	62
2.2	Maksimal gjennomsnittlig varmekraft for ulike høyfluksposisjoner, hvor høy fluks er definert som 10 ganger normal fluks	63
2.3	Maksimal gjennomsnittlig varmekraft for ulike høyfluksposisjoner, hvor høy fluks er $300\text{kW}/\text{m}^2$	66
2.4	Maksimal varmekraft i en hotspot	67

Nomenklatur

α	Absorbans [-] eller Kilde/sluk-funksjon [kg/m ² s]
Δx	Distanse mellom celler x-retning [m]
Δy	Distanse mellom celler y-retning [m]
\dot{j}_{des}	Desorberte partikler per tidsenhet [partikler/s]
\dot{m}	Massestrøm [kg/s]
\dot{m}_m	Maksimal massestrøm gjennom bunnen av veiken [m/s]
\dot{Q}	Varmestrøm [J/s]
\dot{q}_m	Massestrøm [kg/s]
\dot{q}_{pV}	pV strømmingn [mbar l/s]
ϵ	Emissivitet [-]
μ	Viskositet [Pa/s]
\bar{c}	Gjennomsnittlig termisk hastighet [m/s]
ϕ	Porøsitet [-]
ρ	Massetetthet [kg/m ³]
σ	Overflatespenning [N/m]
σ_c	Kondensasjonskoeffisient [-]
σ_{S-B}	Stefan-Boltzmann konstanten [W/m ² K ⁴]
τ	Gjennomsnittlig oppholdstid [s]
τ	Transmissivitet [-]
τ_0	Oscilleringsperiode for adsorberte partikler [s]
\tilde{n}	Antall adsorberte partikler [partikler]

\tilde{n}_0	Antall adsorberte partikler ved tid=0 [partikler]
A	Areal [m^2]
C	(Molekylær) Ledningsevne [m^3/s] eller [l/s]
d	Diameter [m]
E_{des}	Desorpsjonsenergi [J]
f	Fraksjon fremdeles adsorberte partikler [-]
$F_{a \rightarrow b}$	Formfaktor, fra a til b [-]
g	Gravitasjonsakselerasjon [m/s^2]
h	Konvektivt varmeovergangstall [W/m^2K] eller høyde [m]
I	Elektrisk strøm [A]
K	Permeabilitet [m^2]
l	Lengde [m]
p	Trykk [Pa]
p_w	Arbeidstrykk [mbar]
p_{sat}	Damptrykk [Pa]
$p_{w,ultimate}$	Ultimat arbeidstrykk [mbar]
R	Elektrisk motstand [Ω]
R	Universal gasskonstant [J/molK]
r/R	Radius [m]
R_s	Gasskonstant [J/kgK]
r_{eff}	Effektiv radius [m]
S	Pumpekapasitet [l/s]
S_{eff}	Effektiv pumpekapasitet [l/s]
T	Temperatur [$^{\circ}C$] eller [K]
t	Tykkelse [m]
T_w	Veggtemperatur [K]
u	Hastighet i x-retning [m/s]
V	Volum [m^3]

v	Darcy-hastighet [m/s]
v	Hastighet i y-retning [m/s]
v_0	Oscillasjonsfrekvens for adsorberte partikler [Hz]

Kapittel 1

Utgassing, påfylling og forsegling av varmerør

1.1 Bakgrunn

Varmerør er veldig effektive varmeledere, og er brukt der man må transportere mye varme ved små temperaturdifferanser. Varmerør fungerer ved at et arbeidsmedium gjennomgår en syklus av kondensering og fordampning i hver ende av varmerøret. Det er en dampstrøm fra fordamper til kondensator, og en væskestrøm fra kondensator til fordamper. Dampstrømmen er drevet av en trykkdifferanse som oppstår på grunn av kondenseringen og fordampingen. Væskestrømmen er drevet av kapillærkrefter forårsaket av en veke, i tillegg til gravitasjonskrefter hvis varmerøret er plassert vertikalt.

Varmerøret som skal utvikles skal bruke kalium som arbeidsmedium. Kalium er et alkaliemetal og er fast stoff ved romtemperatur. Kalium har et smeltepunkt på $63,4^{\circ}\text{C}$ og er veldig godt egnet som arbeidsmedium for varmerør som opererer ved temperaturer mellom 400°C og 600°C . Et varmerør i drift vil ha et trykk som er bestemt av damptrykket til kalium. Ved 600K er damptrykket 98.72Pa [18, side 49].

Det negative med kalium er at det reagerer med vann og luft. Reaksjonsproduktene er uønskede og kan være direkte skadelige for varmerøret. Reaksjonene er også svært eksoterme, og kan føre til eksplosjoner. Det er derfor viktig å være svært forsiktig når kalium behandles, og man bør planlegge all behandling av kalium for å minimere risiko.

Normal drift krever en ren kaliumkomposisjon av flytende fase og dampfase. Urenheter vil føre til følgende problemer:

- Inerte gasser vil ha et gitt volum, gitt av mengden inertgass og trykket i varmerøret. Dette volumet vil fortrenge kaliumdamp, og vil blokkere en del av kondensatoren. Dette vil føre til at man ikke kan kjøle med full kjølekapasitet. Hvis kjølingen er en flaskehals vil dette begrense ytelsen til varmerøret.

- Urenheter i fast form vil blokkere veien. Veien har veldig små porer, og disse vil lett bli blokkert, uansett størrelse på urenheten.
- Urenheter kan reagere med kalium og danne skadelige forbindelser. Kalium superoksid, KO_2 , dannes ved kontakt med luft. KO_2 er veldig oksiderende, og vil føre til en kortere levetid for varmerøret på grunn av korrosjon av nikkelet.

På grunn av disse problemene er det svært viktig med en nøye rengjøring og god vakuumering av varmerøret for å oppnå optimal ytelse og levetid.

Fyllingen av kalium krever også en gjennomtenkt plan for å unngå innføring av urenheter. Den må også kunne utføres uten at man mister vakuumbet, og uten at man setter hele fyllprosessen i fare ved at man får uventet størkning av kalium i rørledningene.

Forsegling av varmerøret er en komplisert prosess. På grunn av det lave damptrykket kreves det en svært god forsegling for å unngå lekkasjer. Dette lave trykket i varmerøret vil føre til at mange klassiske metoder for forsegling ikke kan brukes, da de vil føre til for store lekkasjer. Det at materialet som skal brukes i varmerøret er nikkel fører til flere komplikasjoner, da sveising eller andre prosesser som gjøres under høye temperaturer må gjøres i en inert atmosfære eller under vakuumbet for å unngå dannelse av nikkeloksid.

1.2 Litteraturgjennomgang

Det er funnet flere kilder som gir eksempler på hvordan man kan vakuumere, fylle og forsegle varmerør. De viktigste kildene vil bli oppsummert her for å gi en oversikt over hva som er gjort før. Funnene blir sortert etter kategoriene vakuumering og utgassing, fylling og forsegling.

1.2.1 Heat Pipes av *Reay & Kew*[2]

Heat pipes er en lærebok som gjennomgår mye av utviklingen av varmerør og hvilke fysiske fenomen som styrer varmeoverføringen. Et kapittel er dedikert til produksjon av varmerør, og dette kapitlet inneholder en del om høytemperatur varmerør og hvordan disse kan lages.

Heat pipes anbefaler utgassing for høytemperatur varmerør. Utgassing er en prosess der man desorberer gasser som er løst på overflaten i varmerøret, og er en viktig prosess for å rense varmerøret (Utgassing er altså ikke det samme som vakuumering, da utgassing er noe man gjør med selve varmerøret. Man vakuumerer hulrommet i varmerøret, mens man utgasser selve varmerøret). Utgassing bør gjøres ved en temperatur på over 400°C. Det er ikke nevnt noen anbefalt tid, men generell adsorpsjonsteori sier at det tar lengre tid å desorbere ved lave temperaurer enn høye [8, side 227].

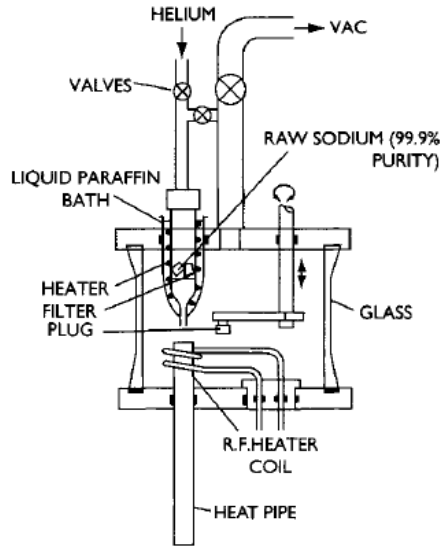
Det er nevnt et eksempel på utgassing av høytemperatur varmerør, der det ble utgasset ved 900°C, ved et trykk på 10^{-5} Torr¹ i 'flere timer'.

Det anbefales å benytte rustfritt stål i påfyllingsrigger, da det er et godt materiale for vakuumering og på grunn av kompatibilitet. For fylling og forsegling er det benyttet en rigg som er vist i figur 1.1. I riggen som vises i figuren blir arbeidsmediet, i dette tilfellet natrium, satt i en påfyllingsflaske. Riggen gjør det mulig å omgå selve påfyllingsflasken når vakuumkanmeret vakuumeres. Først utgasses varmerøret, som er utenfor figuren, deretter varmes arbeidsmediet opp med parafin. Dette fører til at arbeidsmediet smelter. Det presses deretter på varmerøret ved å bruke helium. Riggen som er brukt benytter induksjonssveising for å lukke påfyllingsstussen til varmerøret. En plugg settes i åpningen ved å benytte en gjennomføring som kan overføre bevegelse inn til vakuumkanmeret. Denne pluggen induksjonssveises fast til varmerøret. Etter at varmerøret tas ut av påfyllingsriggen, blir det i tillegg sveist med TIG-sveising for å sikre god tetthet.

Det nevnes ikke spesielle sikkerhetsfarer ved påfyllingen av varmerør, men det er momenter man bør ha i tankene. Ved bruk av alkaliemetaller bør det tas spesielt hensyn hvis man benytter vann i påfyllingsprosessen.

Reay & Kew anbefaler å benytte så rent arbeidsmedium som mulig. Det er en komplisert prosess å rengjøre arbeidsmediet selv, da dette vil kunne kreve destillering. En destilleringssprosess vil føre til at en ekstra destilleringssrigg må bli konstruert, da man vil måtte operere under en inert atmosfære, og over et stort temperaturområde.

¹Torr er en enhet ofte benyttet i vakuumenteknologi. 1 Torr er definert som 1/760 atmosfære, og er omtrent lik det statiske trykket til 1mm kvikksølv. 1Torr er lik 133,3Pa



Figur 1.1: Vakuumkanter benyttet i *Heat Pipes*[2]

1.2.2 Heat Pipe Science and Technology av Amir Faghri [1]

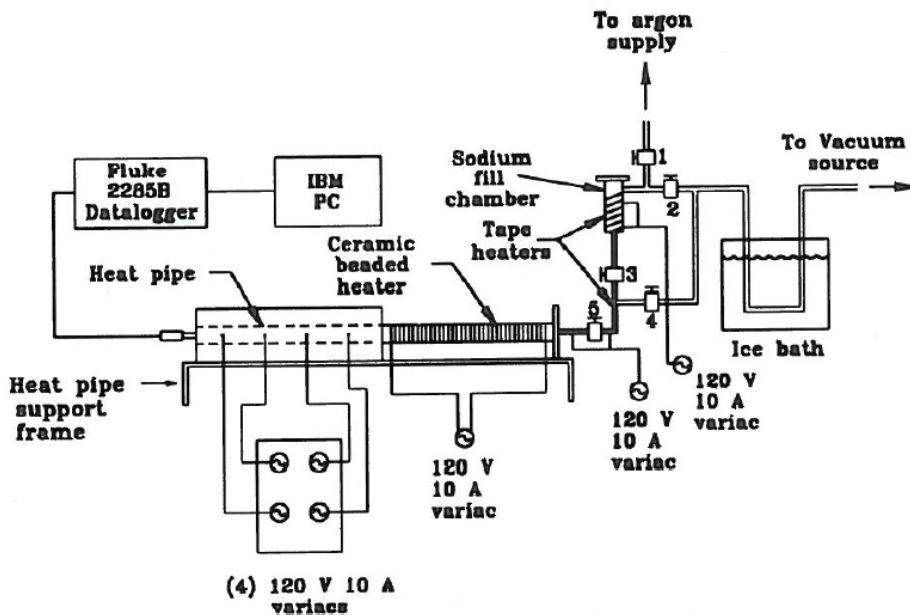
Heat Pipe Technology er enda en lærebok om varmerør, utgitt i 1995. Denne boken gjennomgår, i enda mer detalj enn *Heat Pipes*, teorien bak varmerør. *Heat Pipe Technology* inneholder et helt kapittel om forbehandling av varmerørkomponenter og produksjon av varmerør.

Det stilles store krav til en påfyllingsrigg i boken, og det anbefales å benytte en rigg som kan vakuumere ned til 10^{-7} Torr. Det rådes i tillegg å utgasse ved høye temperaturer. Det nevnes ikke hvilke temperaturer som er benyttet tidligere, men det er oppgitt en utgassingstid på 24 timer.

Påfyllingsriggen til *Faghri* for høytemperatur varmerør er vist i figur 1.2. I denne påfyllingsriggen utgasses først varmerøret, før natriumet smeltes, og presses på varmerøret ved hjelp av argongass. Deretter vakuumeres varmerøret på nytt ned til et trykk som er bestemt av damptrykket til arbeidsmediet. Det er uklart hvordan varmerøret blir forseglert, men det benyttes en ventil i tillegg til et endeløkk som sveises på påfyllingsrøret. Dette sørger for at varmerøret ikke lekker.

Sikkerhetsmessig er det nevnt at alkalimetaller kan reagere kraftig med vann, og at dette kan være eksplosjonsfarlig. Alkalimetaller reagerer også med fukten i luft, og kan brenne ved kontakt med fuktig luft.

Faghri anbefaler å benytte en hanskeboks for å overføre reaktive arbeidsmedier fra leverandørens beholdere over til et påfyllingskammer. Med en inert atmosfære i hanskeboksen unngår man oksidering av arbeidsmediet. Med denne metoden unngår man å forurense arbeidsmediet.



Figur 1.2: Påfyllingsrigg vist i *Heat Pipe Science & Technology* [1]

1.2.3 Filling and sealing sodium heat pipes av *David Stelman* og *John C. Newcomb* [3]

Denne artikkelen handler hovedsakelig om rensemetoder for varmerør for å sikre at oksygennivået holder seg under en gitt grenseverdi. Det er viktig å holde oksygenivået lavt, da oksygen fører til kortere levetid på varmerøret.

Varmerøret og påfyllingsriggen benyttet i denne artikkelen ble bygd i stål. (SAE 304 og SAE 316)

Utgassing av varmerøret ble utført ved 700K. Det står ikke hvor lang tid utgassing var, eller ved hvilket trykk utgassing ble utført ved. Utgassing ble etterfulgt av en påfylling av hele varmerøret med natrium ved 700K i 24 timer. Deretter ble varmerøret tømt og skylt med natrium i 48 timer. Skyllingen av varmerøret ble gjort fordi arbeidsmediet vil reagere med adsorbent gass i varmerøret. Uansett hvor godt man utgasser varmerøret, vil det fremdeles være noe oksygen-gass adsorbent. Dette oksygenet vil kunne reagere med arbeidsmediet. Dette kunne føre til skadelige forbindelser. Varmerøret gjennomgikk flere sykluser med skyllinger og fyllinger, helt til oksygenkonsentrasjonen i natrium som forlot varmerøret var under 8ppm. Systemet som ble brukt for skylling av varmerøret inneholdt over 180kg natrium, og systemet rensa natriumstrømmen. Argongass ble benyttet for å pumpe natrium rundt i systemet.

Varmerøret ble forseglet ved å først varme påfyllingsrøret opp til 1088K, deretter ble 'crimping' benyttet for å gi en midlertidig tetning. Deretter ble påfyllingsrøret

kappet av, og enden forseglet ved å benytte TIG-sveis.

1.2.4 Diskusjon

Metodene som benyttes for å vakuumere, fylle og forsegle varmerøret må ta hensyn til materialet som varmerøret er bygd av. I dette tilfellet er materialet brukt i varmerøret nikkell, og dette vil begrense en del av metodene som er funnet. Ut i fra litteratursøket har det kommet frem at vakuumeringen har to hensikter; det å fjerne uønskede gasser som er inne i varmerøret, og som et ledd i utgassing av varmerøret. Utgassing utføres for å fjerne mest mulig av adsorberte gasser på varmerøret. Det bør derfor utføres en analyse av utgassing for å finne ut hvordan man mest effektivt kan utgasse varmerøret, og få et best mulig grunnlag for et sluttresultat med minst mulig forurensinger.

Påfyllingen gjøres på litt ulike måter i alle kildene. Det brukes både elektrisk varme og termo-oljer for å smelte alkaliemetallene, slik at disse kan presses på varmerør ved bruk av en inertgass. Det er også mulig å destillere arbeidsmediet på varmerøret, men dette er ikke godt dokumentert for høytemperatur arbeidsmedier.

Forseglingen kan utføres på mange måter, men på grunn av materialet benyttet i varmerøret (nikkel) vil noen metoder utelukkes. Induksjonssveising og *crimpinger* alternativer som vurderes praktisk mulig å gjennomføre.

1.3 Konsept

I litteraturgjennomgangen ble det beskrevet tre ulike konsept for å utgasse, fylle og forsegle et varmerør. Det som skiller varmerøret som skal behandles i denne oppgaven fra tidligere varmerør, er at det er produsert i nikkell. Nikkell er en veldig god varmeleder og har gode mekaniske egenskaper selv ved høye temperaturer. Dette er grunnen til at det ble valgt fremfor rustfritt stål, som også er et materiale som er kompatibelt med kalium. Lav termisk ledningsevne og store temperatursvingninger kan føre til store temperaturgradienter som vil føre til termiske spenninger, med nikkell reduseres dette. Nikkell vil oksidere hurtig ved temperaturer over 400 °C. Et lag nikkelloksid vil i teorien ikke være skadelig på utsiden av varmerøret, men nikkelloksid som oppstår i lukkede sveiser vil kunne føre til at man får ekstra urenheter inne i varmerøret. Urenheter i sveisen vil muligens også kunne føre til en porøs og lekk sveis. En annen ulempe ved å benytte nikkell er at det er et relativt lite brukt materiale, og det er derfor lite forkunnskaper og erfaring med bearbeidelse av det.

1.3.1 Vakuumering og utgassing

Alle kildene som omtalte påfylling av arbeidsmedium på varmerør benyttet en eller annen form for vakuumering og desorbering av gasser i varmerøret. Hvis man ikke desorberer disse gassene vil de under drift kunne reagere med kaliumet. På grunn av den høye temperaturen og det lave trykket i varmerøret under drift, vil noe av gassen desorbere og fungere som ikkekondenserbar gass og delvis blokkere kondensatoren, og hindre effektiv kondensering. For å hindre dette må innsiden av varmerøret gjennomgå en desorberingsprosess. Det å desorbere gasser utføres ved å opprettholde et vakuum ved et høyt temperaturnivå. Hvor mye gass man klarer å fjerne i et gitt tidsrom er basert på typen gass, adsorpsjonsenergien, graden av vakuum og temperaturen [8, side 227]. Type gass og adsorpsjonsenergi er faktorer man ikke kan kontrollere, og man må tilpasse temperatur og grad av vakuum for å kunne fjerne de gassene man vil fjerne. Etter en desorpsjonprosess er utført er det viktig at varmerøret ikke utsettes for uønsket gass, da denne gassen fort vil adsorbere på overflaten.

Det fins mange ulike kilder som omtaler utgassing av stål- og aluminiumsvarmerør. Det benyttes ulike kombinasjoner av temperatur, tid, grad av vakuum og varighet. De fleste metodene bruker lang tid på utgassing. Alt fra 40 minutter til 24 timer er dokumentert, ved temperaturer fra 20°C til 900°C. Grad av vakuum for høytemperatur varmerør er fra 10^{-5} torr til 10^{-7} torr [2] [1]. For å desorbere ved lav temperatur, kreves det at man bruker lang tid.

Det er ikke funnet noen kilder som omtaler desorbering av rent nikkell eksponert for luft, men det er funnet desorpsjonsanalyser av legert nikkell, Inconel 600 (72% Nikkell) [4]. Denne studien benyttet temperaturer på over 500°C under vakuumering. I denne kilden ble det i tillegg anbefalt spesifikk overflatebehandling av materialene som skal utgasses. En fin og glatt overflate vil føre til at flaten har mindre overflateareal og dermed minskes kapasiteten for adsorpsjon.

Hvilke temperaturer man kan benytte er begrenset av veken i varmerøret. Veken

er konstruert ved å sintre sammen nikkelpulver. Dette er gjort ved temperaturer under 800°C. Ved å utgasse over sintringstemperaturen vil egenskapene til veken kunne endres. Dette bør unngås.

Det vil bli utført mer eksakte beregninger for å se på følgene av ulike utgassingsprosesser i kapittel 1.4.2

En utgassingsprosess stiller to krav til riggen; vakuum og varme. En komplett påfyllingsrigg må kunne levere dette, i tillegg til andre krav som påfylling og forsegling krever. Graden av vakuum som det tidligere er utgasset varmerør ved, ligger en plass mellom 10^{-5} torr [2] og 10^{-7} torr [1]. Dette vakuuet klassifiseres som middels til høyt vakuum[8, side 22]. Hvis man har ambisjoner om å utgasse ved høyt vakuum må man konstruere hele riggen med dette i tankene. Spesielle ventiler, rør, komponenter, flenser og annet utstyr må benyttes for å minimere lekkasjer av atmosfærisk luft inn i riggen. Høyvakuum krever også bruk av spesielle pumper. Man må i tillegg kjøre flere pumper i serie, da høyvakuumpumper ikke kan pumpe fra høyt vakuum og opp til atmosfærisk trykk i en enhet.

1.3.2 Påfylling

Påfylling av arbeidsmedium på et varmerør kan gjøres på mange ulike måter [5] Man kan overføre arbeidsmediet i dampform, flytende form eller fast form, og det fins ulike metoder for å gjennomføre alle disse på. Kalium må flyttes fra en forseglet pakke fra leverandøren og inn i varmerøret uten å bli oksidert eller å bringe med seg urenheter inn i varmerøret. Dette krever gjennomtenkte metoder. Kalium blir i vårt tilfelle levert i en forseglet hermetikkboks. I denne boksen oppbevares kaliumet i en lukket pose av metall. Det er oppgitt at kaliumet har 'ingot' form, altså at det er en støpt metallblokk. Kalium leveres i blokker på 5g. Siden kalium er i fast form ved romtemperatur, er det mulig at den må varmes opp for å få den ut av pakken. Ved kontakt med oksygen vil kalium oksidere, og ved kontakt med vann eller vanndamp vil kalium reagere og danne hydrogengass og kaliumperoksid. Kontakt med luft og fukt må derfor unngås. Mange av kildene som er funnet benytter 'fill bottles'[5] eller 'fill chambers'[1]. Dette er spesielle beholdere som blir fylt med arbeidsmedium og så satt inn i en påfyllingsrigg. Disse beholderne kan fylles i en inert atmosfære. Faghri [1] benyttet en hanskeboks til forflytning av natrium fra pakken mottatt fra leverandør til påfyllingsflasken. Hanskeboksen var fylt med en inertgass. Det å benytte en hanskeboks for å flytte kaliumet til en påfyllingsflaske er en god ide, og kan anvendes uansett hvilken metode man velger for flytting fra påfyllingsflaske til varmerør.

Når kaliumet er plassert med inertgass i påfyllingsflasken, må man ha en metode for å overføre kaliumet til varmerøret. Siden påfyllingsstussen på varmerøret har en maksimal diameter lik den minste dimensjonen i kanalen i varmerøret, vil det være vanskelig å overføre kalium mens det fremdeles er i fast form. Å overføre kalium i gassform er også mulig, dette vil også føre til at kaliumet gjennomgår en destillasjonsprosess, noe som vil rense kaliumet. Ulempen med å overføre kalium i dampform er at kokepunktet til kalium er 759°C ved atmosfærisk trykk. Dette fører til at man må varme påfyllingsflasken og rør frem til varmerøret til denne temperaturen. Dette vil medføre begrensninger i material- og komponentvalg i

påfyllingsriggen.

Metoden som anbefales er å overføre kalium i væskefase, ved å bruke gravitasjonen og inertgassstrykk til hjelp. Smeltetemperaturen til kalium er $63,61^{\circ}\text{C}$ ved atmosfærisk trykk [18, side 6]. Denne smeltetemperaturen endrer seg lite med trykkendringer ned til trippelpunktet. Denne temperaturen har neglisjerbar innvirkningen på funksjonen til komponenter benyttet i vakuumpplikasjoner. Overføring av arbeidsmedium i væskefase er beskrevet av både Faghri [1] og Reay & Kew [2]. Denne metoden har et lavt kompleksitetsnivå i teorien, og vil føre til færre komponenter enn destillasjonsfylling.

1.3.3 Forsegling

Varmerøret vil operere ved veldig lave trykk. Dette vil føre til at man får en trykkdifferanse på ca 1 atmosfære over forseglingen. All gass som lekker inn vil få et relativt stort volum på grunn av det lave trykket, og dette fører til at kondensatoren kan bli fylt av ikkekondenserbar inertgass. I tillegg vil lekket oksygen kunne reagere med kalium, noe som vil føre til kortere levetid for varmerøret. Det at gass lekker inn kan altså føre til at varmerøret ikke vil fungere som forutsatt. Derfor er det viktig å forsegle varmerøret på en slik måte at man får en neglisjerbar gasslekkasje.

Det vanligste oppsettet er å koble varmerøret direkte til påfyllingsriggen med en påfyllingsstuss, og den vanligste metoden for å forsegle vanlige varmerør på, er å klemme denne påfyllingsstussen sammen. Dette kalles 'crimping' og er en midlertidig forsegling. Deretter kuttet påfyllingsstussen, og en sveis legges for å forsegle varmerøret helt[5]. Denne metoden fungerer fint for varmerør som benytter arbeidsmedier som opererer ved høyere trykk. Det høyere trykket i varmerøret fører til at lekkasjen gjennom den flatklemte delen av forseglingen er liten. På grunn av det høyere trykket vil også denne lekkasjen føre til et mindre volum enn i et tilsvarende varmerør som opererer ved et lavt trykk. Denne metoden er ikke like egnet for varmerør med kalium som opererer ved lavt trykk, hvis ikke lekkasjen som oppstår før påfyllingsstussen sveises igjen er neglisjerbar.

Stelman og Newcomb[3] benyttet denne metoden for høytemperatur varmerør. Varmerøret var i deres tilfelle laget av rustfritt stål og benyttet natrium som arbeidsmedium. Varmerøret gjennomgikk en varmebehandling ved 800°C før det ble *crimpet*. Det ble utført lekkasjetester under forseglingsforsøkene, og det ble utarbeidet en metode for effektiv forsegling som førte til en lekkasjerate som var neglisjerbar. Hvis denne forseglingsmetoden skulle blitt utført på et varmerør av nikkell, ville det blitt dannet nikkelloksid under varmebehandlingen, dersom den ikke hadde blitt utført under inertgass eller vakuu.

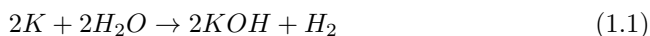
Faghri [1] benyttet en annen metode for å forsegle varmerør. Her ble en ventil på påfyllingsstussen brukt for å sikre at man ikke fikk lekkasjer. Etter at ventilen på påfyllingsstussen ble lukket, ble påfyllingsstussen kuttet og påsveist et endeløkk. Varmerøret i dette tilfellet var konstruert av stål. Hvis en tilsvarende løsning skulle blitt utført med nikkell, måtte man enten ha en ventil av rent nikkell, noe som ikke finnes, eller så måtte man ha en stål-nikkellsveis, som ville føre til termiske spenninger.

Reay&Kew [2] omtalte en annen metode for påfyllingsriggen. Det ble benyttet et varmerør med en påfyllingsstuss. Denne påfyllingsstussen ble utstyrt med en flens og festet til et vakuumkammer som var tilkoblet en påfyllingsrigg. Dette gjorde det mulig å fylle varmerøret uten å danne en permanent kobling mellom riggen og påfyllingsstussen. Når påfyllingen var utført ble en plugg satt på den åpne påfyllingsstussen. Denne ble deretter sveist fast ved induksjonssveising. Sveisingen ble altså gjort under vakuum.

Metoden for forsegling som ser mest lovende ut for vår anvendelse er metoden med induksjonssveising [2]. Denne metoden har vært utført tidligere, den vil ikke føre til nikkeloxyd dannelse, og det eksisterer arbeidsgrupper med induksjonssveiserfaring på Gløshaugen.

1.3.4 Sikkerhet

Kalium er som nevnt et alkaliemetall og ved romtemperatur er det i fast form, smeltetemperaturen er ca 64°C ved atmosfærisk trykk. Ved kontakt med vann vil kalium reagere med vannet og danne hydrogengass og kaliumhydroksid, vist i kjemiske reaksjon (1.1).



Denne reaksjonen er eksoterm, og vil danne nok energi til å antenne hydrogengassen hvis nok oksygen er til stede. Ved kontakt med tørr luft vil kalium reagere med oksygen og danne kaliumoksid. Kjemisk reaksjon er satt opp i (1.2) og (1.3)



Kaliumoksid er i fast form ved romtemperaturer, og smelter/dekomponerer ved rundt 350°C. Kaliumoksid har en blek gul farge. Hvis kaliumoksid kommer i kontakt med vann vil det reagere kraftig, og danne hydrogen og kaliumhydroksid, (1.4):



Denne reaksjonen er også eksoterm, og vil danne varme som kan antenne hydrogengass hvis det er oksygen tilstede.

På grunn av reaksjonene som kan oppstå må kontakt med oksygen og vann hindres. Kaliumet som er blitt levert har ukjent renhet (metallisk renhet er kjent, og er 99,95%, men det er ukjent om kaliumet har reagert med reaktiv luft eller andre stoffer). Det er antatt at det er 100% rent kalium man har mottatt, selv om det kan dannes kaliumoksid under lagring.

Det er planlagt et påfyllingskammer for påfyllingsriggen. Dette kammeret skal fylles med kalium, før den settes inn i påfyllingsriggen. Påfyllingen av kalium i påfyllingskammeret skjer med en inert atmosfære av argon. En ideell påfyllingsprosess vil være følgende: Man får kalium levert og satt inn i en hanskeboks med inertgassatmosfære. Deretter setter man påfyllingskammeret inn i hanskeboksen. Man tar kaliumet ut av forseglingen sin, ved å smelte kaliumet. Deretter fylles påfyllingskammeret, før det forsegles. Kammeret inneholder da kalium og inertgass

ved atmosfærisk trykk. Påfyllingskammeret tas nå ut av hanskeboksen og settes inn i påfyllingsriggen. Riggen vakuumeres, og dermed vil nesten all luft fjernet fra systemet, mengden luft som ikke fjernes er bestemt av minimumstrykket vakuumpumpen kan produsere. Man smelter kaliumet og fyller varmerøret som deretter forsegles. Kontakten med luft er minimal, og vil eventuelt være forårsaket av urenheter, lekkasjer og resterende luft i vakuumkretsen.

Det kan oppstå uhell og ulykker ved flere punkter i denne prosessen, de kan deles inn i to kategorier; kontakt med vann og kontakt med luft.

- En reaksjon mellom kalium og luft er ikke kritisk i forhold til sikkerheten hvis luftfuktigheten er lav. Hvis det ikke er noen større kilder til fuktighet i området rundt påfyllingsriggen, er det rimelig å anta at luftfuktigheten vil være lav, fordi forsøkene skal gjøres på vinteren, og kald luft som kommer inn vil ha lav luftfuktighet. Kalium kan ha reagert med oksygen og dannet kaliumoksid under lagring eller ved lekkasjer gjennom påfyllingskammeret. Reaksjonshastigheten til kjemisk reaksjon (1.2) og (1.3) er avhengig av temperaturen. Ved små lekkasjer antas det at reaksjonshastigheten er så lav at temperaturen ikke øker. Ved større uhell kan kalium komme i direkte kontakt med luft. Dette vil kunne føre til at kaliumoksid dannes i akselererende hastighet, kaliumet vil altså brenne. Dette vil også føre til at hydrogenet og oksygenet i luften vil antenne. Hydrogengass er eksplosiv i luft i volumkonsentrasjoner mellom 4% og 74%, selvantennelsestemperaturen til hydrogengass i luft er 500°C [27, side 402].
- Kontakt med vann er mer alvorlig. Kontakt med vann kan skje hvis man får en uventet høy oppvarming av induksjonsspølen, enten på grunn av for høy effekt eller sviktende kjøling. Man kan da få en gjennombrenning av induksjonsspølen, med medfølgende lekkasje av vann² inn i vakuumkanammeret, på utsiden av varmerøret. Varmerøret er under slike forhold plugget, og selv om det ikke er en sveiset forsegling vil denne forseglingen hindre direkte kontakt mellom kalium og vann. Hvis lekkasjen er av en slik art at forseglingen brytes, vil kalium og vann kunne reagere. Dette vil føre til hydrogengassproduksjon. Denne hydrogengassen vil ikke kunne reagere med oksygen, da man ikke ha oksygen inne i vakuumsystemet. Det vil kreve en oksygenlekkasje i tillegg til vannlekkasje for å få en knallgasseksplosjon.

Ved bruk av 10g kalium i varmerøret vil det potensielt kunne dannes 0,26g hydrogengass, dette tilsvarer tre liter hydrogengass ved standard temperatur og trykk. Det vil da i en reaksjon mellom hydrogengass og oksygen slippes løs en energimengde på 15,5kJ, og kalium-vann reaksjonen vil slippe løs en energimengde på 50,27kJ. Disse reaksjonene er altså veldig eksoterme, og vil danne betydelige mengder varme. Dette er mye energi, men den har bare potensialet til å slippes løs i en kort periode under fyllingen. Det kan derfor planlegges rundt dette, ved å installere ekstra sikkerhetsutstyr som skal benyttes under forseglingen.

²Vann er det vanligste kjølemidiet i induksjonsspøler, men luft kan benyttes i noen tilfeller. Det er ukjent om luft kan benyttes vår induksjonsspøle

1.3.5 Oppsummering

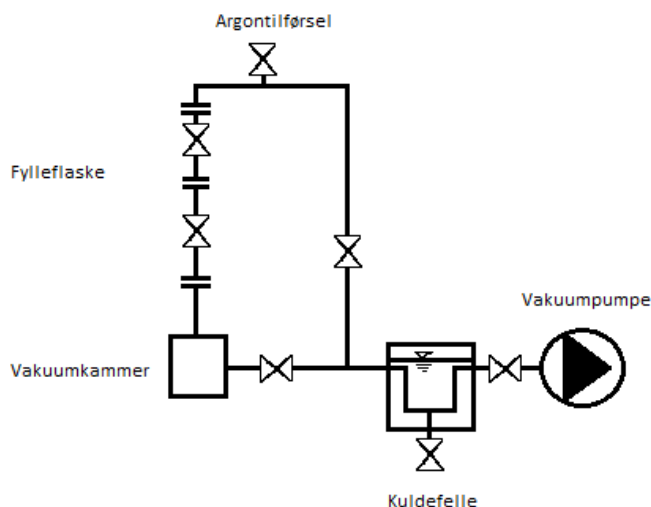
Ut i fra metodene og valgene beskrevet for utføringen av oppgavene, ble det bestemt at metoden til Reay&Kew [2] skulle benyttes og modifiseres til bruk for varmerøret som skal lages.³

Påfyllingsmetoden måtte endres litt for å kunne implementere påfyllingskammer som kan påfylles i en hanskeboks. Dette førte til at kaliumet får mindre mulighet til å oksidere. Inertgassen som benyttes vil være argon, da det er denne gassen som benyttes i hanskeboksen som er tilgjengelig. Denne metoden ble hovedsakelig valgt på grunn av forseglingsløsningen. Et diagram over påfyllingsriggen som er basis for planleggingen er lagt ved i figur 1.3.

³Hvis røret kunne blitt forseglet godt nok med crimping med medfølgende sveising, og dette kunne blitt utført utenfor vakuum og inertgass uten at det oppstod korrosjon, hadde dette vært en enklere metode. Den hadde ført til mindre krav til utstyr og testing. Vakuumering hadde også blitt enklere og billigere.

1.4 Utarbeidelse av Prosedyre

Før man kan fastsette en prosedyre for hele påfyllingsprosessen, må flere beregninger gjøres. Man må vite hvor lang tid man må vakuumere, ved hvilken temperatur og ved hvilket vakuum. Man må beregne hvordan man skal varme opp varmerøret. Materialvalg i riggen må begrunnes og prosessdiagram må bestemmes. Valg av metode for påfyllingsprosessen fører til at store deler av kravene til riggen er gitt. Man trenger et vakuumkanter, man trenger rør for å overføre kalium og for å trekke vakuum. Forseglingmetoden krever et system for å flytte en propp på plass i påfyllingsstussen etter fylling, og man trenger et system for oppvarming. Det er tatt utgangspunkt i figur 1.3. Denne figuren er en blanding av prosessdiagram fra *Heat Pipe Science and Technology*[1] og er modifisert til å benytte forseglingmetoden i Reay og Kew [2] for et varmerør av nikkel.



Figur 1.3: Tidlig diagram over vakuuriggen

1.4.1 Vakuumering

Utgangingen vil kreve et vakuum som ligger en plass mellom 10^{-5} Torr og 10^{-7} Torr [2],[1]. Dette vakuomet kreves for å kunne desorbere gasser, og for å sikre at mengden gass som blir igjen i varmerøret etter vakuumering er neglisjerbart. For å skape et høyt vakuum, kreves det spesielle konstruksjonsløsninger og materialvalg i de delene som skal holde vakuomet ved like.

Materialer som skal brukes i vakuumsammenheng bør oppfylle følgende krav for å være egnede til bruk i vakuumsystemer[6];

- Damptrykket til materialet må være mye lavere enn driftstrykket.

- Gassdannelsen fra materialet under driftsforhold bør være minimalt.
- Materialet må ha lav diffusjonskoeffisient.
- Materialet bør være motstandsdyktig mot korrosjon.
- Materialet bør være egnet til bruk ved så høye temperaturer som utgassingene krever.

Materialer som skal brukes i riggen må i tillegg være kompatible med kalium. Reaksjoner med kalium kan føre til gassdannelse og lekkasjer. Materialer som er kompatible med kalium og som er egnet til vakuumpåfyllinger er rustfritt stål(304,316,347) [6] [2] og glass. Nikkel kan i teorien også benyttes, men det har en høy innkjøpspris og er ikke hyllevare.

Stort sett er det fordelaktig å bruke glass. Borsilikaglass har lav termisk utvidelseskoeffisient og vil fungere bra opp til ca 500°C. Glass er også relativt enkelt å bruke sett fra et produksjonsperspektiv, da det er enkelt å sammenføre og mange komponenter er hyllevare.

Basert på konsultasjon med Rolf Dahl[20] og Reidar Tellebon [22] ved EPT, ble det bestemt at vakuumpåfyllingskammeret skal bygges i glass. Glass vil også være materialet i påfyllingskretsen. Det er tilgjengelige glassrør med stor nok indre diameter til å fungere som vakuumpåfyllingskammer, og det er derfor planlagt å benytte et sylindrisk glassrør som vakuumpåfyllingskammer. Siden eventuelle kuldefeller og vakuumpumper er av metall og benytter metallflenser, er det naturlig at man bruker en glass-metall overgang mellom pumpene og vakuumpåfyllingskammeret, og at mesteparten av denne rørkretsen er av metall.

Vakuumpåfyllinger krever spesielle flenser. Flenser benyttes for å kunne koble av og på deler, og for å være hindre store lekkasjer. Det er planlagt å benytte to typer flenser i påfyllingsriggen:

- CF-flenser er flenser som vanligvis bruker kobber som pakning. Disse flensene har svært lave lekkasjerater når de er montert på korrekt vis. Pakningen må byttes ut etter hver demontering, da de bare kan brukes en gang. CF-flenser fins hovedsakelig i rustfritt stål (304 og 316), og det er ikke vanlig å produsere disse i glass. CF-flenser er vanskeligere å åpne og lukke enn KF-flenser, men har mindre lekkasjerate. Vanlig kobber kan angripes av basiske forbindelser, og det er derfor fordelaktig å benytte spesielle pakninger der flensen er i direkte kontakt med flytende kalium. Det er funnet pakninger av nikkel 201, det samme materialet som varmerøret er produsert i. Bruk av nikkel som pakning er ikke fordelaktig for levetiden til selve CF-flensen⁴, og det kan være vanskelig å opprette en god nok vakuumpåfyllingskammer med harde materialer, da de ikke vil deformere på en slik måte at tetthet oppstår.
- KF-flenser er flenser som benytter spesielle gummipakninger, vanligvis er gummien et elastomer. På grunn av at gummi krever lavere trykk for å oppnå

⁴Harde pakningsmaterialer gjør at kutteflaten i flensen slites fortere enn ved bruk av myke materialer som kobber. Hvis kutteflaten er sløv, vil dette føre til høyere lekkasjerate

tetting, kan man benytte spesielle innspenningsmetoder for å gjøre koblingen enkel å montere/demontere. Vanlige elastomerer som Viton og Kalrez er ikke kompatible med flytende kalium[7], og vil ikke egne seg til bruk i flenser og ventiler som blir utsatt for det. På grunn av at nødvendig kompresjons-trykk er mindre, har man mulighet til å benytte andre materialer i flensen, og flenser i glass blir produsert.

Alle operasjonene som skal gjøres inne i vakuumkanteret fører til at man trenger gjennomføringer for strøm, termoelement, trykkmåling, induksjonsspoler og bevegelse. Dette gjøres ved å benytte spesielle glass-metall overganger og flenser.

Et høyt vakuum vil kreve høyvakuumpumper. Det er planlagt å benytte en turbomolekylærpumpe fra Aerlikon Leybold Vacuum [28]. Denne pumpe kan generere et minstetrykk på ca 10^{-7} torr, og har en pumpekapasitet på 65 l/s. En høy kapasitet er fordelaktig med hensyn til tiden det tar å oppnå vakuumnivået man vil ha. Det er i tillegg viktig å ha en høy molekylær ledeevne på rørstrekking mellom pumpene og vakuumkanteret for å nå ønsket grad av vakuum. Ledeevne er definert i ligning (1.7), og vil bli forklart nærmere nedenfor. En lang rørstrekking og tynne rør vil føre til at det vil ta lang tid å pumpe ned til minstetrykket, og det er mulig at man ikke oppnår ønsket trykk på grunn av lekkasjer. Arbeidstrykket i et vakuumsystem er bestemt av ligning (1.5) [8, side 821].

$$p_w = \frac{\sum \dot{q}_{pv}}{S_{eff}} + p_{w,ultimate,S}[\text{mbar}] \quad (1.5)$$

I denne ligningen er p_w arbeidstrykket, $\sum \dot{q}_{pv}$ er summen av lekkasjer inn i vakuumkanteret, S_{eff} er effektiv pumpekapasitet og $p_{w,ultimate,S}$ er det ultimate minstetrykket til vakuumpumpen. $\sum \dot{q}_{pv}$ er pV strømming med benevning [mbar l/s]. Denne ligningen baserer seg på at man har et vakuumkanter med lekkasjer og et rørstrekking til vakuumpumpen. Man må derfor anta at alle lekkasjene er i vakuumkanteret.

Massestrøm er konvertert til pV strøm ved å benytte ligning (1.6);

$$q_m = \frac{q_{pV}}{R_s T}, R_s = \frac{R}{M} \quad (1.6)$$

Det ultimate arbeidstrykket bestemmes av høyvakuumpumpen. Det er dette trykket som vil genereres under ideelle forhold. Det ultimate trykket til den valgte turbopumpen er ca 10^{-7} mbar. Gasslekkasjene kan til en viss grad beregnes ut i fra materialene og komponentene i riggen. Utgassingsraten til vanlige materialer er funnet i forsøk og gjengitt i litteratur, mens lekkasjeratene til pakninger er gitt av leverandørene. Effektiv pumpekapasitet er en funksjon av ledningsevnen (konduktansen) til vakuumsystemet. Ledningsevnen er bestemt av ligning (1.7).

$$C = \frac{\dot{q}}{p_1 - p_2} \quad (1.7)$$

Her er C ledningsevnen, $p_1 - p_2$ trykkdifferansen, og \dot{q} er fluksen. Hvis pV strømming er benyttet og trykket er i Pascal, har ledningsevnen benevning [m^3/s].

Ledningsevnen sier altså hvor stor volumstrøm man kan få med en gitt trykkforskjell, for en gitt rørstrekning. Ledningsevnen for rette rør er gitt av diameteren og lengden på røret. Ventiler, flenser og bend vil senke ledningsevnen. Ved molekylærtransport, som er strømningsmekanismen ved lave trykk, er det veldig viktig at rørene er korte, og at man har en stor diameter.

Det man har å gå ut i fra når man skal beregne en anbefalt diameter på rørene i riggen, er diameteren og lengden på påfyllingsstussen. Påfyllingsstussen har en planlagt indre diameter på 7 mm og lengden er planlagt å være rundt 100 mm. Ledningsevnen for sirkulære rør med lengde l og diameter d kan beregnes ut i fra ligning (1.8) og (1.9), [8, side 40/136].

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8R_s T}{\pi}} [m/s] \quad (1.8)$$

$$C = \frac{\pi \bar{c} d^2}{16} \frac{14 + 4\frac{l}{d}}{14 + 18\frac{l}{d} + 3\frac{l^2}{d^2}} [m^3/s] \quad (1.9)$$

Ligningen gir en ledningsevne på $3,58 \cdot 10^{-1}$ l/s i påfyllingsstussen.

Hvis man antar at inn- og utløpseffekter er neglisjerbare, kan man beregne total ledningsevne for seriekoblede komponenter ved å benytte ligning (1.10) [8, side 88].

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (1.10)$$

En rørlengde på 0,5m med indre diameter på ca 16mm (DN16) vil gi en ledningsevne på ca 1 l/s. Med denne ledningsevnen blir den totale ledningsevnen for et seriekoblet rørstrekk 0,26 l/s.

En rørlengde på 50 cm med indre diameter på ca 40mm (DN40) vil ha en ledningsevne på ca 11 l/s. med denne ledningsevnen blir den totale ledningsevnen for et seriekoblet rørstrekk 0,35 l/s. En tidobling i ledningsevne i rørstrekket på 0,5 m vil altså gi en økning i total ledningsevne på ca 33%.

Effektiv pumpehastighet bestemmes nå ut i fra ligning (1.11) [8, side 89]

$$S_{eff} = \frac{S}{1 + \frac{S}{C}} \quad (1.11)$$

Her er S teoretisk pumpekapasitet til vakuumpumpen. Teoretisk pumpekapasitet for turbomolekylærpumpen er omtrent 65 l/s. Dette vil føre til en effektiv pumpehastighet på 0,26 l/s for DN16 rør og 0,35 l/s for DN40 rør.

Lekkasjeraten for viton pakninger er oppgitt å være $<10^{-9}$ mbar l/s per pakning. Sublimasjon fra kalium er beregnet ut fra ligning (1.12), som er hentet fra [8, side 75]

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{2\sigma_c p_{sat}}{\pi \bar{c}} \quad (1.12)$$

Sublimasjon av kalium er beregnet å være $1,8 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s. Det er da antatt en temperatur på 25°C, trykket er damptrykket ved denne temperaturen ($2,537 \cdot 10^{-8}$ mbar [18]), σ_c som er en kondensasjonskoeffisient er antatt å være lik 1,

Tabell 1.1: Adsorpsjonsenergi for ulike gasser i kontakt med nikkel [8, side 223]

Gass i kontakt med nikkel	Adsorpsjonsenergi
H_2/H	1,3eV
O_2/O	5,5eV
CO	1,3eV-1,8eV
CO_2	1,9eV
N_2	0,22eV-0,44eV [29]

og arealet er antatt å være 72 cm^2 (Dette er overflatearealet til 12 kuber med sideflater på 1 cm. 10g kalium er ca 12 cm^3). Denne sublimeringsraten er veldig usikker, da det er vanskelig å vite korrekt areal. Det er i tillegg antatt at det som sublimerer ikke vil rekondensere (kondensasjonskoeffisient er satt til 1). Arbeidstrykket som funksjon av sublimeringsraten beregnet ovenfor er høyere enn damptrykket til kalium. Arbeidstrykket vil være lavere i virkeligheten, da rekondenseringsraten øker med trykket (rekondenseringsraten er neglisjert i ligning (1.12)). Hvis kaliumsublimasjon er den eneste lekkasjen vil arbeidstrykket være en plass mellom minstetrykket til pumpen og damptrykket.

Hvis man antar at det vil være 5 vitonflenser og 5 ventiler med vitonpakninger, vil dette kunne summeres opp til en lekkasjerate på $< 10^{-8}$ mbar l/s. Lekkasjene gjennom CF-flenser neglisjeres, da disse vil være mye mindre enn lekkasjen gjennom vitonpakningene.

Hvis man antar at arbeidstrykket er summen av damptrykket til kalium og trykket som oppstår på grunn av lekkasjene gjennom pakninger (Altså arbeidstrykket som blir beregnet ut i fra ligning (1.5) med lekkasjeraten som oppstår på grunn av pakninger summert med damptrykket til kalium), vil man få et arbeidstrykk på $1,64 \cdot 10^{-7}$ mbar med DN16 rør og $1,53 \cdot 10^{-7}$ mbar med DN40 rør. Arbeidstrykkene viser at det ikke er mye å hente ved å øke rørdiameteren i rørstrekket til vakuumpumpen over 16mm. Et trykk på $1,64 \cdot 10^{-7}$ mbar anses som lavt nok til våre formål.

Lavere ledningsevne og høyere lekkasjerate vil føre til et høyere arbeidstrykk. Man vil kunne få lavere trykk i påfyllingsriggeren og varmerøret ved å lukke påfyllingskammeret under utgassing.

1.4.2 Krav til utgassingsvarighet og -temperatur

Molekyler adsorberes på overflater på grunn av dipolkrefter eller van der Waals krefter, såkalt fysisk adsorpsjon. Molekyler adsorbert ved hjelp av kovalente bindinger kalles kjemisk adsorpsjon. Energien som partikler er bundet fast med kalles adsorpsjonsenergi eller adsorpsjonsvarme. Energien til kjemisk adsorpsjon er fra 2 til 20 ganger større enn for fysikalsk adsorpsjon. Adsorpsjonsenergi er ulik for ulike kombinasjoner av adsorbater og adsorbenter. I Tabell 1.1 er adsorpsjonsenergi for ulike gasser i kontakt med nikkel listet opp. Verdiene for adsorpsjonsenergi er hentet fra [8, side 223]. En elektronvolt (eV) er ekvivalent med $96,2 \text{ kJ/mol}$ [8, 223].

Gassene i Tabell 1.1 utgjør mesteparten av gassene som desorberes fra nikkel.

Tabell 1.2: Fordampningsenergi for ulike gasser ved kokepunktet eller 273K, hentet fra *Heat and Mass transfer* [14, side 842/843]

Gass	Fordampningsenergi [kJ/mol]	Fordampningsenergi [eV]
H_2/H	0,9kJ/mol	$9,4 \cdot 10^{-3}$ eV
O_2/O	6,81kJ/mol	$7,1 \cdot 10^{-2}$ eV
CO	-	- eV
CO_2	10,1kJ/mol	$1,6 \cdot 10^{-1}$ eV

Vann adsorberes også, men mengden vann som adsorberes er liten i forhold til resten av gassene [4].

Hvis det ikke kreves en aktiveringsenergi så er desorpsjonsenergi lik adsorpsjonsenergi. Dette er tilfellet for fysikalsk desorpsjon, men ikke for kjemisk adsorpsjon. Hvis det legger seg et ekstra molekylsjikt utenfor monolaget er det krefter mellom adsorberte partikler som dominerer. Desorpsjonsenergien for disse lagene er omtrent lik fordampningsvarmen til forbindelsen som desorberes [8, side 224]. Som man kan se i tabell 1.2 er desorpsjonsenergien til lag utenfor det innerste monolaget små.

Partikler i kontakt med en overflate vil desorberes og adsorberes kontinuerlig. Raten som partikler desorberes ved kan beskrives ut fra ligning (1.13) [8, 227].

$$j_{des} = -v_0 \tilde{n} e^{\left(\frac{-E_{des}}{RT_w}\right)} \quad (1.13)$$

Her er j_{des} desorpsjonsraten (partikler per sekund), v_0 er frekvensen som adsorberte partikler svinger med, \tilde{n} er antall partikler, E_{des} er desorpsjonsenergien, R er den universelle gasskonstant og T_w er temperaturen til overflaten. Gjennomsnittlig tid en partikkel er adsorbent er beskrevet av ligning (1.14) [8, side 227].

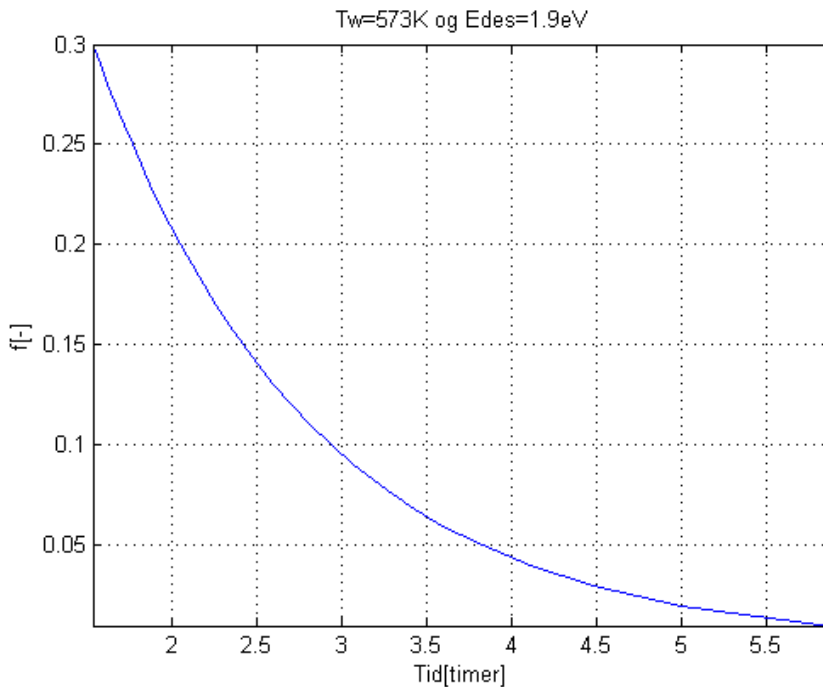
$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_{des}}{RT_w}\right)} \quad (1.14)$$

Her er τ gjennomsnittlig tid en partikkel er adsorbent, τ_0 er oscillasjonsperioden til partikkelen. Oscillasjonsperioden er omtrentlig lik 10^{-13} s [8, side 227]. Hvis man antar at partikler ikke adsorberer igjen etter desorpsjon, kan man beregne antall partikler som ennå er adsorbent etter en tid t , ved å benytte ligning (1.15), [8, side 227].

$$\tilde{n}(t) = \tilde{n}_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (1.15)$$

Her er \tilde{n}_0 antall partikler man starter med og $\tilde{n}(t)$ er antall partikler etter tiden t . τ er gjennomsnittlig tid en partikkel er adsorbent (i sekund). Hvis man innfører et forholdstall mellom gjenstående partikler og partikler man startet med, f , kan man utlede ligning (1.16) [8, side 227].

$$t = \tau \ln \left(\frac{1}{f} \right) \quad (1.16)$$



Figur 1.4: Andel fremdeles adsorbent CO₂-gass plottet mot tid

Denne ligningen gir tiden det tar før man har en fraksjon, f , av partikler som fremdeles er adsorbent. (1.14) og (1.16) er bare gyldige hvis man ikke har gjenadsorpsjon, altså at molekyler adsorberer igjen etter å ha desorbent. Dette krever at man desorberer til et perfekt vakuum som holdes perfekt, noe som er en tilstand man ikke vil klare å få under vanlige desorpsjonsprosesser. Ved å bruke ligning (1.14) og (1.16) vil man kunne beregne tiden det vil ta for å desorbent ned til et bestemt nivå f ved ulike temperaturer, desorberingsenergi og neglisjerbart trykk/neglisjerbar readsorpsjon. Som man kan se av Tabell 1.2 og Tabell 1.1, er adsorpsjonsenergien til oksygen mye høyere enn resten av gassene, og fordampningsvarme er generelt mye lavere enn adsorpsjonsvarme. Beregninger med ligningene (1.14) og (1.16) vil vise hvor lang tid det vil ta å fjerne lag utenfor monolaget, og hvor lang tid det vil ta å nå en viss fraksjon av monolaget. En desorpsjonskurve for karbondioksid er vist i figur 1.4.

Som man kan se i figur 1.4, vil det ta 3 timer å redusere adsorbent mengde karbondioksid med 90%, ved 300°C. Siden karbondioksid har høyere adsorpsjonsenergi enn karbonmonoksid, nitrogen og hydrogen, betyr dette at disse også vil reduseres med minst 90%. Man vil i tillegg fjerne alle lag som ligger utenfor monolaget for alle desorbente gasser på grunn av at fordampningsvarmen for gassene er mye lavere enn adsorpsjonsenergien som er lagt til grunn i figur 1.4.

Tabell 1.3: Overflateareal inne i varmerøret

Flate	Areal
Topp og bunn	$0,025 \cdot 0,01 \cdot 2 \text{ m}^2$
Tynn sideflate	$0,3 \cdot 0,01 \cdot 2 \text{ m}^2$
Bred sideflate	$0,3 \cdot 0,025 \cdot 2 \text{ m}^2$
Veke	$2,26 \text{ m}^2$
Totalt areal	$2,2815 \text{ m}^2$

På grunn av lav konsentrasjon av H_2 , CO og CO_2 i atmosfæren, er det antatt at disse gassene vil ha en lav dekningsgrad (det vil være få gassmolekyler på en flate for en gitt flatekapasitet). Dette vil føre til at det etter en adsorpsjonsprosess vil være neglisjerbare mengder av disse gassene som fremdeles er adsorbent i et monolag på nikkelet.

Det er bare monolaget med oksygen som vil eksistere etter en utgassing ved 300°C som varer i mer enn 3 timer (resten av adsorberte gasser vil være redusert med mer enn 90%). Maksimal utgassingstemperatur ble satt til 300°C etter diskusjon med Geir Hansen [19], dette for å beskytte veken. Nikkeloksid dannes også ved temperaturer over 400°C . På grunn av den høye adsorpsjonsenergien til oksyngass, vil denne gassen ikke kunne fjernes ved 300°C . For å fjerne 90% av oksyngassen i løpet av et døgn må man i følge ligning 1.16, opp i en temperatur på 1575K , altså rundt 1300°C . Dette lar seg ikke gjennomføre. Metoden som er tatt i bruk i artikkelen 'Filling and sealing sodium heat pipes' [3] (kjemisk desorpsjon) kan benyttes for å fjerne oksygenet, men er utenfor rammene til dette prosjektet. Det er også mulig at man kan benytte en reaktiv atmosfære, for eksempel 95% N_2 og 5% H_2 . Ved høye temperaturer vil hydrogen kunne reagere med oksygen og danne vann. Vann kan fjernes fra systemet ved lavere temperaturer.

Et monolag med oksygen som man ikke klarer å fjerne vil føre til viss mengde med urenheter. Mengden oksygen vil også ha noe å si for levetiden til varmerøret [3]. Det er derfor viktig å holde mengden oksygen lav. Et oksygenmolekyl har en radius på ca $1,81 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ [8, side 923]. Med en tettpakking av monolaget vil en kunne få et molekyl per $2\sqrt{3}r^2 \text{ m}^2$. Dette er det samme som $8,8 \cdot 10^{18}$ molekyler per kvadratmeter. Hvis man antar at oksygen dekker hele overflaten av varmerøret, og at varmerøret består av geometriske flater, kan man beregne antall molekyler med oksygen som blir værende i varmerøret. Vekens overflateareal er estimert ved å bruke bulk tettheten og spesifikt overflateareal for nikkelpulveret brukt som vekemateriale. Approksimasjonen på vekearealet er usikker, og resultatet av hele beregningen bør derfor behandles deretter. Overflatearealene er listet i Tabell 1.3

Hvis man antar at hele arealet er pakket i et monolag med oksygen, vil man få $2 \cdot 10^{19}$ oksygenmolekyler inne i varmerøret. Hvis varmerøret fylles med 10g kalium, vil man ha $1,54 \cdot 10^{23}$ kaliumatomer inne i varmerøret. (10g kalium er 0,2558 mol kalium. 1 mol er $6,02214 \cdot 10^{23}$ molekyler.) Hvis man antar at alt oksygenet vil reagere og løses i kaliumet, vil man få en oksygenkonsentrasjon på

$$\frac{n_{\text{oksygen}}}{n_{\text{kalium}} + n_{\text{oksygen}}} = 0,0001304 = 130,4 \text{ ppm.}$$

Hvis veken ikke tas med i beregningen får man en konsentrasjon på 1,23 ppm.

Det ble tatt elektronmikroskopbilder med medfølgende elementanalyse av en nikkelveke, av samme serie som er planlagt for varmerøret, i forbindelse med utvelgelsen av veker for varmerøret. Veken ble undersøkt etter å ha vært varmet opp i en reduserende atmosfære. Resultatet av elektronmikroskopien viste at det var 45,07 % oksygenatomer på overflaten. Hvis man antar at dette er dekningsgraden, altså at man ikke har et komplett monolag, men 45% av et monolag, vil man bare få 45% av oksygenkonsentrasjonen som er beregnet ovenfor.

Kalium og oksygen vil reagere og danne KO_2 . Denne forbindelsen er kalt kaliumsuperoksid. Denne forbindelsen er oksiderende, og kan føre til dannelse av nikkeloksid. Ved høyere temperaturer er kaliumsuperoksid ustabil, og vil oppløses. Man vil da kunne få oksygen i gasstilstand. Det er også mulig at oksygen i gasstilstand vil reagere med nikkelet og danne nikkeloksid. Oksygenet vil altså opptre i kaliumoksid, som ren gass og i nikkeloksid.

Påfyllingsstussen som er planlagt er 100mm lang, og har en indre diameter på 7mm. Dette utgjør et volum på $3,85\text{cm}^3$ i toppen av kondensatoren. Summen av alle inertgassvolumene som oppstår på grunn av adsorberte gasser, urenheter i arbeidsmediet og gass som blir igjen etter vakuumering bør ikke overskride dette volumet. Hvis volumet blir større vil man begrense kondensasjonen. Man kan regne på gassmengden som er igjen i varmerøret på grunn av adsorpsjon og avvik fra perfekt vakuum, men det er vanskelig å si noe om mengden urenheter i arbeidsmediet, da det er lite informasjon å hente fra leverandøren.

Hvis man antar at alt oksygenet er inertgass, vil denne gassen blokkere en del av kondensatoren. Antallet oksygenmolekyler, $2 \cdot 10^{19}$, tilsvarer $3,32 \cdot 10^{-5}$ mol. Ved driftspunktet til varmerøret (et trykk på 5000 Pa og en temperatur på 773K) vil gassen ha et volum, i følge ideell gasslov, på $4,26 \cdot 10^{-5}\text{m}^3$. Dette tilsvarer $42,6\text{cm}^3$, noe som er over halvparten av volumet til varmerøret. Denne mengden inertgass vil bli et problem. Med en dekningsgrad på 45% vil man få et inertgass volum på $19,2\text{cm}^3$. Dette er omtrent 8cm av kondensatoren, og oksygenet vil fremdeles være et problem. Det er trolig at en god del av oksygenet vil reagere med nikkel og danne nikkeloksid. Dette vil føre til at mengden oksygen i gassform vil reduseres.

Ut i fra ligning 1.16 og ligning 1.14 er en utgassing ved 300°C på over tre timer å anbefale for varmerøret. Man vil ikke kunne fjerne oksygenet, og man må akseptere en viss grad av urenheter i varmerøret, hvis man ikke benytter en form for kjemisk desorpsjon.

For stål er det funnet en adsorpsjonsenergi for H_2O på rundt 1eV [8, side 223]. Det er i tillegg funnet adsorpsjonsenergi for karbonmonoksid og hydrogengass [24], og begge er under 1eV. For rustfritt stål 316, er det funnet en artikkel som viser at omtrent 90% av desorbert gass er karbonmonoksid, vanddamp eller hydrogengass [25]. For utgassing av stål til bruk i høytemperatur varmerør er det ikke funnet utgassingstemperaturer under 700K. Hvis man går ut i fra ligning 1.16 og ligning 1.14, er denne temperaturen veldig overdimensjonert. Man kunne altså fjernet gassen ved lavere temperaturer. Adsorpsjonsenergien for vann i kontakt med stål er omtrent halvparten av adsorpsjonsenergien til karbondioksid på nikkel. På grunn av denne sammenligningen er det naturlig å anta at det kan forekomme avvik fra ligningene, og at dette fører til at lengre tid, og høyere temperatur kreves.

På grunn av sammenligningen som er gjort med tidligere utgassing av stål anbefales det derfor å utgasse så lenge som mulig. Hvis det er praktisk mulig bør man utgasse helt til man når det ultimate pumpetrykket. Dette trykket vil ikke nås så lenge man har signifikante lekkasjer.

1.4.3 Oppvarmingsmetoder for å oppnå utgassingstemperatur

For å oppnå en tilfredsstillende utgassing kreves det en viss temperatur på varmerøret og man må derfor planlegge en metode for oppvarming av varmerøret opp til 300°C. I kildene som er gjennomgått er det ofte benyttet 'wrap-around heaters'. Dette er elektrisk-motstandsvarmere som vikles rundt det som skal varmes. På grunn av beslutningen om å sette hele varmerøret inne i vakuumkammeret på grunn av flensproblemer⁵, kan ikke denne typen oppvarming benyttes på grunn av høy utgassingsrate fra strømledernes isolasjon. Den høye utgassingsraten vil føre til en 'kunstig' lekkasje og føre til at man får problemer med å opprettholde et høyt vakuum. Hvis man fjerner den elektriske isoleringen vil man få en kortslutning av den elektriske kretsen, og resultatet av dette er at man får en oppvarming som er vanskelig å planlegge og beregne. Alle oppvarmingsmetodene som innebærer å overføre varme via konduksjon og konveksjon er vanskelige å gjennomføre under vakuum, da det er vanskelig å få god nok kontakt mellom det som varmer og det som skal varmes opp. De fleste varmeledere som fører til god kontakt er uegnede i vakuumapplikasjoner på grunn av utgassing.

Man ser seg dermed nødt til å benytte metoder som baserer seg på strålevarme eller fysiske fenomen som får varmerøret til å varme seg selv. To metoder er gjennomgått for å se om de er realistiske å gjennomføre; direkte elektrisk oppvarming, også kalt 'Joule Heating', og oppvarming ved å benytte en høytemperatur strålekilde.

Joule Heating

'Joule Heating' er et begrep som er brukt om oppvarming ved bruk av elektrisk strøm. Det var James Prescott Joule som fant ut at varmen som ble generert ved å føre strøm gjennom en leder var proporsjonal med kvadratet av strømmen ganget med motstanden til lederen (1.17)[30, side 641].

$$\dot{Q} = RI^2 \quad (1.17)$$

For utforske muligheten for å varme opp varmerøret med elektrisitet ble en numerisk simulering av oppvarmingen ved hjelp av programmet COMSOL Multiphysics 4.0 benyttet. En forenklet CAD modell av varmerøret ble konstruert for analysen. Denne modellen var i grove trekk lik det reelle varmerøret, med en veggtykkelse på 2mm, og ytre mål på 29mm·14mm·300mm. Det var kjøleribbene og festene til varmeelementene som ble forenklet. Analysen i COMSOL Multiphysics ble utført med fysikkmodulen 'Joule Heating'. Det ble kjørt en stasjonær analyse, med følgende grensebetingelser:

- Elektriske grensebetingelser

⁵En flens på påfyllingsstussen vil skape problemer med oppsettet av testtriggen for heatpipen. Beslutningen om å sette varmerøret inne i vakuumkammeret ble tatt etter konsultasjon med Erling Næss og Geir Hansen [19] [21]

- Det ble satt et elektrisk potensial på 0,1V på stussen på oversiden av modellen av varmerøret. Det er i denne analysen benyttet likestrøm.
- Det ble satt en elektrisk jording på stussen på undersiden av modellen av varmerøret.
- Resten av flatene definert som elektrisk isolerende.
- Varmeoverførings grensebetingelser
 - Flatene som ble brukt som jording og elektrisk potensial, ble definert som varmeisolerende.
 - De indre flatene i modellen ble definert som varmeisolerende.
 - De resterende ytre flatene ble definert som strålende flater, med en emisivitet på 0,3. De ytre omgivelsene ble gitt en temperatur på 293K.

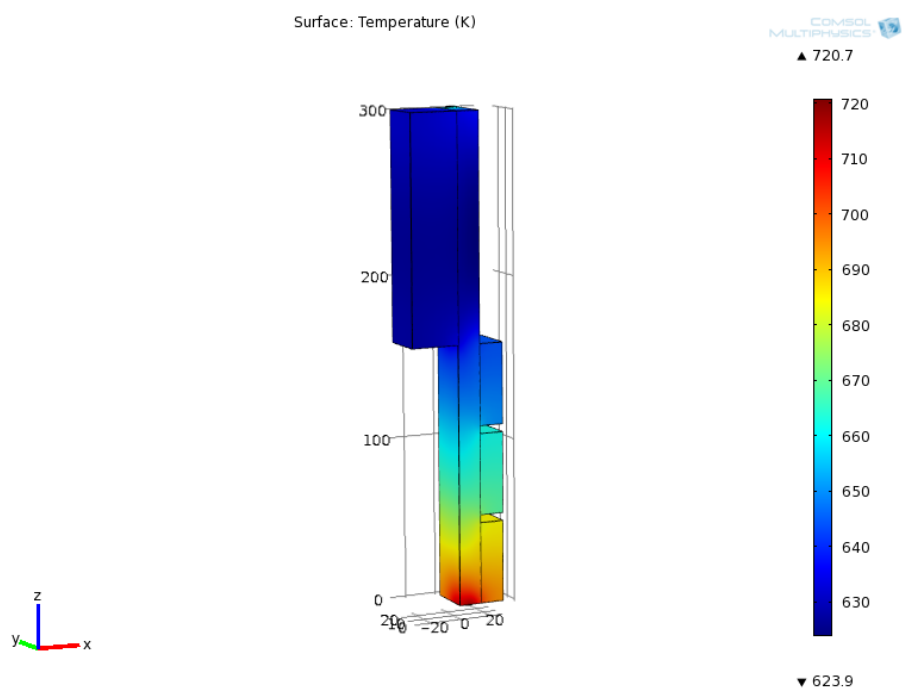
Disse grensebetingelsene vil føre til at man får et positivt varmebidrag fra strømmen gjennom varmerøret, mens man får et negativt bidrag fra strålevarmen som tapes til omgivelsene. Et overflateplott av simuleringen er vist i figur 1.5. Temperaturforskjellen fra bunn til topp skyldes at det er større areal som strømmen kan strømme gjennom i øverste del av varmerøret, det er i tillegg større areal i toppen av varmerøret som vil stråle varme.

Resultatet av beregningen viste at man vil få en stasjonær temperatur på rundt 670K, dette tilsvarer omtrent 400°C, ved et elektrisk potensial på 0,1V. Som man kan se er det en viss ujevnheter i temperatur. Ut i fra øyemål er maksimal temperaturgradient 15K/cm. Det ble utført en overflateevaluering for å beregne mengde strøm som passerte gjennom varmerøret. Overflaten ble definert som oversiden til den øverste stussen. Dette gav en strøm på 1416A gjennom varmerøret. Det ble i tillegg utført en volumevaluering for å beregne total varmegenerering/resistanstap. Den totale varmegenereringen ble beregnet til 144,67W.

Ut i fra analysen er det altså ventet følgende; Med et elektrisk potensial på 0,1V og en strøm på 1416A vil man oppnå en stabil temperatur på 400°C i varmerøret. Ved å benytte en mindre spenning vil man få mindre varmeutvikling og en lavere temperatur. Verdier beregnet på strøm, effekt og spenning er verdier man kan benytte for å se på fordeler og ulemper ved direkte elektrisk oppvarming.

Det er mulig å se noen feilkilder ved å analysere modellen som er brukt.

- På grunn av at kjøleribben er modellert som en solid kloss, og ikke en serie finner, er varmeutvikling her mindre enn reelt. På grunn av at man ikke har finner er det mulig at dette nuller seg litt ut, da man vil få mindre stråling på grunn av mindre overflateareal.
- Temperaturutvikling i lederne som tilfører strømmen er antatt å ikke gi noe bidrag i temperaturutviklingen, da flatene som leverer strøm er definert som varmeisolerende. For at dette skal være tilfelle må lederne ha et veldig flatt temperaturprofil. På grunn av den relativt lave effekten er det rimelig å anta at lederne vil kunne ha en temperatur nært omgivelsestemperaturen ved gjennomføringen, på grunn av konduksjons- og konveksjonstap. Dette vil føre til



Figur 1.5: Overflateplott av stasjonær temperatur med direkte elektrisk oppvarming

at man får en temperaturgradient mellom gjennomføringen og varmerøret, noe som vil føre til et varmetap.

Svakheten ved oppvarming ved bruk Joule oppvarming av nikkel, er at nikkel er en god leder. Nikkel har en elektrisk resistivitet på $6,99 \cdot 10^{-8}$ ohm/m. Kobber, den vanligste lederen i ledninger har en elektrisk resistivitet på $1,68 \cdot 10^{-8}$ ohm/m. Hvis man da har en leder i kobber og en leder i nikkel med samme lengde og tverrsnittsareal, vil man få omtrent 4 ganger så mye varmeutvikling i nikkeldelen. Det store tverrsnittsarealet på varmerøret (omtrent 138mm^2 før man tar hensyn til ekstra areal som forårsakes av kondensator- og fordampergeometri) betyr at man må ha et veldig stort tverrsnittsareal på ledningene som leverer strøm til varmerøret, for å unngå for stor overheting av lederne. Det blir i tillegg varmeproblemer i transformatorer, da man må bruke en enkel spole for å kunne senke spenningen nok.

Beregninger som er utført er gjort med likestrøm. Ved å benytte vekselspanning kan man i teorien kunne få større relativ varmeutvikling i varmerøret enn i lederne. Dette er fordi nikkel er ferromagnetisk, og magnetfeltet som blir induert på grunn av strømmen vil føre til at strømmen har en tendens til å samle seg i de ytre geometriene i varmerøret. Dette fører til at man får større effekttap/varmeeffekt i varmerøret. På grunn av at nikkel er en god varmeleder burde ikke den ujevne oppvarmingen bli et problem.

Fordeler og ulemper med direkte elektrisk oppvarming er altså

- + Prinsippet er enkelt, og det er erfaring med denne oppvarmingsmetoden i Termisk Lab i Kjelbygget.
- + Det en relativt billig måte å varme opp varmerøret på
- Det kreves en leder med lav elektrisk motstand. Dette medfører enten dyre materialer og/eller stort tverrsnitt på lederen.
- For å få strøm inn i vakuumkammeret må man bruke spesielle gjennomføringer. Den største gjennomføringen som er funnet hadde kapasitet på 600A [11]

Strålevarme

Hvis man skal benytte strålevarme, er det enklest at strålekilden står utenfor vakuumkammeret. Strålekilder med høy temperatur sender ut mest høyfrekvent stråling, som hovedsakelig passerer gjennom vakuumkammeret som er planlagt å være produsert av Pyrex. Den høyfrekvente strålingen treffer varmerøret, og stråling reflekteres og absorberes. Den absorberte strålingen vil varme opp varmerøret. Den reflekterte høyfrekvente strålingen vil hovedsakelig passere gjennom vakuumkammeret og deretter ut til laben. Det varme varmerøret vil stråle ut lavfrekvent stråling. Denne lavfrekvente strålingen vil treffe vakuumkammeret, der den blir absorbert og reflektert. Strålingen som blir reflektert treffer enten varmerøret igjen, der det blir absorbert og reflektert, eller så treffer det vakuumkammeret igjen. For denne beregningen er stråling fra vakuumkammeret til varmerøret neglisjert.

Strålingen som vakuumkanmeret absorberer vil føre til en oppvarming av vakuumkanmeret. Ved lave vakuumkanmertemperaturer vil man neglisjere stråletap, og det er bare naturlig eller tvungen konveksjon som fører til varmetap fra vakuumkanmeret.

For at en oppvarmingsmetode som benytter strålevarme skal kunne benyttes, må man kunne tilføre varmerøret nok energi til at det oppnår 300°C og vakuumkanmeret må holde en tilfredsstillende lav temperatur. Pyrex er brukbart opp til ca 500°C, men mange pakninger vil svikte ved temperaturer over 150°C. Det er derfor viktig å se på temperaturen til varmerøret og vakuumkanmeret i en analyse.

Varmekilder er antatt å stråle en varmemengde gitt av ligning (1.18), der emissivitet er antatt konstant for alle bølgelengder.

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma_{S-B} T^4 A \quad (1.18)$$

Formfaktorer er estimert på følgende måte: Strålingskilder er antatt som punkt. Strålingsmottakere er antatt å være flater, med areal likt det projiserte arealet på planet som er normalt på vektoren mellom strålingskilden og strålingsmottaker. Formfaktorene er deretter beregnet ut i fra ligning (1.19)

$$\frac{A_{mottaker}}{A_{Hemisfaere}} = \frac{A_{mottaker}}{2\pi r^2} = F_{1 \rightarrow 2} \quad (1.19)$$

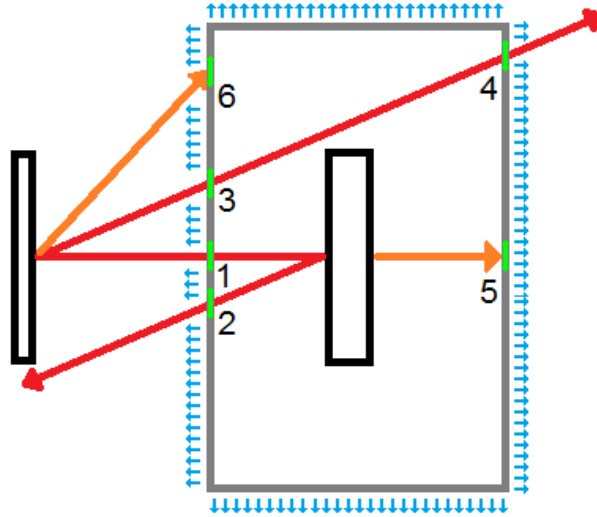
Her er r avstanden mellom kilden og mottakeren. Dette er altså en approximasjon på den reelle formfaktoren, men det antas at feilen fra å ikke bruke den korrekte formfaktoren er liten.

For å regne på dette stråleproblemet kreves det at stråleegenskapene til komponentene som benyttes er kjent. For Pyrex er det oppgitt transmissivitet, τ , over et vidt spekter av bølgelengder på produsentens hjemmeside [12]. For å forenkle beregningen er transmissiviteten satt til 90% for bølgelengder under 2,7 μm , og 0% for bølgelengder over dette. Absorbansen blir satt til 10% og 100% for disse bølgelengdene. Reflektiviteten blir satt til null, da man ignorerer stråling fra vakuumkanmer til varmerør.

For nikkelet er emissiviteten avhengig av overflatebehandlingen. For polert, teknisk ren nikkel er en emissivitet mellom $\epsilon=0,07$ og $\epsilon=0,087$ normale verdier [13]. Overflaten i varmerøret er ikke polert, og det er derfor ventet høyere litt emissivitet og dermed lavere temperatur i varmerøret. Ut i fra Kirchoffs lov antar man at absorbansen er lik emissiviteten. Summen av absorbans og reflektivitet er en, så man kan regne seg frem til reflektivitet.

For strålekilden er det antatt at arealet er lite, og at det emissiviteten er konstant over alle bølgelengder. Siden de fleste produsenter oppgir effekt og temperatur på strålekildene kan man regne seg frem til hvor mye effekten som avgis som stråling over og under 2,7 μm , ved å benytte 'blackbody radiation functions' [14, side 672]. En varmekilde som avgir stråling ved for eksempel 2000K vil avgi 68% av energien ved stråling med bølgelengder under 2,7 μm .

De ulike energistrømmene som er tatt med i beregningen er vist i figur 1.6. I figur 1.6 er røde linjer kortbølget stråling, oransje linjer er langbølget stråling.



Figur 1.6: Energistrømmer som er tatt med i temperaturberegning av varmerøret og vakuumkanmeret

Grønn farge angir at energi er absorbert, og blå pil viser konvektiv varmeovergang fra vakuumkanmeret til luft.

Temperaturen til varmerøret (hp) og vakuumkanmeret (vk) er beregnet med ligning (1.20) og (1.21). Det er ventet at strålingskilden (sk) holder en konstant temperatur. Indeksen hf står for høyfrekvens, mens lf står for lavfrekvens.

$$T_{hp} = \frac{Q_{hf} \cdot F_{sk \rightarrow hp} \cdot \alpha_{hp} \cdot \tau_{vk}}{\epsilon_{hp} \sigma_{S-B} A_{hp}} \quad (1.20)$$

$$T_{vk} = \frac{1}{A_{vk} h_{vk}} [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6] + T_{amb} \quad (1.21)$$

I ligning (1.21) er bidragene Q_1 til Q_6 positive varmestrømmer. Hvor disse varmestrømmene treffer vakuumkanmeret i figur 1.6, er vist i tabell 1.4.

$$Q_1 = Q_{sk, hf} \cdot F_{sk \rightarrow hp} \cdot (1 - \tau_{vk}) \quad (1.22)$$

$$Q_2 = Q_{sk, hf} \cdot F_{sk \rightarrow hp} \cdot (1 - \tau_{vk}) (1 - \alpha_{hp}) \quad (1.23)$$

$$Q_3 = Q_{sk, hf} \cdot (F_{sk \rightarrow vk} - F_{sk \rightarrow hp}) (1 - \tau_{vk}) \quad (1.24)$$

$$Q_4 = Q_{sk, hf} \cdot (F_{sk \rightarrow vk} - F_{sk \rightarrow hp}) (1 - \tau_{vk})^2 \quad (1.25)$$

Tabell 1.4: Varmestrømmenes plassering i forhold til figur 1.6

Varmestrøm	Plassering
Q_1	1
Q_2	2
Q_3	3
Q_4	4
Q_5	5
Q_6	6

$$Q_5 = \epsilon_{hp} \sigma_{S-B} A_{hp} T_{hp}^4 \quad (1.26)$$

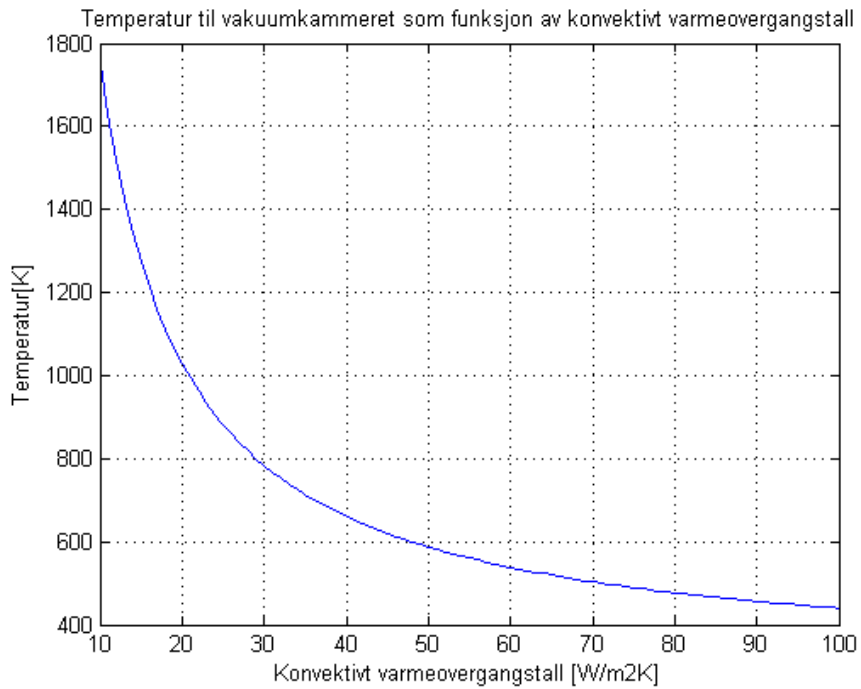
$$Q_6 = Q_{sk,lf} \cdot F_{sk \rightarrow vk} \quad (1.27)$$

Med en total effekt på 5kW, og en kildetemperatur på 2000K, vil man få en temperatur på varmerøret på litt under 300°C. Temperaturen til vakuumkanmeret er plottet i figur 1.7. Temperaturen er avhengig av konvektivt varmeovergangstall mellom kammeret og omgivende luften. Dette varmeovergangstallet har en størrelsesorden på mellom 1-10 W/m^2K for fri konveksjon. For at vakuumkanmeret skal ha en temperatur under 500K, vil det kreve at man har et varmeovergangstall over $70W/m^2K$. Dette vil kreve store lufthastigheter hvis man kjøler med luft. Dette vil kreve spesielle kjøleløsninger av vakuumkanmeret som kan bli vanskelig å konstruere og det vil øke kompleksiteten til riggen.

Fordeler og ulemper med stråleoppvarming er altså:

- + Man trenger ikke en gjennomføring inn i vakuumkanmeret for denne typen oppvarming.
- + Vakuumkanmerkonstruksjon blir enklere da man ikke trenger ekstra utstyr inne i kammeret.
- Stor varmeutvikling i selve vakuumkanmeret gjør at man kanskje må benytte flenser som takler høy temperatur.
- For å unngå høye temperaturer må man benytte aktiv kjøling.

Begge oppvarmingsmetodene er vanskelige å gjennomføre. Det ble dermed fastslått i samråd med Geir Hansen og Eling Næss å sette varmerøret utenfor vakuumkanmeret, og å koble varmerøret til vakuumkanmeret med en flens. Dette gjør oppvarmingen enklere, da konvektive effekter gjør at motstanden mellom varmekilde og varmerør minker. Det å sette varmerøret utenfor gjør at man må flense store komponenter fast til vakuumkanmeret, dette kan føre til store spenninger i i flensene. På grunn av sprøheten til glass, ble det bestemt at vakuumkanmeret bør lages av stål og ikke glass.



Figur 1.7: Temperatur til vakuumkanmeret som funksjon av konvektivt varmeovergangstall

Tabell 1.5: Varmetap for inertgasskammer

Varmetransportmekanisme	Varmetap
Konveksjon	222W
Stråling	644W
Konduksjon	140W
Sum	1006W

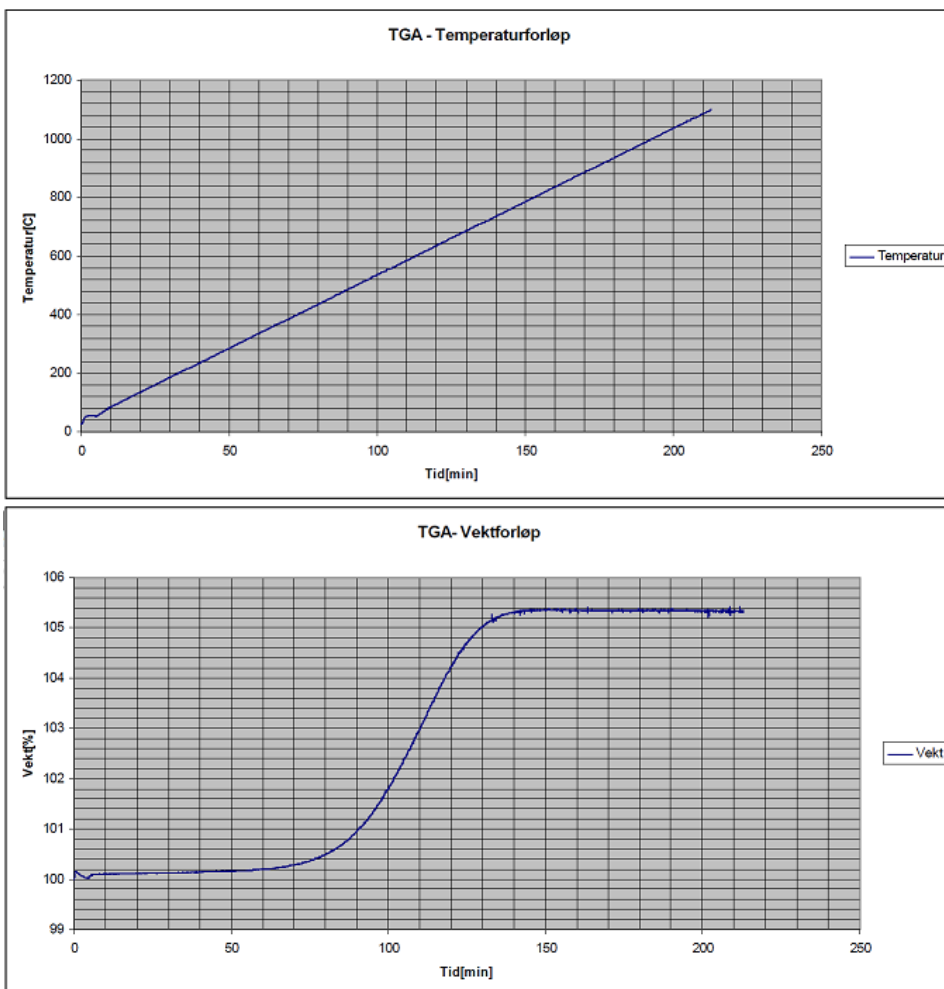
Oppvarming med varmekapper

På grunn av at det ikke er planlagt noen ekstrem temperatur på utgassingene, har man mange valg når det kommer til varmekilde. For å gjøre oppvarmingssystemet lett og håndterlig, ble det gjennomført en analyse av oppvarming av varmerøret ved å benytte såkalte 'tape heaters' som blant annet er brukt av A.Faghri [1]. Ulikheten er at tidligere metoder har varmet opp varmerør av stål. Nikkel oksiderer i luft ved høye temperaturer, og oksidering begynner å bli signifikant ved 300°C som man kan se i figur 1.8. Figur 1.8 viser temperatur og vektforløp til nikkel som oksiderer.

På grunn av oksidasjonen er det viktig at oppvarmingen ikke skjer i en reaktiv atmosfære. Nikkeloksid på utsiden av røret vil ikke være kritisk for varmerøret, men det vil til en viss grad hindre varmetransport i kjølefinnene. Det er derfor planlagt et inertgasskammer som skal omslutte varmerøret under oppvarmingen. Dette kammeret er planlagt å ha en diameter på 100mm og en høyde på 400mm. Kammeret er planlagt å være nesten tett, og ha et lite overtrykk med inertgass. Dette overtrykket vil holde reaktiv atmosfære ute.

En enkel analyse er gjennomført for å se på hvor stor effekt varmeelementet må ha. Varmerøret vil bli varmet opp, og inertgassatmosfæren rundt varmerøret varmes opp. Denne gassen vil igjen varme opp selve kammeret. Inertgasskammeret vil tape varme til omgivelsene ved konveksjon og stråling. Hvis man antar at inertgasskammeret vil holde samme temperatur som varmerøret, vil man kunne regne ut størrelsen på varmetapet fra inertgasskammeret. Antagelsen at kammeret og varmerøret vil ha samme temperatur er ikke realistisk på grunn av at inertgassen vil virke veldig isolerende. Varmetapet som inertgasskammeret har ved en temperatur lik varmerørtemperaturen vil føre til et maksimalt varmetap. Hvis man vet størrelsen på dette varmetapet, har man en øvre grense på effekten man vil trenge i et varmeelement som skal varme varmerøret. Varmetapet fra inertgasskammeret er summen av strålingstap og konvektive tap. Beregningen av de konvektive tapene er basert på ligninger for Nusselttall for naturlig konveksjon [14, side 511]. Gassegenskaper er hentet ved snittemperaturen mellom vegg og lufttemperatur, $\frac{T_s + T_{amb}}{2}$. For strålevarmen er det benyttet en emissivitet på 0,8 [13], og at inertgasskammeret stråler til en blackbody ved 20°C. Det er i tillegg til konveksjon og stråling tatt hensyn til varmetapet som skjer via fyllestussen. Størrelsen til dette varmetapet er basert på en analyse som blir gjennomgått i 1.4.4. Varmetapene som er beregnet er listet i tabell 1.5

Som man kan se er maksimalt varmetap fra inertgasskammeret på ca 1kW. Dette varmetapet er trolig større enn det reelle varmetapet fra inertgasskammeret,

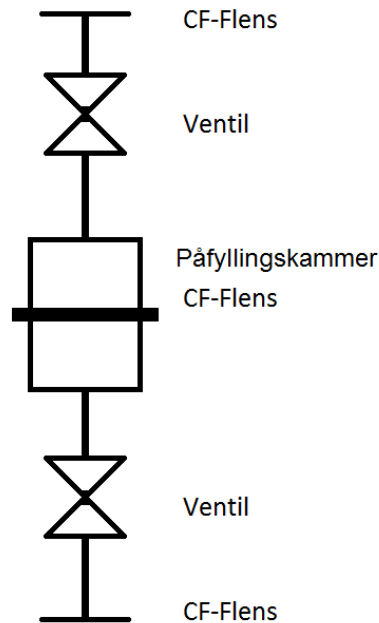


Figur 1.8: Termogravimetrisk forsøk utført på nikkelpulver [17]

da man vil ha en signifikant temperaturdifferanse mellom varmerøret og inertgasskammeret. Inertgasskammeret kan i tillegg isoleres for å minske varmetap.

Det vil ikke være noe problem å installere 1,1kW inne i inertgasskammeret. Varmeelement koster relativt lite, og det kan være fordelaktig å ha ekstra kapasitet i tilfelle man trenger en høyere utgassingstemperatur.

Oppvarmingen ved å benytte varmekapper bør derfor installeres og benyttes til å varme opp varmerøret.



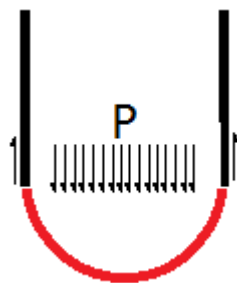
Figur 1.9: Prinsipiell skisse av påfyllingskammeret

1.4.4 Påfylling

Det ble etter litteratursøket bestemt at man skal benytte et påfyllingskammer, og å smelte kaliumet før det overføres til varmerøret. Dette krever et gjennomtenkt system for overføring av kalium til påfyllingskammeret, installering av kammeret inn i vakuuriggen, smelting av kalium og overføring av kalium til varmerøret. Påfyllingskammeret er planlagt som et kammer som kan åpnes og lukkes med en flens, det er i tillegg to tilkoblede ventiler som skal være lukket under hele fyllprosessen av påfyllingskammeret, en illustrasjon av påfyllingskammeret er vist i figur 1.9. Kaliumet som har blitt levert og som skal brukes i varmerøret er pakket inn på en ukjent måte. Det er derfor ukjent om man kan overføre kalium direkte, eller om kaliumet må smeltes først. Hanskeboksen som det er planlagt å bruke bør ha en varmeplate, slik at det er mulig å smelte kaliumet for å gjøre fyllingen av påfyllingskammeret enklere.

Når kaliumet er i påfyllingskammeret, forsegles dette ved å lukke en CF-flens. Dette vil forsegle påfyllingskammeret, og man vil få et kammer med veldig lav lekkasjerate. De største lekkasjene vil man ha gjennom ventilene, men disse lekkasjene er begrenset av en lav trykkdifferanse over ventilene. Når påfyllingsflasken er forseglet installerer man den inn i vakuuriggen ved å benytte CF-flenser i bunn og topp av påfyllingskammeret.

Når påfyllingskammeret er montert, og varmerøret er utgasset, er det klart for



Figur 1.10: Kraftbalanse for en halvkule av kalium

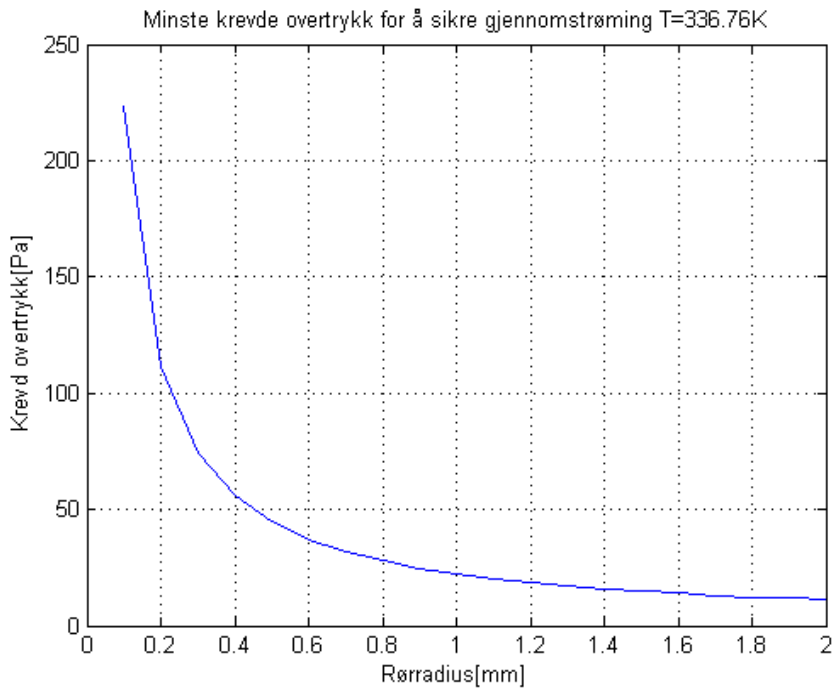
å smelte kaliumet. Dette krever en temperatur på rundt 65°C [18, side 7]. Denne temperaturen kan man få ved å benytte 'tape heaters' av samme type som skal varme opp varmerøret. Trippelpunktet til kalium ligger rundt 65°C og $1,5 \cdot 10^{-6}$ mbar. Under fyllingen må trykket i riggen være over dette trykket for å gjøre det mulig å smelte kalium.

Påfyllingsstussen til varmerøret skal ha en ytre diameter på 9mm, og en veggtykkelse på 1mm [19]. På grunn av forseglingsmåten som innebærer at man må sette en plugg i påfyllingsstussen, tvinges man til å ha et mellomrom mellom påfyllingsstussen og røret som skal bringe det smeltede kaliumet til varmerøret. Dette mellomrommet må være på mellom 3-5 cm, som er høyden på pluggen pluss klaring [19]. Dette fører til at kaliumet må falle fra påfyllingsrøret og ned i påfyllingsstussen. Man må derfor treffe i midten av påfyllingsstussen, og man må ha klaring ut til kantene. Søl på kantene er ikke kritisk, da man kan se dette og benytte induksjonsspolene til å fordampe kaliumet. Hvis man ikke fjerner dette kaliumet vil det forårsake en dårlig sveis. For å sikre at minst mulig av kaliumet bommer på påfyllingsstussen, kan man minke størrelsen på påfyllingsrøret som kaliumet skal ut av. En kontinuerlig stråle av kalium ut av påfyllingsrøret vil ha omtrentlig samme diameter som indre diameter på påfyllingsrøret.

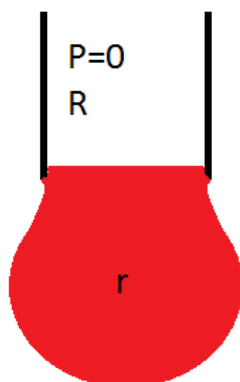
Siden påfyllingsrøret må ha liten diameter for at man skal kunne treffe påfyllingsstussen, kan man trenge et høyt overtrykk for å presse kaliumet ut. Det maksimale overtrykket man trenger er det trykket man trenger for å overvinne overflatespenningen i en hinne av kalium uten vekt, som vist i figur 1.10.

Dette trykket varierer med overflatespenningen og med radien på røret. Trykket som trengs for å overvinne overflatespenningen er plottet i figur 1.11.

Ved lave overtrykk og små rørradier, kan det dannes dråper med større diameter enn rørdiameteren. De største dråpene vil oppstå når overtrykket i røret er neglisjerbart. Hvis man estimerer volumet til dråpen som volumet til en kule, kan man beregne maks størrelse på dråpen ved å se på en kraftbalanse mellom overflatespenningen og vekten til dråpen, denne balansen er satt opp i ligning (1.28). Denne ligningen er bare gyldig så lenge dråpediameteren er større enn rørdiameteren. I ligningen er r radiusen på dråpen og R er radiusen på røret. En illustrasjon av dråpen som er modellert er vist i figur 1.12.



Figur 1.11: Overtrykk som trengs for å overvinne overflatespenningen ved ulike rørradier



Figur 1.12: Dråper kan ha større diameter enn røret

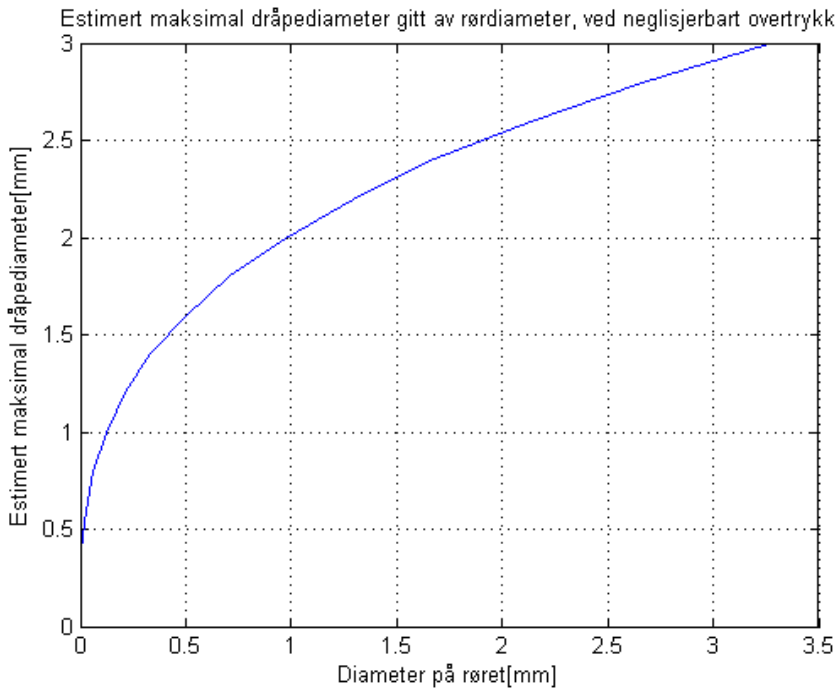
$$R = \frac{V \rho g}{2\sigma_{S-B}\pi} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g}{2\sigma_{S-B}\pi} \quad (1.28)$$

Maksimal dråpediameter er beregnet for ulike rørdiametre, ved å benytte ligning (1.28). Resultatet er plottet i figur 1.13.

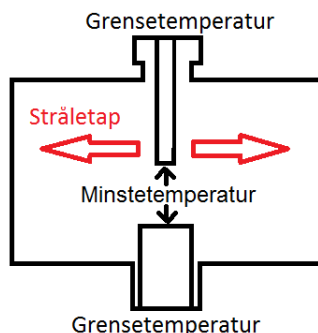
Man bør ha klaring mellom påfyllingsstussen og dråpene/strømmen av kalium som strømmer ned i varmerøret. Indre diameter på påfyllingsstussen er 7mm [19]. En klaring på 2mm på hver side av kaliumstrømmen, betyr at man kan ha en ytre rørdiameter på rundt 3mm 1.13. Hvis man krever en klaring på 3mm, må man derimot minke ytre rørdiameter ned til 0,1mm (som gir en dråpediameter på 1mm, se figur 1.13), noe som er vanskelig å gjennomføre i praksis da det fører til en ekstremt små indre rørdiameter og et høyt krevd overtrykk. En ytre diameter på 3mm og en indre diameter på 2mm på påfyllingsrøret vil gi god klaring (minimal klaring er ca 2mm), og vil kreve lavt overtrykk. Overtrykket (mellom 10Pa og 15Pa, se figur 1.11), tilsvarer det hydrostatiske trykket til 1,5mm kalium (Tettheten til kalium ved smeltetemperaturen og metningstrykket, er 829.3kg/m^3). Dette betyr at man mest sannsynlig ikke vil trenge å benytte argongass for å fylle varmerøret.

Tiden det tar for smeltet kalium å renne ned i varmerøret avhenger av viskositeten. Viskositeten til kalium ved smeltepunktet er $5,313 \cdot 10^{-4}\text{Pas}$ [18, side 65]. Dette er omtrent viskositeten til vann ved 50°C . Det er derfor ikke problem med at væsken blir for viskøs, og man trenger derfor ikke å varme rørene til noe mer enn smeltepunktet av viskositetshensyn (viskositeten ved 400K er $3,930 \cdot 10^{-4}\text{Pas}$, så man oppnår uansett ikke en stor minking i viskositeten med en liten temperaturøkning). Det kan derimot være lurt å overvarme for å være på den sikre på at man alltid vil være på den rette siden av smeltepunktet, slik at man ikke risikerer størkning i rørene.

For at kalium skal være i væskeform helt fra påfyllingskammer til varmerøret,



Figur 1.13: Maksimal dråpestørrelse for ulike rørradier



Figur 1.14: Den laveste temperaturen avhenger av grensetemperaturen og varmetap

bør man holde hele rørlengden som binder disse punktene sammen ved en temperatur over smeltepunktet. Der man har direkte tilgang til yttersiden av rørene er dette ikke noe problem, man benytter bare varmeelement på utsiden av rørene. Rørene man ikke har direkte tilgang til, altså påfyllingsrøret som går ned i vakuukammeret og påfyllingsstussen som stikker opp i vakuukammeret, kan bli for kalde. Det blir kaldest øverst på påfyllingsstussen og nederst på påfyllingsrøret. Figur 1.14 viser en illustrasjon av posisjonene til minimumstemperaturene. Disse delene av rørene kan man ikke varme opp direkte, de holder en temperatur som er bestemt av temperaturen i innfestningspunktet og av varmetapet som skyldes stråling.

Man kan beregne temperaturfallet fra innspenningspunktet og til enden av rørene numerisk. Hvis man ser på en liten del av rørene, kan man sette opp en energibalanse for denne lille delen, vist i ligning (1.29):

$$\left(-kA_c \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{venstre} + \left(-kA_c \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{hoyre} = \sigma_{S-B} A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (1.29)$$

Her er A_c tverrsnittsarealet og A_s er overflatearealet. Hvis man antar at tverrsnittsarealet og termisk konduktivitet er konstant, og man forenkler temperaturgradienten med sentraddifferanser får man ligning (1.30).

$$\left(\frac{T_{j+1} - 2T_j + T_{j-1}}{\Delta x}\right) = \frac{\sigma_{S-B} A_s}{kA_c} (T_j^4 - T_{amb}^4) \quad (1.30)$$

Man ønsker i dette tilfellet minst mulig temperaturgradient. Dette betyr minst temperaturfall fra innspenningen til enden av påfyllingsrøret eller påfyllingsstussen. Venstre siden av ligning (1.30) tilsvarer $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, minimering av denne vil føre til minst mulig temperaturfall over røret. Man kan ved å manipulere de geometri spesifikke parametrene, $\frac{A_s}{A_c}$, minimere temperaturfallet.

For å beregne hvor høy temperatur man trenger i innspenningspunktene, er det utført beregninger i Comsol Multiphysics 4.0. Betingelsene som er benyttet i beregningen av påfyllingsrørets temperatur er listet opp i Tabell 1.6.

Tabell 1.6: Grensebetingelser for numeriske beregninger for påfyllingsrør

Grense	Betingelse
Innsiden av røret	Isolert
Yttersiden av røret	Stråling med $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ og $\epsilon = 0.8$
Enden av røret	Stråling med $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ og $\epsilon = 0.8$
Innspenningspunkt	$T=100^{\circ}\text{C}$

Tabell 1.7: Grensebetingelser for numeriske beregninger for påfyllingsstuss

Grense	Betingelse
Innsiden av røret	Isolert
Yttersiden av røret	Stråling med $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$ og $\epsilon = 0.5$
Enden av røret	Stråling med $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$ og $\epsilon = 0.5$
Yttersiden av vakuumkanmeret	Konveksjonstap til $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$, $h = 10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
Yttersiden av vakuumkanmeret	Stråling med $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$ og $\epsilon = 0.8$
Innspenningspunkt	$T=100^{\circ}\text{C}$

Påfyllingsrøret fra vakuumkanmeret og ned mot påfyllingsstussen til varmerøret har ingen fastsatt geometri. Røret vil ha en maksimal ytre diameter på 16mm, og en maksimal lengde på 150mm. For å minimere temperaturene man må varme opp riggen med, setter man 100°C som maksimal temperatur i innspenningspunktet. Man kan nå beregne seg frem til hvilken tykkelse man trenger på røret, for å holde temperaturen på enden av røret over smeltepunktet. Ved manuell iterasjon ble det beregnet et minste tverrsnittsareal. Med en veggtykkelse på 3mm vil man få et temperaturfall på $33,2^{\circ}\text{C}$. Dette vil si at man har en temperatur på $66,8^{\circ}\text{C}$ i enden av røret. Dette er et par grader over smeltepunktet, og man kan derfor unngå størkning ved å benytte rør med veggtykkelse over 3mm i påfyllingsrøret (eller et tverrsnittsareal over $(16^2 - 13^2)\pi$).

Enden av påfyllingsrøret må fremdeles ha en ytre diameter på rundt 3 mm for å gi nok klaring til kaliumet.

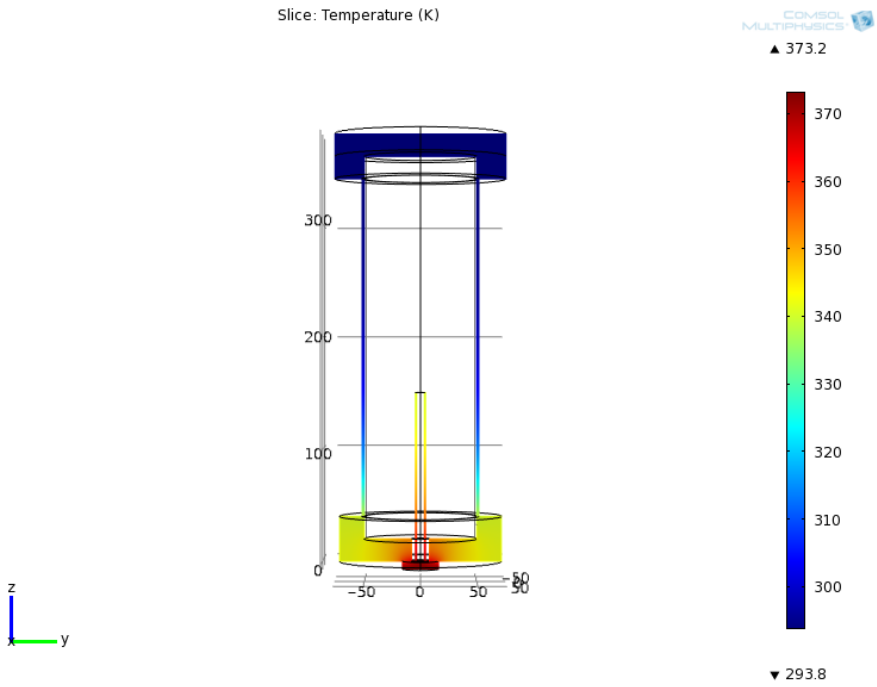
Påfyllingsstussen har 9mm ytre diameter og 7mm indre diameter. Det har tidligere blitt brukt en lengde på 100 mm. Det er mulig at dette blir for kort, det er derfor lagt til grunn 150 mm som lengde i denne beregningen. En modell er satt opp for å kunne beregne strålingstapene og varmeledningstapene fra innspenningspunktet og til enden av påfyllingsstussen.

Grensebetingelsene som er brukt i denne modellen er omtrent de samme som i forrige modellen, med noen tillegg. Grensebetingelsene er listet i Tabell 1.7

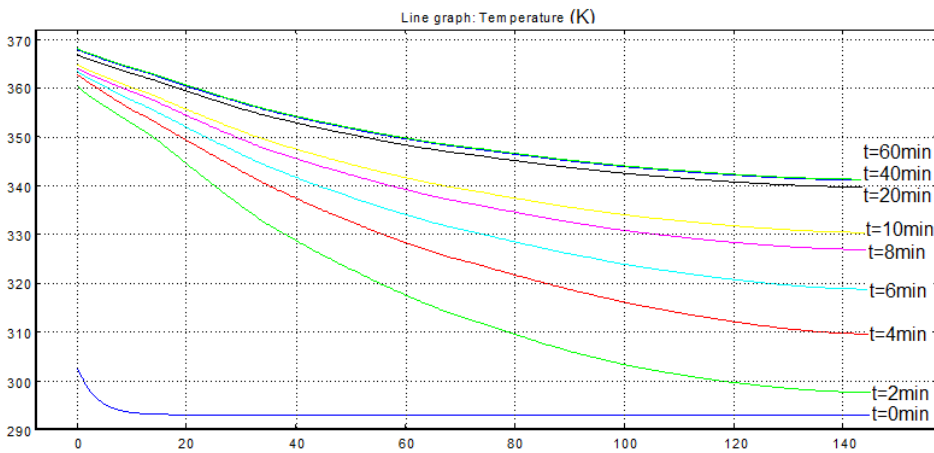
Modellen og den stasjonære temperaturfordelingen er vist i figur 1.15.

Den transiente temperaturfordelingen er vist i figur 1.16. Som man kan se vil toppen av påfyllingsstussen holde en temperatur på rundt 340K etter ca 20 minutt, dette tilsvarer ca 67°C , som er like over smeltetemperaturen til kalium.

Varmen som gjør at påfyllingsstussen holder en høy temperatur kommer fra varmeelementene i inertgasskammeret. For å estimere konduktive tap fra varmerøret til påfyllingsstussen og vakuumkanmeret, ble grensetemperaturen satt til 300°C og



Figur 1.15: Temperaturfordeling i påfyllingsstuss



Figur 1.16: Temperaturforløp i påfyllingsstuss

det totale varmetapet fra modellen i figur 1.15 ble beregnet. Beregningen viser at en grensetemperatur på 300°C vil føre til et effekttap på ca 140W.

Prøve	Effekt	Tid	Trykk	Strom	Frekvens
Prøve 1	7kW	11s	80kg-200kg	960A	20kHz
Prøve 2	7kW	11s	0kg-20kg	960A	20kHz

Tabell 1.8: Sveiseparametre som ble valgt for de ulike prøvene

1.4.5 Forsegling

Forseglingsmetoden som ble valgt etter litteraturgjennomgangen var induksjons-sveising under vakuum. Induksjonssveising er en type elektrisk motstandssveising. Elektrisk motstandssveising baserer seg på at man får en motstand når man sender strøm gjennom et materiale. Denne motstanden fører til varmeutvikling, og det er denne varmeutviklingen som fører til at man når en temperatur som er egnet for sveising.

Induksjonssveising benytter en spole som fører strøm. Denne spolen posisjoneres rundt det man skal sveise. Når man sender vekselstrøm gjennom spolen vil det induseres et magnetfelt, som igjen induserer en strøm i arbeidsstykket man vil sveise (Lentz' Lov) [15]. Induksjonssveising er ofte brukt når man konstruerer rør av flate emner. Da rulles flaten sammen slik at den får en sirkulær form, for deretter å føres gjennom en spole. Når man fører platen gjennom spolen som fører strøm, vil man indukere en strøm over kontaktpunktet mellom de to endene av flaten. Dette vil føre til sterk lokal oppvarming, og dette vil sammen med litt trykk føre til at man sveiser røret sammen.

Metoden er egnet til å forsegle varmerøret under vakuum på grunn av at man ikke trenger å bevege noe under sveisingen. Det eneste man må gjøre er å føre forseglingspluggen på plass og slå på strømmen til induksjonskoilen.

Metoden har mange variabler som kan endres på som vil føre til ulike resultater; strømstyrke, diameter på spolen, frekvens og tid er de viktigste parametrene. Da det er vanskelig å beregne hvordan resultatet av sveising blir, er det viktig å gjøre forsøk for å fastsette disse parametrene. Den enkleste metoden for å teste om en sveis er vellykket er å teste om sveisen lekker, da det endelige resultatet bør være så tett som mulig.

Det er opprettet kontakt med et firmaet AMR engineering, som jobber med induksjonssveising i samarbeid med NTNU. AMR vil utføre innledende induksjons-sveiseforsøk, og klargjøre prøver for lekkasjetesting.

Riggen som AMR bruker benytter ofte trykk, i tillegg til strøm for sveising. Riggen bruker inertgass (10% H_2 og 90% N_2).

Det er utført to forsøk på sveising av nikkelerør med plugg, parametrene for denne sveisingen er vist i tabell 1.8. Prøve 1 ble utsatt for et større trykk enn ventet på grunn av uheldig innspenning og termisk utvidelse. Induksjonssveisingen som skal skje inne i vakuumkanammeret vil foregå uten at det er mulighet for å påsette noe trykk. Prøve 1 er derfor ikke en representativ prøve, da sveiseprosessen ikke kan gjenskapes i vakuum. Prøve 2 er mer representativ, og ble planlagt lekkasjetestet med en heliumsniffer. Før denne testen ble gjennomført ble det gjennomført en test med vann, og det viste seg at prøve 2 ikke var tett.

På grunn av stor arbeidsmengde kunne ikke AMR induksjonssveise mer innen en rimelig tid. Det ble derfor besluttet at det skulle bygges en egen rigg der man skal teste induksjonssveising. Resultatet av denne testingen ble ikke klar før innleveringstidspunktet til denne rapporten.

For å kunne bruke induksjonssveising må man få en induksjonsspole inn i vakuuskammeret uten å lage lekkasjer. Dette gjøres ved å benytte spesielle isolerte, vannkjølte gjennomføringer fra Caburn MDC [11]. Det er planlagt at testingen som skal gjøres med induksjonssveising vil gi svar på hvilken kobberspole som kreves for sveisingen. Når man har spesifikasjonene på denne spolen kan Caburn MDC konstruere en komplett gjennomføring med spole. Dette vil minimere lekkasjer inn i vakuuskammeret.

1.5 Komponentvalg og riggoppsett

En rigg har blitt planlagt ut i fra beregningene som er gjort. Denne riggen er hovedsakelig av metall, og de fleste komponentene er plukket ut i fra produktkatalogen til Caburn MDC. Etter samtale med Geir Hansen[19] ble det planlagt en rigg som krevde minst mulig vakuumpumpkonstruksjonsekspertise av lokale verksteder, da det er lite lokal erfaring med vakuumpumpeteknikk.

En komponentliste med riggoversikt er vedlagt, og ligger under Vedlegg.

1.5.1 Riggoppsett

Riggen som er planlagt er vist i figur 1.17. Figuren viser de ulike komponentene som trengs, og sammenkoblingen av disse komponentene.

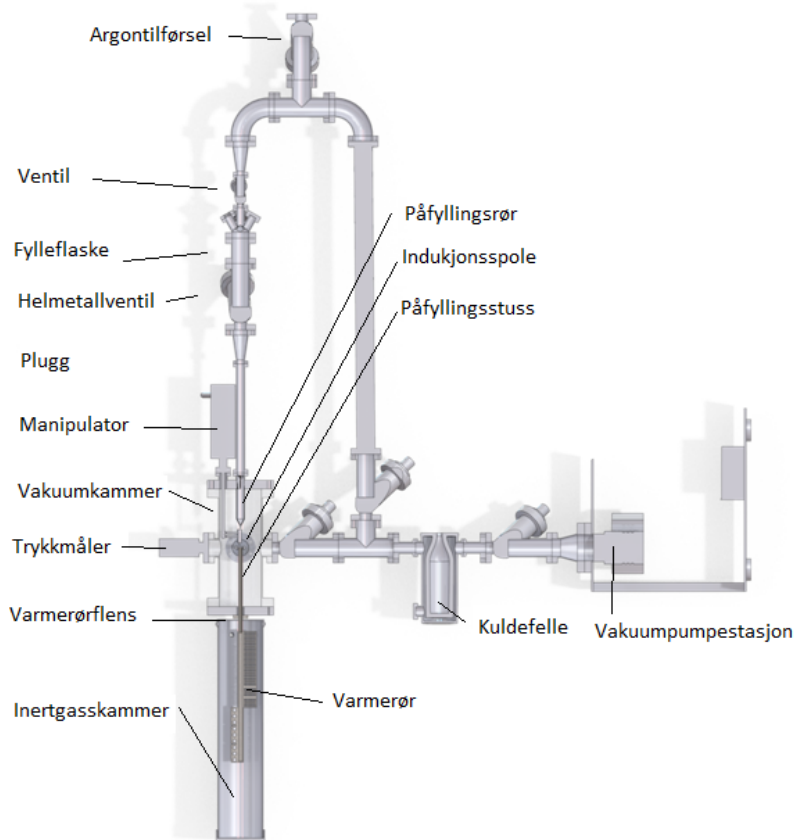
Varmerøret er koblet til et vakuumpumpkammer ved å benytte en CF-flens som er festet til påfyllingsstussen til varmerøret. Flensen blir festet til påfyllingsstussen ved å bruke sølv/slag-lodding. Måten varmerøret er flenset til vakuumpumpkammeret på gjør det mulig å vakuuere innsiden av varmerøret mens utsiden av varmerøret er utenfor vakuumpumpkammeret. Varmerøret er plassert inne i et inertgasskammer som gjør det mulig å varme varmerøret uten at det dannes nikkeloxyd. Vakuumpumpkammeret er koblet til vakuumpumpene med to rørstrekk. Det ene rørestrekket går direkte fra vakuumpumpkammeret, gjennom krevde ventiler og komponenter og til vakuumpumpene. Det andre rørestrekket går via påfyllingskammeret, denne veien vil være stengt under mesteparten av utgassingene på grunn av damptrykket til smeltet kalium. Påfyllingskammeret er koblet til et påfyllingsrør over vakuumpumpkammeret. Det er i tillegg koblet til argongasstilførsel og vakuumpumpen.

Måten riggen er koblet sammen på gjør det mulig å vakuuere påfyllingskammeret og vakuumpumpkammeret individuelt. Det er også mulig stenge vakuumpumpene fra systemet ved svikt av komponenter eller lekkasje av luft inn i riggen. Kuldefellen som er satt inn foran vakuumpumpene er ment å kondensere større molekyler som kan være skadelige for høyvakuumpumpen, som er ømfintlig.

1.5.2 Komponentvalg

Vakuumpumpkammer

Vakuumpumpkammeret som varmerøret er flenset fast til, er et spesialkonstruert kammer som skal fremme alle operasjonene man må gjøre. Vakuumpumpkammeret er basert på en 'six-way cross'-komponent, en illustrasjon av vakuumpumpkammeret er vist i figur 1.18. Det er planlagt fire DN40CF flenser på vakuumpumpkammeret. Disse skal gjøre det mulig å se inn i vakuumpumpkammeret (som er av stål), måle trykket, koble til vakuumpumper og å få en induksjonsspole inn i vakuumpumpkammeret. I bunnen og i toppen av vakuumpumpkammeret er det planlagt DN160CF flenser. På toppflensen skal det settes på en 'multiport', dette et mellomstykke som gjør det mulig å feste både påfyllingsrøret for kalium og en manipulator til vakuumpumpkammeret. Denne delen vises også i figur 1.18. På bunnen av vakuumpumpkammeret er det festet en 'zero-length reducer'. Denne komponenten er et mellomstykke som gjør det mulig å feste



Figur 1.17: Skisse over endelig oppsett av påfyllingsriggen



Figur 1.18: Vakuumkanmer

varmerøret til vakuumkanmeret.

Det er ment at påfyllingsstussen til varmerøret skal nå opp til samme høyde som DN40CF flensene. Induksjonsspolen, som det er antatt at bare vil ha en tvining, vil gå rett inn til senteret av vakuumkanmeret og rundt påfyllingsstussen. Varmerøret må altså monteres fast etter induksjonsspolen. Manipulatoren som gjør det mulig sette en plugg i påfyllingsstussen vil være plassert så langt ut fra senter på DN160CF flensen som mulig. Når pluggen skal settes på plass gjøres dette hovedsakelig ved å rotere manipulatoren. Manipulatoren håndterer lite vertikal variasjon. En illustrasjon av innsiden av vakuumkanmeret vises i figur 1.19. Her er deler av vakuumkanmeret fjernet for å gi bedre oversikt.

Påfyllingskammer

Påfyllingskammeret ble teoretisk planlagt tidligere i rapporten, og her vil den praktiske utførelsen vises. En illustrasjon er vist i figur 1.20. Ordet 'Påfyllingskammer' vil brukes for å angi alle komponentene som skal tas inn i hanskeboksen og selve beholderen som inneholder kalium. Bunnen av påfyllingskammeret er en 'nipple-reducer'. Dette er en komponent som øker flensstørrelsen fra DN16CF til DN40CF. På DN40CF-siden er det festet en helmetallventil. Denne ventilen er utelukkende konstruert av metall. En helmetallventil er valgt for å minke mulige kilder til lekkasjer og forurensing av kaliumet. Til denne ventilen er det koblet et kort rør. Det



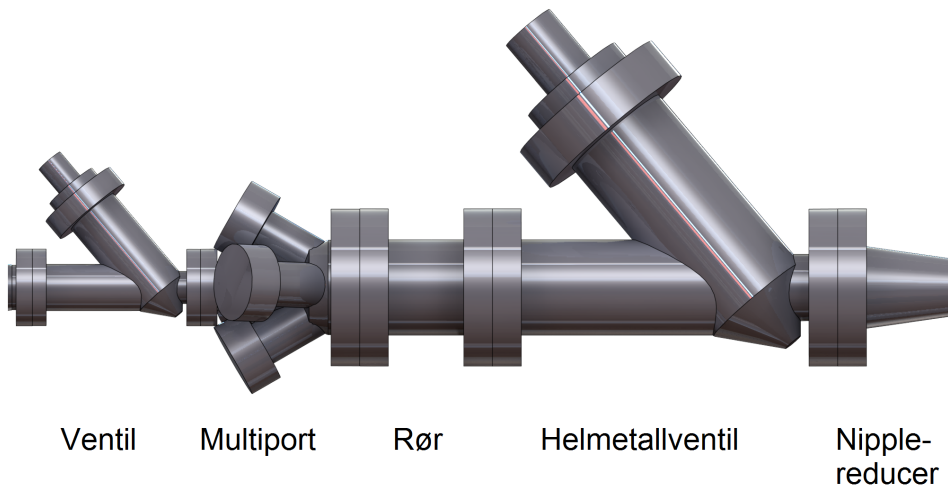
Figur 1.19: Oversikt over induksjonsspoleposisjon

er dette røret som skal inneholde kalium. Toppen av dette røret er koblet til en spesiell komponent, en 'multiport'. Denne komponenten består av en DN40CF flens som kobles til det korte røret, og 5 DN16CF flenser. En til fire av disse flensene skal lukkes med seglass eller blanke flenser. Seglass skal brukes for å få innsyn i påfyllingskammeret. Den siste DN16CF flensen, som er langs samme akse som DN40CF flensen, skal kobles til en vanlig ventil.

Når man skal fylle kalium på påfyllingskammeret vil man begynne med en påfyllingskammer som er delvis demontert. Flensene som fester påfyllingskammeret til vakuuriggen er ikke festet, og flensen mellom multiporten og det korte røret er ikke festet. Alle delene av påfyllingskammeret varmes opp for å fjerne adsorbert fuktighet og settes inn i en hanskeboks. Deretter overføres kalium til påfyllingskammeret og flensen mellom multiporten og det korte røret festes. Under hele prosessen er ventilene til påfyllingskammeret lukket. Man har nå kalium i påfyllingskammeret under en argonatmosfære. Påfyllingskammeret tas nå ut av hanskeboksen og monteres i riggen.

Ventiler

De fleste ventilene som er valgt er høyvakuumentil med vitonpakninger. Siden vitonpakninger ikke er kompatible med kalium må helmetallventiler benyttes der ventilen kommer i direkte kontakt med ren kalium. Det er derfor planlagt en helmetallventil under påfyllingskammeret, da dette er den eneste ventilen som kommer i



Figur 1.20: Påfyllingskammer

direkte kontakt med flytende kalium. Det er ventet at kaliumdamp som kommer i kontakt med vitonpakninger i resten av riggen vil være i så små mengder at det ikke vil spille en stor rolle for tettheten til riggen eller resultatet av fyllingen og forseglingen. De fleste ventilene er inline-ventiler med 'poppet-valves'. Det er valgt DN40 størrelse på de fleste ventilene for å gjøre ledningsevnen til rørstrekkebedre. Man kunne valgt DN60 størrelse hele veien, men det ville ha kostet mer, og en veldig stor økning i ledningsevnen i visse deler av riggen gjør ikke helhetlig ledningsevne mye bedre.

Vakuumpumpe

Vakuumpumpeløsningen som er valgt er en vakuumstasjon som heter PT-80-Dry. Denne er produsert av Aerlikon Lyebold Vacuum og levert av Vakuum Consult. Denne vakuumstasjonen består av to pumper, en grovvakuumpumpe ('roughing pump') og en høyvakuumpumpe. Høyvakuumpumpen er en turbomolekylærpumpe. Turbomolekylærpumper transporterer gassmolekyler ved å tilføre bevegelsesmengde til gassmolekyler, som da transporteres til høytrykksiden av pumpen. Bevegelsesmengde er overført via rotorblad. Turbomolekylærpumper krever at man er i et molekylærstrømningsregime, og pumpen kan dermed ikke pumpe fra vakuum til atmosfærisk trykk. Turbomolekylærpumpen krever derfor bruk av en grovvakuumpumpe på høytrykksiden. [8, side 413].

Kuldefelle

Kuldefeller benyttes av to grunner:

- Hindre at forurensning fra vakuumpumper strømmer tilbake fra vakuumpumpene og inn i vakuumkanteret.
- Hindre at kondenserbare gasser fra vakuumkanteret skader vakuumpumpene.

Kuldefeller kjøler gasstrømmen som passerer gjennom dem, og kondenserer gasser som lar seg kondensere. Kondensatet lagres, og kan fjernes fra systemet. Kuldefellen som det er lagt opp til å benytte bruker flytende nitrogen til å kondensere gasser.

Pakninger

Standard pakninger for CF-flenser er av kobber. Det er ikke funnet kompatibilitetsdata mellom kobber og kalium. Det er også mulig å benytte nikkelpakninger i CF-flenser. Det kan være vanskeligere å danne en tett forsegling med nikkel, da det er hardere enn kobber. Nikkelpakninger er derimot kompatibelt med kalium. Det er derfor planlagt å benytte nikkelpakninger i alle flenser der det er mulig å benytte nikkel.

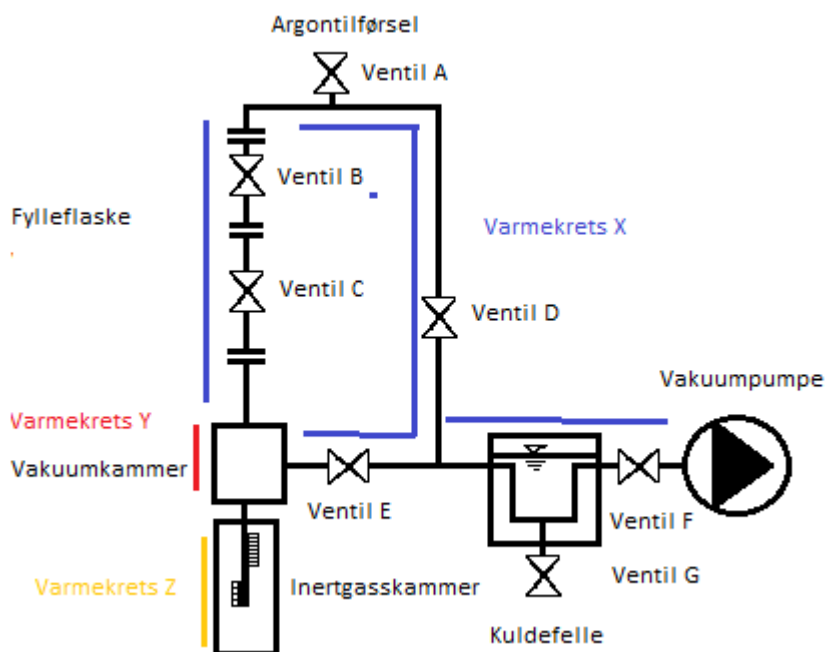
Kuldefellen som det er planlagt å benytte har KF-flenser. Dette betyr at man må benytte vitonpakninger i disse flensene. Vitonpakninger er som nevnt tidligere ikke kompatible med kalium, og man bør begrense vakuumering av påfyllingskammeret når kalium er oppvarmet. Dette vil begrense kaliumandelen i vakuumert gass betydelig.

Gjennomføring for bevegelse

Bevegelsesgjennomføringen som skal sette pluggen i påfyllingsstussen må kunne overføre rotasjon og lineær bevegelse inn i vakuumkanteret. For å klare dette er det planlagt å benytte en rotær-lineær aktuator fra Caburn-MDC. Denne gjennomføringen er beregnet for vakuum ned til 10^{-1} mbar, kan roteres 360° og har mulighet for for 25mm lineær bevegelse. Maksimal aksial last er på 1.8 kg, det er forventet at dette er nok til å holde pluggen på plass under induksjonsveisingen.

Trykkmåler

Trykkmåleren som det er planlagt å benytte er produsert av MKS, og benytter to ulike trykkmålere som opererer i ulike trykkområder. I områder fra 10000Pa og ned til rundt 0,1Pa benyttes en MicroPirani trykkmåler. Denne trykkmåleren bruker en oppvarmet leder og måler effekttapet fra denne. Dette effekttapet er trykkavhengig. Den andre trykkmåleren måler trykket fra omtrent $5 \cdot 10^{-3}$ torr og ned til $1 \cdot 10^{-8}$ torr. Denne trykkmåleren benytter høy spenning og måler strømmen mellom to elektroder. Denne strømmen er avhengig av trykket. Trykkmåleren er koblet til vakuumkanteret ved å benytte en CF-flens. Det er ukjent om kalium vil ha noe å si for levetiden til trykkmåleren.



Figur 1.21: Oversikt over ventiler og varmekretser

1.6 Vakuering-, påfyllings- og forseglingsprosess

Ut i fra resultatene av preliminare beregninger er riggen som er vist i figur 1.17 utarbeidet. Denne riggen skal kunne utføre alle de ulike oppgavene som er krevd av en vellykket påfyllings og forseglingsprosess.

For at en påfyllings og forseglingsprosess skal gjennomføres med suksess, må en rekke enkle prosesser gjennomføres. Rekkefølgen og lengden av disse prosessene er viktige for å få en vellykket overordnet prosess. En oversikt over ventiler og ulike varmekretser er vist i figur 1.21.

En komplett påfyllings og forseglingsprosess er beskrevet nedenfor i detalj.

1. Fylling av påfyllingskammeret må gjøres før vakueringen kan starte. Dette gjøres ved å først utgasse påfyllingskammeret og sette det inn i en hanskeboks. I hanskeboksen overføres kalium til påfyllingskammeret, og påfyllingskammeret forsegles. Det bør dobbeltsjekkes at ventilene er i lukket stilling for å unngå oksidasjon. Påfyllingskammeret tas ut av hanskeboksen og monteres i riggen.
2. Lukking av alle ventilene og flenser. Før fyllingen starter bør riggen lekktestes for å sikre at man ikke har lekkasjer gjennom flenser eller komponenter.

3. Fylling av nitrogen på kuldefellen. Etterfylling av nitrogen må gjøres ved jevne mellomrom.
4. Start av grovvakuumpumpe. Hele riggen må nå et minimumstrykk før høyvakuumpumpen starter.
5. Åpning av ventilene F, E, D og B.
6. Ved minimumstrykket, bestemt av grovvakuumpumpen, lukkes ventil B.
7. Slå av trykkmåleren. Trykkmåleren fungerer bare mellom 0°C og 40°C . Start av varmekretsene X, Y og Z, til henholdsvis 150°C, 75°C, og 300°C. Trykkmåleren begrenser temperaturen til vakuumkanteret, da den bare kan oppvarmes til 85°C når den ikke er i drift. Vitonpakningene begrenser temperaturen i varmekrets X. Vitonpakninger har en makstemperatur på 150°C over lengre perioder og 200°C i kortere perioder.
8. Når vakuumkanteret når et minstetrykk bestemt av grovvakuumpumpen, startes høyvakuumpumpen.
9. Utgassing utføres i 24 timer, ved en minstemperatur på 300°C i varmerøret.
10. Ventil F lukkes.
11. Temperaturen i varmekrets X økes hvis kaliumet i påfyllingskammeret ikke er smeltet.
12. Ventil C åpnes og kalium strømmer ned på vakuumsrøret.
13. Alle varmekretsene slås av, og temperaturen faller ned til romtemperatur.
14. Trykkmåler slås på.
15. Ventil F åpnes, og et minimumstrykk oppstår.
16. Visuell inspeksjon av sveiseflatene for å sjekke etter kalium.
17. Ventil F lukkes for å beskytte vakuumpumpene mot uhell i sveiseprosessen.
18. Tettepluggen føres på plass, og sveises fast ved induksjonssveising.
19. Vakuumpumpene slås av, argontilførselen fjernes.
20. Kuldefelleventilen åpnes, og luft blåses gjennom riggen.
21. 3 timer etter at utluftingen startet kan flensen som holder varmerøret på plass åpnes.

Man har etter disse punktene fullført utgassing, påfylling og forsegling, og man har et varmerør som er klart til bruk. Utskylling med luft er for å få kaliumrester til å reagere med luft med lav luftfuktighet ved en lav temperatur, for å danne kaliumhydroksid. Kaliumhydroksid er en sterk base, som er fast ved romtemperatur. Man bør unngå kontakt med hud.

1.7 Sikkerhet

Hvis luft eller fuktighet kommer i kontakt med kalium er det mulighet for at det oppstår en brann eller en eksplosjon, (se 1.3.4). Riggeren er planlagt på en måte som minimerer sannsynligheten for uhell. Sannsynligheten for at uhell skjer kan videre minimeres gjennom å utføre en risikovurdering. Risikovurderingen for den planlagte riggeren er lagt ved bakerst i rapporten, under Vedlegg. Forebyggende tiltak for riggeren er å installere ekstra termoelement, bruk av verneutstyr, en måte å kontrollert senke et overtrykk i vakuumkanmeret og bruk av sprengskjold for å verne operatører under induksjonssveisingen.

Med disse risikosenkende tiltakene er det svært lite sannsynlig at det oppstår personskaade under operasjon av denne riggeren. Før byggingen av riggeren kan starte må det gjennomføres et møte med HSM Koordinator ved EPT for gjennomgang av risikovurderingsrapporten. Hvis det kommer frem at man trenger ekstra sikkerhetstiltak vil det bli tatt opp her, og man vil rette opp eventuelle feil/mangler før bygging.

Hvis hele påfyllingsprosessen må avbrytes midt i fyllingen, kan man ha kalium i vakuumkanmeret og i mange rørstrekk. For å kunne starte hele prosessen må man få kaliumet ut av systemet. Dette krever en måte å sikkert fjerne kalium på. Faghri [1] anbefaler å løse kalium i et av følgende kjemikalier, fra minst til mest reaktivt; butanol, isopropanol, etanol, metanol og vann. Hvis man skylles riggeren med ett av disse kjemikaliene vil man skylle vekk mye av kaliumet. Etter en skyllingen må riggeren demonteres og hver enkelt del må rengjøres.

Kapittel 2

Vekestrømning - Numeriske beregninger

2.1 Strømning i porøse medier

Strømning i porøse medier er et stort felt, med mye utvikling på grunn av at ulike industrier har behov for å gjøre nøyaktige beregninger på nettopp strømninger i porøse medier. Teorien anvendes i blant annet reservoarberegninger i olje- og gassindustrien, i isoleringsberegninger for bygninger og utstyr og i beregninger av energilagring. Et porøst medium kan beskrives som en solid matrise rundt et sammenkoblet hulrom [10]. Hulrommene gjør det mulig for væske å strømme gjennom det porøse materialet. For naturlige medier er porestrukturen kaotisk. Man vil på et mikroskopisk nivå se en stor lokal variasjon i hastighet og trykk. Etersom porene er små, kan man se på et større område og bruke gjennomsnittlige medieegenskaper for å regne på strømmingen. Dette er benyttet i beregninger i stor skala.

I beregningene som skal gjøres er vi interesserte i å regne på strømningshastighetene. Det er flere måter å måle hastighetene på, men hastigheten som er benyttet i denne oppgaven er Darcyhastighet. Forholdet mellom Darcyhastighet og gjennomsnittlig hastighet er gitt av ligning (2.1)

$$\mathbf{v} = \phi \mathbf{V} \quad (2.1)$$

Her er \mathbf{v} Darcyhastighet, mens \mathbf{V} er gjennomsnittlig hastighet og ϕ er porøsitet. Porøsitet, ϕ , er et mål på hulrom i forhold til totalt volum. For kontinuerlig strømning kan kontinuitetsligningen benyttes (Kontinuitet er introdusert senere, i ligning (2.3)).

For strømning i porøse medier benyttes Darcys Lov til å beregne hastighet. Darcys Lov ble originalt utledet fra eksperimenter, der man målte strømmingen gjennom et porøst medium ved en gitt trykkdifferanse. Darcys Lov er uttrykt i ligning (2.2).

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2)$$

K er permeabiliteten til det porøse materialet, u er hastigheten i x -retning og μ er viskositet. Større permeabilitet vil føre til mindre trykktap hvis strømmingen holdes konstant. Darcys lov kan også brukes når man regner 2- eller 3-dimensjonalt.

For at Darcys lov skal kunne benyttes må hastighetene man regner på være lave. Et Reynoldstall basert på porediameter, Re_p , under 1 vil føre til at Darcys lov uten tillegg kan benyttes til å regne trykktap [10, side10]. Et Reynoldstall basert på permeabilitet, $Re_K = \frac{uK}{\nu}$, kan også benyttes for å sjekke om man er i Darcy regimet [10, side 11]. Beregninger på modellen som er utarbeidet viser at man ligger under denne grenseverdien. Hvis hastigheten blir stor bør Forchheimers ligning brukes [10, side10].

2.2 Beregningsmodell

For å kunne regne på vekestrømningen i heatpipen, er det tatt utgangspunkt i en artikkel om trykk og hastighetsdistribusjonen i en horisontal veke [9]. Denne artikkelen benytter Darcys Lov, ligning (2.2), og kontinuitetsligningen for å beregne vekestrømning. Det ble beregnet på todimensjonal strømning. Kontinuitetsligningen (2.3) er vist nedenfor.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\alpha}{\rho} \quad (2.3)$$

Kontinuitetsligningen sier at massestrømmen inn og ut av et kontrollvolum må være like stor (for en inkompressibel væske). Kontinuitetsligning (2.3) baserer seg på at man har en kilde/sluk funksjon, $\alpha = f(x, y)$. Denne kilde/sluk funksjonen vil kunne fungere som et distribuert varmepådrag. En gitt varmestrøm vil tilsvare latent varme til en massestrøm; $\dot{Q} = \dot{m}h_{fg}$.

Hvis man substituerer u og v i ligning (2.3) med Darcys lov i x - og y -retning kan man utlede en ligning som beskriver trykkfeltet i en veke, ligning (2.4).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\beta \quad (2.4)$$

I ligning (2.4) er β lik $\frac{\mu\alpha}{\rho K}$. Ligning (2.4) beskriver trykkfeltet som oppstår på grunn av strømning.

For å beregne trykkfeltet må man ha grensebetingelser for trykket. I artikkelen ble det benyttet grensebetingelsene beskrevet i ligning (2.5) og ligning (2.6).

$$\frac{\partial p}{\partial x_{grense}} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y_{grense}} = 0 \quad (2.6)$$

Disse grensebetingelsene betyr at man ikke har strømning over grensene.

Fra ligningene og grensebetingelsene over ble trykkfeltet og hastighetsfeltet beregnet ved å benytte Fourier serier. Resultatet man får av Fourier seriene er veldig nøyaktig, og tar kort tid å regne ut, men for at Fourierseriene skal kunne brukes kreves det en enkel kilde/sluk funksjon.

Modellen det ble tatt utgangspunkt i ble benyttet til å regne ut trykkfeltet i en horisontal veke, med fordamping og kondensering i selve veken.

For at en beregning skal ha relevans for vekestrømningen i varmerøret, må man endre kilde/sluk funksjonen og man får derfor andre grensebetingelser. Grensebetingelsene i de vertikale flatene og på toppflaten av veken vil være de samme som for den horisontale veken, altså ingen strømning over grenseflaten. Dette uttrykker man med ligning (2.7) og ligning (2.8).

$$\frac{\partial p}{\partial y_{toppgrense}} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_{sidegrenser}} = 0 \quad (2.8)$$

Det er grensebetingelsen i bunnen av veken man må endre, denne må endres fordi kildefunksjonen endres. Artikkelen som denne analysen er basert på, benyttet en kildefunksjon som var ganske begrenset. Et rektangel var definert som det porøse området, og et mindre rektangel, inne i det større rektanget ble definert som en fordampner/sluk. Resten av rektangelet ble definert som kondensator/kilde. Dette vil ikke være en god metode å bruke for denne studien, da kondensatoren i varmerøret som skal studeres ikke ligger i nærheten av veken, og væske suges opp i veken gjennom den nedre grenseflaten.

Dette fører til at man ikke kan benytte en grensebetingelse lik (2.7), da man har en væskestrøm over nedre grense.

Hvis man antar at den vertikale veken vil være posisjonert slik at den akkurat er i kontakt med et væskebad i bunnen av varmerøret, vil trykket til væsken her være bestemt av trykket i varmerøret. Trykket i varmerøret vil være damptrykket til kalium ved driftstemperaturen. Ettersom ligning (2.4) beregner trykkendringer på grunn av strømning, blir det feil å benytte hele damptrykket som grensebetingelse. Man må trekke fra det hydrostatiske trykket som ikke bidrar til strømning. Trykket i bunnen av veken vil altså være gitt av en kjent vekehøyde/væskeshøyde. Når man kjenner denne høyden, kan man lage en Dirichlet grensebetingelse, i stedet for den vanlige von Neumann betingelsen som ble gitt tidligere for de andre flatene. Denne nye grensebetingelsen innebærer at trykkgradienten ved nedre grense ikke er lik null, og man vil få en massestrøm over grensen. Dette betyr at man ikke trenger å bekymre seg om å balansere kilde/sluk funksjonen, siden avvik vil strømme over grenseflaten. Grensebetingelsen for bunnen av veken blir:

$$p_{bunn} = p_{sat}(T) - \rho gh \quad (2.9)$$

Man har nå de ligningene man behøver for å regne på problemet med numeriske metoder.

Man kan diskretisere ligning (2.4) ved å benytte Finite Volume Method, FVM. Man tar for seg et lite areal i veken og integrerer ligning (2.10) [16]

$$\int_{\Delta x} \int_{\Delta y} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \int_{\Delta x} \int_{\Delta y} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = - \int_{\Delta x} \int_{\Delta y} \beta \quad (2.10)$$

Her er kilde/sluk funksjonen (en del av β), som er avhengig av x og y , blitt midlet for cellen ($\alpha(x, y) \rightarrow \alpha(i, j)$, der i og j er indekser som indikerer hvilken celle man er i). Når man har integrert dette vil man få ligning (2.11).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x_e} - \frac{\partial p}{\partial x_w} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial p}{\partial y_n} - \frac{\partial p}{\partial y_s} \right) \Delta x = -\Delta x \Delta y \beta \quad (2.11)$$

Indeksene e , w , n , og s står for east, west, north og south, som er grenseflatene til cellen.

Trykkderiverte ved grenseflatene diskretiseres deretter ved å bruke sentral diskretisering, (2.12)

$$\frac{\partial p}{\partial x_e} = \frac{p_E - p_P}{\Delta x} \quad (2.12)$$

I ligning (2.12) er man på grenseflaten e for cellen. Man tar altså trykket i celle til øst (E for east) minus trykket i cellen (P) og deler på distansen mellom senterpunktene til cellene for å få en approksimasjon på den deriverte av trykket. Dette gjøres likt for alle grenseflatene som ikke ligger langs noen ytre grenser. Alle celler som ikke ligger langs den ytterste kanten av beregningsområdet diskretiseres derfor som i ligning (2.13)

$$\left(\frac{p_E - p_P}{\Delta x}\right) \Delta y - \left(\frac{p_P - p_W}{\Delta x}\right) \Delta y + \left(\frac{p_N - p_P}{\Delta y}\right) \Delta x - \left(\frac{p_P - p_S}{\Delta y}\right) \Delta x = \Delta x \Delta y \beta f(i, j) \quad (2.13)$$

For celler som ligger langs ytterkanten vil den deriverte av trykket for den ytre grenseflate være lik null. Dette fører til at denne settes lik null i ligning (2.11). For celler som ligger langs bunnen benytter man approksimasjonen;

$$\frac{\partial p}{\partial y_s} = 2 \frac{p_P - p_{sat}}{\Delta y} \quad (2.14)$$

Dette gjør man på grunn av at avstanden til grenseflaten og grensetrykket her er $\frac{\Delta y}{2}$, og ikke Δy .

Hvis man har et beregningsområde som har N celler i x -retning og N celler i y -retning vil man få N^2 celler og N^2 ligninger. Man har også N^2 ukjente verdier for trykket. Dette er altså et løsbart system, som kan løses ved å benytte standard lineære systemløserne i for eksempel Matlab. En illustrasjon av beregningsområdet og grensebetingelsene er vist i figur 2.1.

Når man har beregnet trykkfeltet vil man se at trykket synker mot toppen av veken. Dette er på grunn av strømningstap. Større varmepådrag/massestrøm vil føre til større trykktap, og et lavere trykk i veken.

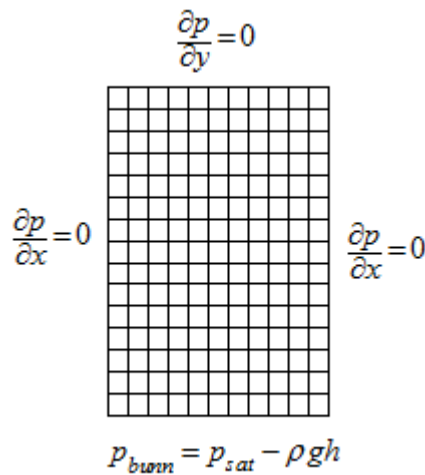
Den største trykkdifferansen man kan ha i en veke, er bestemt av effektiv radius og overflatespenning. Effektiv radius bestemmes av gjennomsnittlig porestørrelse i veken og kontaktvinkelen væsken har til overflaten av veken. Det minste trykket man kan ha i en veke er derfor bestemt ut ifra ligning (2.15).

$$p_{kritisisk} = p_{sat} - \frac{2\sigma}{r_{eff}}, p_{sat} > \frac{2\sigma}{r_{eff}} \quad (2.15)$$

Hvis trykket i veken er lavere enn det kritiske minstetrykket, vil overflatespenningen ikke lengre klare å holde væsken på plass, og væskefronten vil endre posisjon.

Hvis damptrykket i varmerøret er lavere enn $\frac{2\sigma}{r_{eff}}$, vil ligning (2.15) gi et negativt minstetrykk. Det minste trykket man kan ha er null trykk. Hvis damptrykket er lavere en kapillærtrykket, vil kontaktvinkelen til menisken endre seg. Dette vil føre til at effektiv radius endrer seg, og man ender opp med null trykk. For tilfeller der damptrykket er lavere en kapillærtrykket, gjelder altså ligning (2.16).

$$p_{kritisisk} = 0, p_{sat} < \frac{2\sigma}{r_{eff}} \quad (2.16)$$



Figur 2.1: Grensebetingelser

Etter at man har løst trykklikningen (2.4) har man trykkfeltet som oppstår på grunn av strømning. Hvis man legger til det hydrostatiske trykkfeltet vil man få det totale trykkfeltet i veken;

$$P_{\text{total}}(x, y) = P_{\text{friksjon}}(x, y) + P_{\text{hydrostatisk}}(y) \quad (2.17)$$

Det minste trykket i det totale trykkfeltet kan sammenlignes med det kritiske trykket. Hvis det minste trykket i trykkfeltet er høyere enn det kritiske trykket har veken mer kapasitet. Man kan altså påføre en større varmekraft uten at veken tørrelegges. Hvis det minste trykket i trykkfeltet er mindre enn det kritiske trykket vil deler av veken tørrelegges og modellen være ugyldig.

Det er utført noen kontrollberegninger for å se om modellen som er utarbeidet gir svar som er i samme størrelsesorden som kapillærgrenseligningen gir [1];

$$\frac{2\sigma}{r_{\text{eff}}} \geq \rho gh + \frac{\dot{m}_m h \mu}{2KA_t \rho} \quad (2.18)$$

I denne ligningen er σ overflatespening, r_{eff} er effektiv radius, \dot{m}_m er den maksimale massestrømmen (altså massestrømmen som strømmer gjennom bunnen av veken) og K er permeabilitet. Friksjonstapet er utledet fra Darcys Lov, der gjennomsnittlig strømningslengde er $\frac{h}{2}$. Ligningen er forenklet slik at man bare tar med trykkløst som oppstår i veken, og neglisjerer tykketap som oppstår på grunn av gasstrømning. Dette er gjort fordi denne studien er ment å finne den kapillære grensen til veken, og ikke til varmerøret.

Hvis man setter kapillærtrykket lik summen av det hydrostatiske trykket og friksjonstrykket vil man få den maksimale massestrømmen man kan oppnå i bunnen av veken, uten at væskefronten vil falle. Denne ligningen tar derimot ikke hensyn

til at kapillærtrykket må begrenses til metningstrykket, hvis dette er lavere enn kapillærtrykket.

Hvis man sammenligner modellene ved en temperatur som fører til at damptrykket er høyere enn kapillærtrykket vil ikke dette ha noe å si.

Sammenligninger mellom den numeriske modellen og ligning (2.18) viste at forskjellen var veldig liten. Hvis man ser på forholdet mellom maksimal varme-transport, vil man se at forskjellene mellom modellene er under 1%. Dette vil i praksis si at ulikhetene er på grunn av numeriske feil. Dette er feil som oppstår på grunn av at man ikke løser de numeriske ligningene med uendelig mange celler.

Nøyaktigheten til den numeriske utregningen er av andre orden ($\text{feil} \propto \Delta x^2$) for celler som ikke ligger ved bunnflaten. Approksimasjonen som er gjort for grensebetingelsen ved bunnflaten er av første orden ($\text{feil} \propto \Delta x$). Dette betyr at differansen mellom den analytiske løsningen og den numeriske løsningen er omtrentlig proporsjonal med Δx^2 . Dette betyr at hvis man dobler antall celler vil feilen reduseres til 1/4 av feilen man hadde med originalt antall celler.

Den diskretiserte trykklikningen (2.13) blir løst i Matlab. Et script (en serie med matematiske og logiske kommandoer) ble skrevet for å gjøre løsningen av ligningene enklere. Dette scriptet er vedlagt, og ligger i Vedlegg. Scriptet ble konstruert for å finne den maksimale kapasiteten til veken.

Scriptet fungerer på følgende måte:

1. En temperatur må defineres. Scriptet heter fysiske data fra en database, basert på tabulerte verdier fra Faghri [1].
2. Geometriske data og varmefluksdistribusjon må defineres før utregning.
3. Antall celler må defineres før utregning.
4. Programmet setter opp systemet med ligninger ut i fra oppgitte verdier og løser dem.
5. Resultatet er et trykkfelt som oppstår på grunn av strømning, dette summeres med trykkfeltet som oppstår på grunn av hydrostatisk trykk ($\rho g(h - y)$), Ut fra dette finner man det totale trykkfeltet.
6. Det totale trykkfeltet analyseres, og den minste trykkverdien sammenlignes med det kritiske minstetrykket.
 - Hvis det minste beregnede trykket er mindre enn kritisk minstetrykk er løsningen u fysisk. Scriptet vil da gå tilbake til mellom punkt 3 og 4, og justere varmefluksdistribusjon ned, før utregningen gjøres på ny.
 - Hvis det minste beregnede trykket er større enn kritisk minstetrykk er løsningen mulig, og veken har ekstra kapasitet. Scriptet vil da gå tilbake til mellom punkt 3 og 4, og justere varmefluksdistribusjon opp, før utregningen gjøres på ny.
 - Hvis det minste trykket er likt det kritisk minstetrykk er løsningen på grensen til å være u fysisk. Scriptet avslutter itereringen.

7. Den gjennomsnittlige varmekraften beregnes og totalt trykkfelt blir plottet.
(Hastighetsfeltet kan også plottes, da det er direkte koblet til trykkfeltet)

Tabell 2.1: Geometriske mål og vekeegenskaper

Bredde	300 mm
Høyde	300 mm
Tykkelse	2 mm
Permeabilitet	$3.14 \cdot 10^{-12} m^2$
Effektiv Radius	$11.9 \cdot 10^{-6} m$

2.3 Resultat av numeriske beregninger

Når man har rammeverket for å beregne kapasiteten til veker, kan det håndtere de fleste situasjoner man kan tenke at oppstår. Motivasjonen for å utvikle en numerisk modell for utregning av vekekapasitet, er å se på effekten av ujevn varmekraft. Hvis isolasjonen mellom varmekilden og varmerøret fjernes vil man få en større varmekraft fra varmekilden til varmerøret. Dette vil kunne inntreffe i reell bruk av varmerør i sideforingen til aluminiums elektrolyseceller ved at sideforingen sprekker og varm smelte trenger inn i sprekken og kommer nært varmerøret. Dette fører til at det oppstår en ujevn varmekraftfordeling.

Det vil bli sett på 7 ulike varmedistribusjoner, hvor man har en jevn fluks i tillegg til et lite område med høy fluks i ulike posisjoner. Deretter vil de resulterende trykkfeltene og maksimale varmekrafter sammenlignes. Maksimal gjennomsnittlig varmekraft er den varmekraften som skaper et minstetrykk i det totale trykkfeltet som er lik det kritiske minstetrykket $(2.15)/(2.16)$. Et trykk lavere enn dette vil veken ikke klare å skape. Hvis man setter på større varmekraft vil kapillærkreftene svikte, og væskefronten vil trekke seg tilbake til et punkt der man igjen har et trykk i veken som er over et visst minstetrykk. Områder som ikke er mettet med væske vil fort overopphetes.

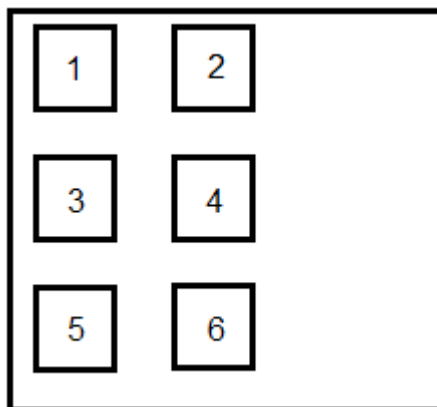
For å enklere kunne sammenligne de ulike tilfellene, bruker man samme areal på området med gjennombrenning og man bruker en varmekraft i gjennombrenningen som er ti ganger større enn den normale varmekraften. Alle beregningene kjøres til at man har maksimal kapasitet i veken.

Figur 2.2 viser posisjonen til gjennombrenningen i de ulike varmedistribusjonene. Områdene til gjennombrenningen er 10% av totalarealet av veken (dette tallet vil variere litt, da oppdelingen av celler vil føre til at nøyaktig 10% ikke vil oppnås i noen tilfeller), og plasseringen er $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ og $\frac{3}{4}$ av høyden, og $\frac{1}{4}$ og $\frac{1}{2}$ av bredden.

Vekens geometriske mål og egenskaper er listet i Tabell 2.1. Vekeegenskaper er hentet fra en nikkelveke som ble benyttet i rate-of-rise forsøk [26]. Disse egenskapene vil gi en vekekapasitet som ligger i nærheten av den planlagte veken. Beregningen er gjort med kaliumegenskaper ved 900K.

De resulterende trykkfeltene er plottet i figur 2.3. I figuren er høyfluksområdene i samme høyde plottet side om side. Maksimal gjennomsnittlig varmekraft for de ulike høyfluksposisjonene er listet i tabell 2.2.

Maksimal gjennomsnittlig fluks for en jevnt fordelt varmekraft er i denne veken $14,9 \text{ kW/m}^2$. Man kan se at maksimal gjennomsnittlig fluks for høyfluksposisjon 5 og 6 er høyere enn dette. Dette skyldes at gjennomsnittlig strømlengde minker



Figur 2.2: Posisjon for gjennombrenning for de ulike beregningene

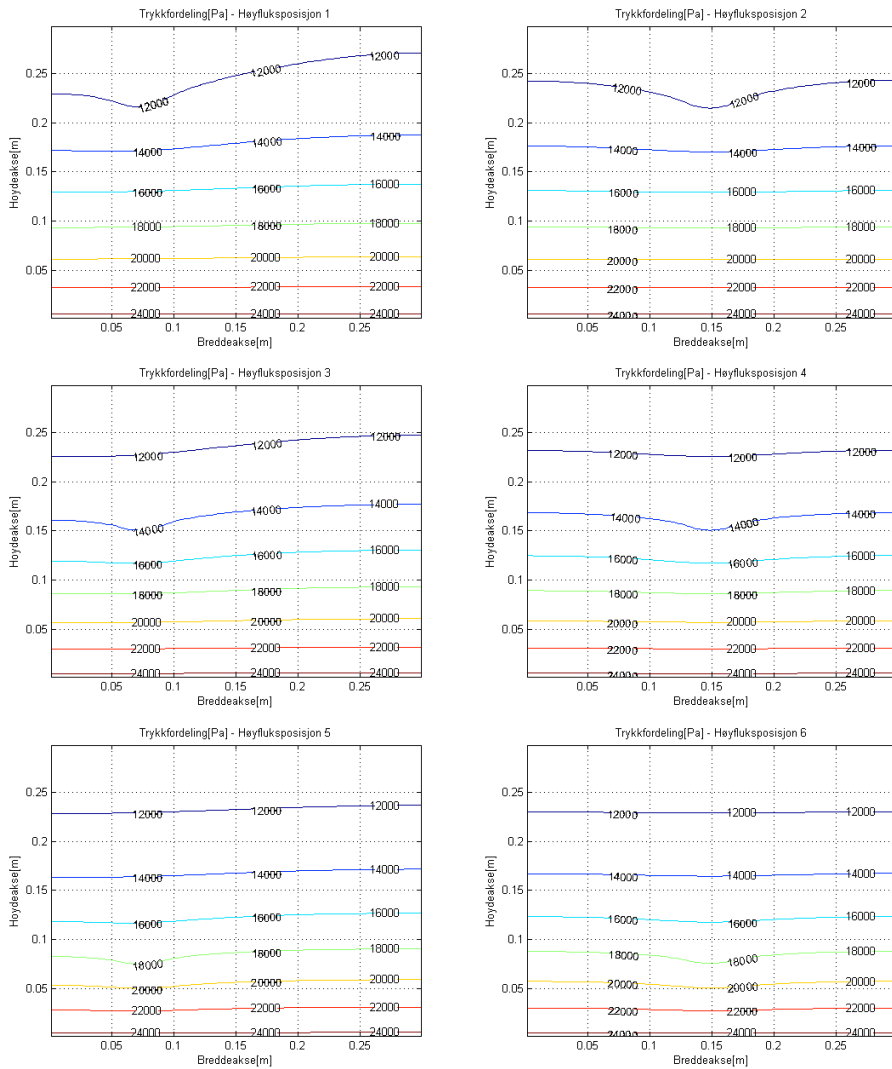
Tabell 2.2: Maksimal gjennomsnittlig varmekraft for ulike høyfluksposisjoner, hvor høy fluks er definert som 10 ganger normal fluks

Posisjon	Maksimal gjennomsnittlig varmekraft[kW/m ²]
1	13.74
2	14.03
3	14.66
4	14.88
5	15.59
6	15.69
Jevn varmekraft	14.90

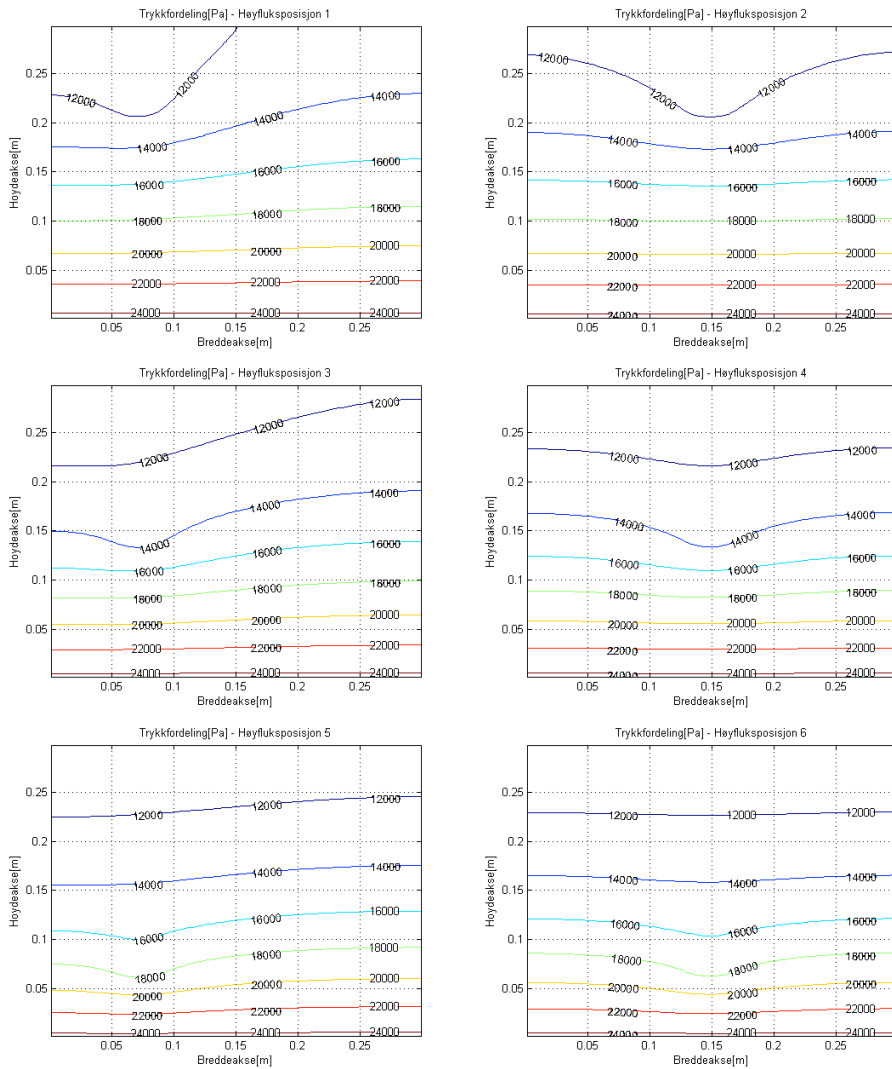
(trykktapet er proporsjonalt med strømningslengden). Høyfluksposisjonene i midten av veken (3 og 4) vil ikke føre til store endringer i maksimal gjennomsnittsfluks i forhold til jevnt varmepådrag fordi en konsentrasjon av fluksen i midten av veken ikke vil endre gjennomsnittlig strømningslengde. En høyfluksposisjon som ligger over midten av veken vil føre til nedsatt maksimal gjennomsnittsfluks fordi gjennomsnittlig strømningslengde vil øke. Høyfluksposisjon 1 er den posisjonen som har lavest gjennomsnittlig maksimalfluks (På grunn av lengst avstand fra bunnen av veken).

Det er antydnet [21] at en gjennombrenning/hotspot vil føre til en fluks som kan bli opp mot 300kW/m². Siden dette er den verste fluksen varmerøret vil bli utsatt for, er beregningene gjort om igjen med endrede forutsetninger. I stedet for at høy fluks er definert som 10 ganger større enn vanlig fluks, blir høy fluks definert som 300kW/m². Posisjonene til høyfluksområdene, og arealet til disse er ikke endret. Temperatur settes til 900K. De resulterende trykkfeltene er plottet i figur 2.4, mens de maksimale gjennomsnittlige varmekraftene er listet i tabell 2.3.

Ved en høyfluks på 300kW/m², vil posisjon 1 og 2 føre til at det laveste trykket



Figur 2.3: Resulterende totalt trykkfelt for høyfluksposisjoner 1, 2, 3, 4, 5, og 6, hvor høy fluks er 10 ganger normal fluks



Figur 2.4: Resulterende totalt trykkfelt for høyfluksposisjon 1, 2, 3, 4, 5, og 6, hvor høy fluks er $300\text{kW}/\text{m}^2$

Tabell 2.3: Maksimal gjennomsnittlig varmekraft for ulike høyfluksposisjoner, hvor høy fluks er $300\text{kW}/\text{m}^2$

Posisjon	Maksimal gjennomsnittlig varmekraft [kW/m^2]
1	11.88
2	12.60
3	14.33
4	14.85
5	16.45
6	16.66

som oppstår på grunn av strømning ($P_{frikisjon}$), oppstår midt i høyflukssonen. At trykket er minst i senter av høyflukssonen betyr at man har strømningstrykktap fra toppen av veken og ned til høyfluksposisjonen. Dette betyr at man har signifikant strømning fra toppen av veken og ned mot høyfluksområdet. Man har altså strømning som går opp sidene, inn mot midten og ned i høyflukssonen. Det minste trykket i det totale trykkfeltet (P_{tot}), er derimot i toppen av veken i alle tilfellene som er beregnet.

På grunn av det hydrostatiske trykket kreves det store punktflukser for å skape dryout inne i veken (Altså at det laveste trykket oppstår inne i veken). Hvis den høye fluksen ikke er veldig mye større enn normal fluks, og området den høye fluksen oppstår i ikke er for lite, vil man ha dryout i toppen av veken først.

Gjennombrenning vil kunne føre til en uakseptabel overoppheting av veken. For at denne overopphetingen ikke skal kunne skje må veken unngå 'dryout' ('dryout' er at væsken fordamper raskere enn veken kan levere i et område, dette fører til veken tørker ut i dette området). For at veken skal kunne håndtere høyfluksområder, må man ha ekstra kapasitet i veken. Dette betyr at man i normale situasjoner må kjøre veken som det er gjort beregninger på med gjennomsnittlige flukser under $14,9\text{kW}/\text{m}^2$.

Hvis det er et krav at veken må takle varmekraft over $14,9\text{kW}/\text{m}^2$ må høyden på veken minskes. Det er fordelaktig at veken er lik høyden på aluminiumscellen som skal kjøles. Hvis vektehøyden blir mindre enn dette oppstår det nye utfordringer. For å minske vektehøyden må man benytte flere varmerør eller fordele kondensatet til flere veker plassert i ulike høyder. Antall varmerør/veker som benyttes bør bestemmes ut i fra krav til varmekraft og krevd sikring mot gjennombrenning.

I en analyse av aluminiumsceller mener Elkem at man kan benytte en varmekraft på $10\text{kW}/\text{m}^2$ som standard varmekraft. Den maksimale varmekraften i en hotspot er i analysen beregnet til å være ca $120\text{kW}/\text{m}^2$, mens gjennomsnittlig varmekraft i en hotspot vil være ca $100\text{kW}/\text{m}^2$. Det er forventet at en hotspot vil ha en høyde på rundt 100mm, og en lengde på mellom 100 mm og 1000 mm[23].

Det blir derfor sett på tre ulike tilfeller der man har en hotspot med høyde på 100 mm og bredde på 300 mm (lik bredden på veken), i tre ulike høyder. Normal fluks holdes konstant, og høy fluks varieres til man når kapasiteten til veken. Geometriske mål og vekeegenskaper er ikke forandret fra tidligere beregninger.

Tabell 2.4 viser resultatene av beregningene, som man kan se er maksimal fluks i

Tabell 2.4: Maksimal varmekraft i en hotspot

Hotspotens høydeposisjon	Maksimal varmekraft i hotspot[kW/m ²]
25 mm - 125 mm	40.09
100 mm - 200 mm	24.75
175 mm - 275 mm	19.76

hotspoten mindre enn krevd varmekraft, 120 kW/m². Man kan derfor ikke håndtere en hotspot som har en høyde på 100mm og en bredde på 300mm. Man må derfor redusere vekehøyden for å få høyere vekekapasitet. En reduksjon av vekehøyden ned til 150 mm vil føre til at veken har bedre kapasitet. En hotspot som ligger langs hele bredden og fra 50mm høyde til 150mm høyde, vil ha en maksimal varmekraft på 71,23kW/m². Det er antatt en normal varmekraft på 10kW/m² under høyflukssonen.

Det er altså ikke nok å redusere vekehøyden til 150 mm for å kunne håndtere varmekrafter på 120kW/m².

Det er mulig å øke kapasiteten til veken ved å øke tykkelsen. Dette vil føre til en økning i kapasiteten som er proporsjonal med økning i tykkelse. En økning i veketykkelsen fra 2 mm til 4 mm vil gi en dobling i kapasitet. Det er antatt i beregningene som er gjort at trykket hovedsakelig endrer seg i høyde- og bredde- retning. Ved å øke tykkelsen mye vil man også ha en signifikant trykkvariasjon i tykkelsesretningen; man må da benytte en 3D modell. En økning i tykkelsen vil også føre til en større varmemotstand gjennom veken.

Kapittel 3

Konklusjon og forslag til videre arbeid

Påfylling og vakuumering

Et litteratursøk ble gjennomført for å finne metoder som har blitt brukt for å fylle og forsegle varmerør. Mange ulike metoder ble funnet, men få egnet seg for varmerør av nikkel med kalium som arbeidsmedium. De metodene som egnet seg ble analysert, og metoden som egnet seg best ble valgt som generelt konsept for påfylling og forsegling av nikkelvarmerøret med kalium som arbeidsmedium. Dette konseptet gikk ut på å benytte et fyllekammer for å smelte og overføre kalium til varmerøret, før varmerøret blir forseglet ved å benytte induksjonssveising. Beregninger ble utført for å sikre at man fikk riktige prosedyrer for å gjennomføre hele påfyllingsprosessen. En steg-for-steg prosedyre for vakuumering, fylling og forsegling ble utviklet fra disse beregningene. Denne prosedyren gir eksakte tall på hvilke temperaturer man må varme varmerøret til, og hvordan alle de små delprosessene skal gjennomføres.

Varmerøret må først utgasses. Dette er en prosess der man bruker vakuum og høy varme til å desorbere molekyler som ligger på overflaten i varmerøret. Etter utgassing kan varmerøret fylles. Dette gjøres ved å smelte kalium og overføre det ved å benytte et påfyllingsrør som fungerer som en trakt. Etter påfyllingen settes det en plugg i påfyllingsstussen til varmerøret og denne sveises fast ved å benytte induksjonssveising. Dette er i grove trekk hele fylle- og forseglingsprosessen.

For fylle- og forseglingsriggeren er det gjort mye forberegninger, men litt gjenstår før den er ferdigstilt. Induksjonssveisingen må testes og verifiseres som en god forseglingsmetode før riggen kan benyttes.

Før et varmerør er ferdig konstruert og testet er det vanskelig å si noe om ting det kan jobbes videre med i riggen. Det kan utvikles metoder for å bli kvitt det adsorberte oksygenet, for eksempel ved å kjemisk desorbere det med H_2 gass ved høy temperatur, eller ved å skylle varmerøret i kalium som renses etter hver skylling.

Numeriske beregninger

Det er relativt enkelt å beregne kapasiteten (maksimal massetransport) til en veke ved en uniform varmekraft. Dette kan gjøres med ligninger som finns i varme-rørlitteratur. Det å beregne kapasiteten til en veke som er utsatt for en ujevn varmedistribusjon er vanskeligere på grunn av at strømmingen blir todimensjonal. Det er derfor utarbeidet en modell som kan modellere 2D strømming i en veke. Beregningsmodellen som er utarbeidet benytter Darcys lov, i kombinasjon med kontinuitetsligningen for masse, for å beregne det stasjonære trykk- og hastighetsfeltet som oppstår på grunn av et varmepådrag. Varmepådraget kan være uniformt eller ujevnt. Modellen har blitt brukt til å beregne trykk- og hastighetsfelt til ulike varmepådrag.

Det er vanskelig å si noe om kapasiteten til en veke med ujevn varmedistribusjon før en utregning av trykkfeltet. En veke med en jevn varmedistribusjon i tillegg til et område med høy varmekraft vil ha en kapasitet som er avhengig av posisjonen til den høye varmekraften. Kapasiteten går ned hvis høyden til høyfluksposisjonen øker. Kapasiteten minker også hvis høyflukssonen flyttes ut i fra senterlinjen til veken.

Med den numeriske modellen kan man beregne krevd tykkelse og høyde for en veke som skal operere ved en gitt jevn varmedistribusjon med overkapasitet til å håndtere en gjennombrenning av en gitt størrelse.

For den numeriske beregningsmodellen kan man jobbe videre med mange enkeltting. Man kan utvide modellen til tre dimensjoner, man kan gjøre den transient, man kan legge til gasstrømming og temperaturfordelingen i veken.

For veker er det anbefalt å se videre på biporøse veker. Disse har en grov porestruktur som fører til høy permeabilitet inne i veken, og en fin porestruktur som gir lav effektiv radius i væske-gass interfasen i de ytre flatene i veken. En lav effektiv radius og en høy permeabilitet er ikke forenlig i en isotrop veke. En veke med grov porestruktur som er omsluttet av en veke med fin vekestruktur vil i teorien gi overlegen ytelse i forhold til standard veker. Den grove veken må ha en effektiv radius som gjør at hele veken kan mettes med væske, når man ikke har avdampning. Når hele veken er mettet, vil alle de fine porene i den ytterste veken også være mettet med væske. Når man påfører et varmepådrag vil de små porene kunne opprettholde et veldig lavt trykk i toppen av veken, mens den grove vekestrukturen vil føre til et minimalt trykktap gjennom veken.

Kapittel 4

Vedlegg

Komponentliste

Kategori	Plassering	Type	Navn	Dimensjon	Nummer	Leverandør	Antall	Pris[Euro]	Part Number
Generelt	Vakuumkammer	Gjennomføring	Vannkjølt gjennomføring for induksjonskoll	DN40CF	1	Caburn	1	193	9462008
	Vakuumkammer	Six-Way cross	Vakuumkammer, med seks flenser	DN100CF	2	Caburn	1	512	407006
	Vakuumkammer	Motion/Feedthrough	Rotary/linear, standard	DN16CF	3	Caburn	1	1186	672000
	Vakuumkammer	Viewport	Seeglass	DN40CF	4	Caburn	1	72	1210001
	Vakuumkammer	Multiport	Straight, 2xDN16CF	DN100CF	5	Caburn	1	188	1601100
	Vakuumkammer	Zero length reducer	CF to CF Zero-length reducers	DN100CF-DN16CF	6	Caburn	1	118	150068
	Vakuumkammer	Nippleducer	Conical Nipple Reducer	DN16CF-DN40CF	7	Caburn	2	218	402030
	Vakuumkammer	Straight connector	Minimum length straight connector	DN40CF	8	Caburn	1	131	1115150
	Vakuumkammer	Multi-mini	Multi-mini flange	DN40CF	9	Caburn	1	556	409014
	Vakuumkammer	Viewport	Seeglass	DN16CF	10	Caburn	1	72	1210000
	Vakuumkammer	Flange	Non-rotatable blank flange	DN16CF	11	Caburn	3	33	110000
	Vakuumkammer	Flange	Te	DN40CF	12	Caburn	2	200	404002
	Vakuumkammer	Hybrid connector	Flange to flange CF to KF	DN40CF-DN25KF	13	Caburn	2	63	7730002
	Vakuumkammer	Flexible coupling	Flexible coupling	DN40CF	21	Caburn	1	124	400003
	Vakuumkammer	90deg Bend	Straight connectors	DN40CF	22	Caburn	2	146	403002
Vakuumkammer	Nippleducer	Straight connectors Full nipple	DN40CF-Custom len	23	Caburn	1	107	1116011	
Ventiler	Fyllekammer	All metall inline	Conical Nipple Reducer	DN60CF-DN40CF	14	Caburn	1	178	402032
	Pumpekrets	Inline valve	All metall inline valve	DN40CF	15	Caburn	1	1401	316001
	Fyllekammer	Inline valve	Standard HV valve, viton	DN40CF	16	VakCon	4	ca3000NOK	-
Spesialutstyr	Vakuumkammer	Inline valve	Standard HV valve, viton	DN16CF	17	Caburn	1	446	320004
	Vakuumkammer	Pumpestasjon	PT-80-Dry	DN60CF	18	VakCon	1	97900NOK	-
	Pumpekrets	Trykkmåler	Piran-i-penning kombi m/display	DN40CF	19	VakCon	1	16400NOK	-
		Kuldetelle	LN2, SS, Adixen	DN25KF	20	VakCon	1	14550NOK	-
Oppvarming	Inertgasskammer	Tape heater	Har ikke funnet leverandør, bruker anbefaling fra verkstedfolk	ca 1000W	24				
	Fyllekammer	Tape heater		ca 500W	2				
	Generell oppvarming	Tape heater		ca 1000W	-				
Pakninger	Over alt	Nikkelpakning	Nikkelpakning	DN16CF	-	Caburn	9	243	191060
		Nikkelpakning	Nikkelpakning	DN40CF	-	Caburn	17	544	191061
		Nikkelpakning	Nikkelpakning	DN60CF	-	Caburn	1	54	191063
		Nikkelpakning	Nikkelpakning	DN160CF	-	Caburn	2	202	191067
		Standard kopperprakt	Standard kopperpakning	DN16CF	-	Caburn	20	30	1113240
		Standard kopperprakt	Standard kopperpakning	DN40CF	-	Caburn	20	30	1113241
		Viton KF for kuldetell	Viton KF for kuldetelle	DN25KF	-	Caburn	2	10	7710001
Muttre og lignende	Over alt	Mutter og bolt og 'wä	Mutter og bolt og 'washer'	M8 Nuts and bolts & washers		Caburn	102	159.12	
		Mutter og bolt og 'wä	Mutter og bolt og 'washer'	M8 Nuts and bolts & washers		Caburn	8	12.48	
		Mutter og bolt og 'wä	Mutter og bolt og 'washer'	M4 Nuts and bolts & washers		Caburn	60	93.6	
SUM NOK									131850
SUM Euro									7312.2
Totalt NOK									194003.7

(Kurs som er brukt er 1 euro =8,5NOK

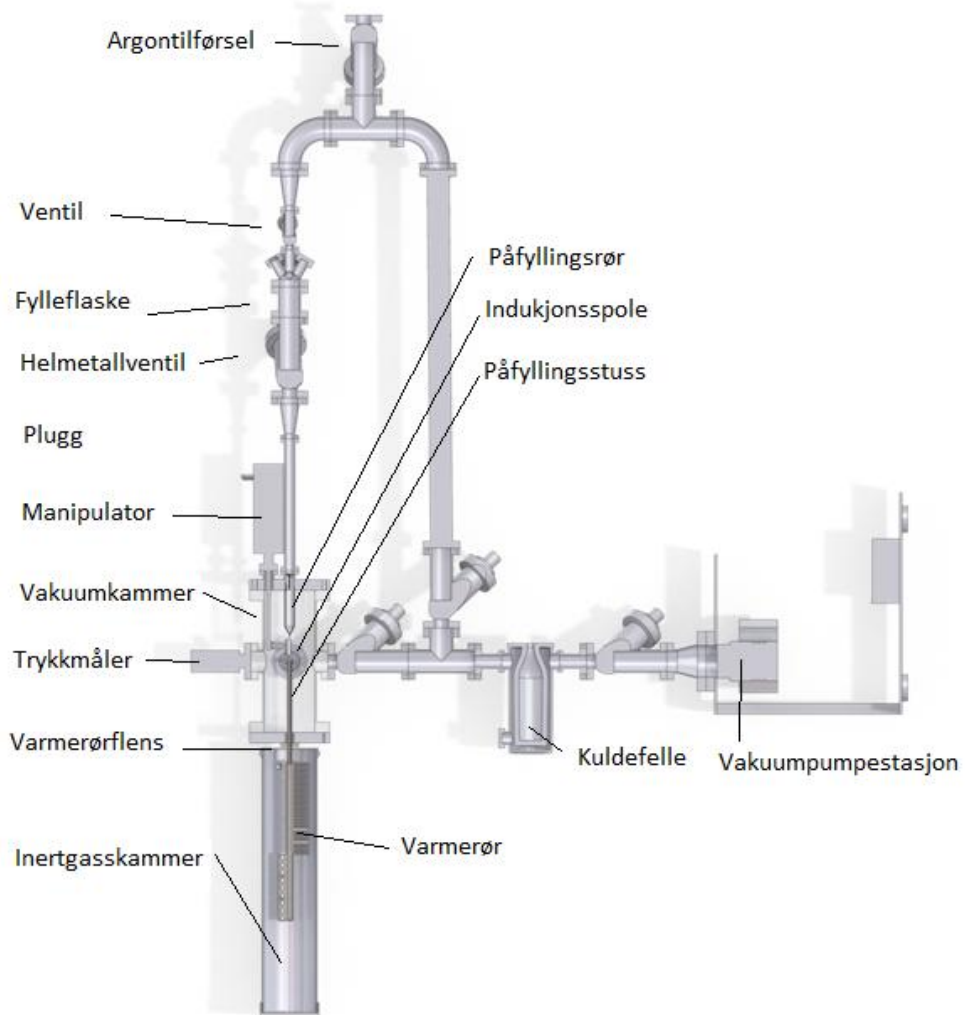
Risikovurderingsrapport

1 Innledning

Denne riggen er planlagt for å vakuumere, fylle og forsegle et varmerør med flytende kalium. Riggen skal hovedsakelig lages av rustfritt stål, og flenses til et varmerør av nikkel. Varmerøret vil bli varmet opp til 300°C under prosessen, mens resten av riggen vil varmes opp til ca 100 °C. Deretter vakuumeres hele systemet under oppvarming i over 12 timer. Deretter åpnes en ventil, og kalium fylles på varmerøret. Deretter forsegles varmerøret ved å benytte induksjonssveising. Induksjonssveising benytter en spole til å varme opp det som skal sveises. Denne spolen kjøles ved å sirkulere vann inne i spolen.

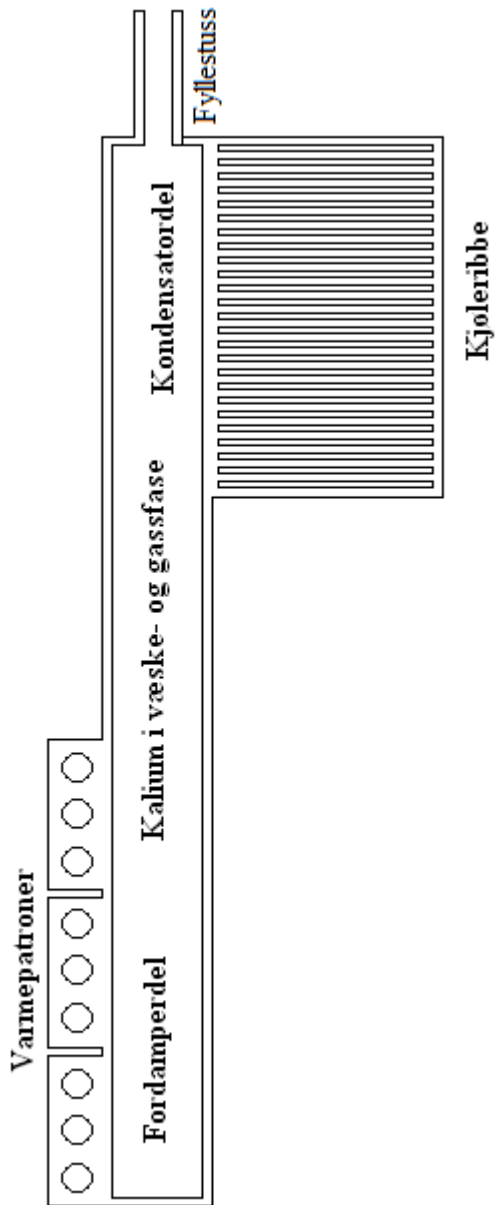
Formålet med riggen er å klargjøre et varmerør for ytelsestester.

2 Tegninger, foto, beskrivelser, prosedyrer



Figur 1-Vakuumrigg

Riggen trenger vann, strøm og argongasstilkobling.



Figur 2-Varmerør

3 Nødstopprosedyre

Slå av pådrag til varmekilder. Slå av vakuumpumper. Steng argongassventil.

4 Organisering

Labansvarlig	Morten Grønli
Linjeleder	Johan Hustad
HMS ansvarlig	Johan Hustad
	Erik Langørger(HMS koordinator)
Romansvarlig	-
Prosjektleder	Erling Næss
Ansvarlig riggoperatør	Geir Hansen

5 Evakuering

Evakuering skjer på signal fra alarmklokker eller lokale gassalarmstasjon med egen lokal varsling med lyd og lys utenfor aktuelle rom. Evakuering fra rigg området foregår igjennom merkede nødutganger.

6 Varsling

6.1 Før forsøkskjøring

Ved oppstart og kjøring av rigg skal følgende varsles på e-post, minst 2 arbeidsdager før kjøring:

- Labsjef NTNU
- HMS koordinator NTNU/Sintef
- Prosjektledere på naborigger varsles for avklaring rundt bruk av avtrekksanlegget uten fare eller forstyrrelse av noen art

6.2 Ved uønskede hendelser

Ved brann en ikke er i stand til å slukke med rimelige lokalt tilgjengelige slukkemidler skal nærmeste brannalarm utløses og arealet evakueres raskest mulig. En skal så være tilgjengelig for brannvesen/byggningsvaktmester for å

påvise brannsted. Kalium reagerer kraftig med vann, og man bør derfor ikke slukke kaliumbranner med vann.

Om mulig varsles så labsjef Morten Grønli, Erik Langørgen og instituttleder Johan Hustad.

Ved gassalarm skal gassflasker stenges umiddelbart og området ventileres. Klarer man ikke innen rimelig tid å få ned nivået på gasskonsentrasjonen så utløses brannalarm og laben evakueres. Dedikert personell og eller brannvesen(om varslet) sjekker så lekkasjested for å fastslå om det er mulig å tette lekkasje og lute ut området på en forsvarlig måte. Varslingsrekkefølge som i overstående punkt.

Ved andre uønskede hendelser: Førstehjelpsutstyr i HMS-skap ui 1.etasje, ring 113 ved alvorligere hendelser.

Rapporteringsskjema for uønskede hendelser på

http://www.ntnu.no/hms/2007_Nettsider/HMSRV0401_avvik.doc

7 Risikovurdering

7.1 Eksplosive soner

Hydrogengass kan dannes hvis kalium kommer i kontakt med vann (Dette vannet kan være i væske eller gassform, altså løst i luft). Denne hydrogengassen antennes eller eksploderer ved riktige konsentrasjoner i luft. Denne hydrogengassen kan også, ved høye temperaturer, danne ammoniakk ved kontakt med nitrogen. Selvantennelsestemperaturen for H₂ og O₂ er 500°C. 4-74vol% er branngrensen, mens 18,3-59vol% er eksplosjonsgrensen til hydrogengass i luft.

Kalium vil reagere eksotermt ved kontakt med luft. Reaksjonshastigheten ved romtemperatur er lav. Ved høye temperaturer vil kalium antenne og brenne kraftig i luft. Dette vil føre til en temperaturøkning, som igjen vil føre til en trykkøkning.

Ved standard bruk av riggen vil all luft pumpes ut av systemet, og det er ikke mulighet for kalium og luft/vann å reagere. Det er bare ved svikt i systemet, altså lekkasje av luft eller vann inn i vakuuriggen, at denne reaksjonen kan skje.

En signifikant lekkasje av luft inn i systemet vil merkes, da man ikke vil klare å holde et lavt trykk. Hvis et minimumstrykk ikke nås, stoppes fyllprosessen.

En lekkasje av vann inn i systemet vil bare kunne skje gjennom induksjonskøilen. Det er under induksjonsveisingen at det er størst fare for lekkasje, da den høye temperaturen kan føre til gjennombrenning av spolen.

En lekkasje inn i systemet garanterer ikke at kalium og vann kommer i kontakt, da induksjonsveisingen bare starter når pluggen som skal induksjonsveises fast er satt på plass inne i påfyllingsstussen. En lekkasje av vann inn i systemet vil også raskt kunne detekteres, da trykket vil øke.

En lekkasje av vann vil kunne føre til at luft også kommer inn i systemet. Man har derfor potensial til å danne knallgass, altså en gassblanding bestående av H_2 og O_2 .

Ved bruk av 10g i heat pipen vil det potensielt kunne dannes 0,26g hydrogengass, dette tilsvarer tre liter hydrogengass ved standard temperatur og trykk.

Rigg og areal ble gjennomgått på vurdering av Ex-sone.

-Sone 0: Alltid eksplosiv atmosfære, for eksempel inne i tanker med gass eller brennbar væske.

-Sone 1: Primær sone, tidvis eksplosiv atmosfære for eksempel fyll eller tappepunkt.

-Sone 2: Sekundært utslippssted, kan få eksplosiv atmosfære ved uhell, for eksempel ved flenser, ventiler eller koblingspunkt

Se Ex-sonekart. Skal lages når ex-soner er tilstede, ta utgangspunkt i P&ID.

Vurdering: Ut fra ovennevnte soner, ansees anlegget som en sone 2; sekundært utslippssted som bare kan få eksplosiv atmosfære ved et uhell. Det anses som nødvendig å installere noe Ex-sikring

7.2 Trykkbeholdere

Ingen komponenter skal i teorien være under høyt trykk. Det største trykket ved vanlig drift er 1atm(absolutt).

Trykktesting anses som unødvendig, da riggen aldri skal opereres med overtrykk.

7.3 Påvirkning av ytre miljø

Eksperimentene vil ikke generere røyk, gass eller unormalt avfall. Riggen består derimot av nikkel og kalium, noe som må behandles riktig når det blir kastet.

Vurdering: Ingen utslipp

7.4 Bruk og behandling av kjemikalier

Eksperimentet vil fylle et varmerør med kalium. Dette vil skje i en vakuumbeskyttet rigg. Ved lekkasjer vil kalium kunne komme i kontakt med luft, og hydrogengass, kaliumoksid og kaliumhydroksid vil kunne bli dannet. Ved direkte kontakt med hud eller ved svelging er ren kalium giftig. Ved en atmosfæres trykk er kokepunktet til kalium 759°C, dette vil føre at kalium hovedsakelig vil være i fast eller væskeform. Hvis kalium og vann reagerer vil kaliumhydroksid og hydrogengass dannes. Hydrogengass er ikke farlig i lave konsentrasjoner, gassen er ikke giftig. Kaliumhydroksid er en sterk base, og er farlig ved kontakt og svelging. Kaliumhydroksid vil være i fast eller væskeform.

Det skal benyttes argongass under fylling. Argon er ikke giftig, og med de små mengdene som benyttes vil det ikke være fare for kvelning pga fortregning av luft.

Vurdering: Det er ikke noe forbruk eller produksjon av helseskadelige kjemikalier ved vanlig drift.

7.5 Risikovurderingsmetode

Risikovurderingen ble utført i følge NTNU/SINTEF Standard prosedyre for risikovurdering, med siktepunkt normal operasjonsprosedyrer for den aktuelle rigg. Metoden er kort beskrevet nedenfor.

Det er fokusert på:

1. Hindre skader på personer
2. Hindre lekkasjer og utslipp som kan medføre brann og eller eksplosjon eller spredning av giftig gass eller kjemikalier.
3. Skadebegrensning med tanke på materielle verdier.
4. Utslipp til det ytre miljø
5. Tap av omdømme

7.6 Risikoverdimatrise

7.7 Risikotiltak

Installering av sprengplate, benyttelse av sprengskjold.

7.7.1 Personlig verneutstyr

- Det er påbudt med vernebriller i sonen anlegget er plassert i når anlegget er i drift.
- Det skal benyttes hansker når det er mulighet for kontakt med varme flater

7.7.2 Generelt

- Området rundt forsøksoppsetningen avskjermes
- Traverskran og truck skal ikke brukes i nærheten av anlegget under eksperimentet
- Gassflasker skal plasseres med avstengningsventil lett tilgjengelig

7.7.3 Sikkerhetsutrustning

7.7.4 Spesielle tiltak

Det bør skaffes en brannslukker som egnes til å slukke kaliumbranner, da vann vil føre til en mer intens brann.

8 Konklusjon

Riggen er bygget til god laboratoriumspraksis (GLP). Det er anbefalt tiltak for å bedre sikkerheten.

9 Befaring etter rettelser

Ny befaring etter utbedring av tiltak

10 Appendix

11 Lover Forskrifter og Pålegg som gjelder for riggen

- Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid
- Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr
- Forskrift om sikkerhet ved arbeid og drit av elektriske anlegg
- Forskrift om elektriske forsyningsanlegg.
- Forskrift om utstyr og sikkerhetssystem til bruk i eksplosjonsfarlig område
- NEK 420
- Forskrift om brannfarlig vare
- Forskrift om håndtering av eksplosjonsfarlig stoff

Ref #	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Rec#	Recommendations	Action
1	Liten lekkasje av luft inn i vakuurriggen	Lekkasje gjennom flenser eller feilkoblinger og uhell	Kalium – oksygen reaksjon, med mulig brann, avhengig av lekkasjestørrelse og temperatur på kaliumet.	Gode klargjorte prosedyrer for riggen, og vakuumtesting av riggen før bruk. Trykkmålinger slik at man kan detektere lekkasjer.		En måte å senke et eventuelt overtrykk i vakuurriggen på. Ved oppdaget lekkasje slås oppvarming av, og vakuumpumpen isoleres ved å lukke ventiler eller ved å koble den fra.	
2	Stor lekkasje av luft inn i vakuurriggen	Uhell	Kalium – oksygen reaksjon, med mulig brann, avhengig av lekkasjestørrelse og temperatur på kaliumet	Se #1		Se #1	
3	Lekkasje av vann inn i vakuumkammeret	Gjennombrenning av kobberspolen eller lekkasje i sprekk i kobberspole	Mulig kalium-vann reaksjon med varme og hydrogensassproduksjon. Ved nok oksygen tilstede vil det kunne oppstå en eksplosjon	God preliminar testing av induksjonssveising. Sikker utforming av plugg, slik at direkte kalium-vann kontakt unngås.		Se #1 Bruk av sprengskjermer og passende sikkerhetsutstyr under selve induksjonssveisingen	
4	Feil med termoelement fører til overoppheting	Elektrisk feil, brukerfeil, installasjonsfeil	Temperaturavvik som kan føre til ødeleggelse av utstyr og lekkasjer	Ekstra temperaturmålinger. Oversikt over pådrag til varmeelement		Dimensjoner slik at man ikke hør for stor mulighet til overoppheting.	

Ref #	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Rec#	Recommendations	Action
5	Feil med pådrag til varmelement	Elektrisk feil, brukerfeil, installasjonsfeil	Temperaturavvik som kan føre til ødeleggelse av utstyr og lekkasjer	Ekstra temperaturmålinger. Oversikt over pådrag til varmelement		Mange termoelement	
6	Akutt lekkasje i induksjonsspølen under fylling (lite trolig)	Materialfeil	Kraftig reaksjon og dannelse av hydrogengass. Mulig eksplosjon ved lekkasje av luft.	God tykkelse på induksjonsspølen og sjekk av denne før fylling.		Bruk av eksplosjonsvern(For personer) under fylling.	
7	Høyere trykk	Lekkasjer inn i riggen	Reaksjon	Se #1		Se #1	
8	Lavere trykk	God vakuurnrigg	-	-		-	-
9	For høy temperatur	Termoelement/varmeelement-svikt	Overoppheting	Se#4/5		Se#4/5	
10	For lav temperatur	-	-	-		-	-
11	For høy effekt i induksjonsspølen	Mulig nedsmelting av spølen med medfølgende vannlekkasje	Se#6	God effektstyring. Når krevd effekt er kjent, lag grenser for effektuttak.		Se#6	
12	For lav effekt i induksjonsspølen	Feil tilført effekt	Ingen sveising blir gjennomført. Ingen forsegling av varmerøret.	God oversikt over driftsdata for induksjonssveisingen.		Grundig forberedelse til sveisingen.	

```

clc
clear all

%Antar 900K i varmerøret
T=input('Tast inn temperaturen i varmerøret[K]');

%Konstanter fra PotassiumData, eget script med data fra Faghris Heat Pipe S&T
my=PotassiumData(T,6);
rho=PotassiumData(T,4);
Hfg=PotassiumData(T,3);
p_sat=PotassiumData(T,2);
sigma=PotassiumData(T,10);

%Andre Konstanter
K=3.14e-12;
reff=11.9e-6;
g=9.81;

% Lengder og vektorer
% hoyde=0.30;%Bredde og høyde på veken
% bredde=0.30;%Bredde og høyde på veken
% tykkelse=0.002;
makshoyde=2*sigma/reff/rho/g;
logisktest=0;
while logisktest==0
hoyde=input('Tast inn høyden på veken[m]');
if hoyde<makshoyde
    logisktest=1;
else
    disp('Denne høyden er større enn maks løftehøyde ved null strømning, tast inn en
mindre høyde')
end
end

bredde=input('Tast inn bredden på veken[m]');
tykkelse=input('Tast inn tykkelsen på veken[m]');
rho=rho*tykkelse;% korrigerer massetetthet per volum til massetetthet per areal, dybde:
2mm
beta=my/K/rho;

% N=80; %Antall celler i en
retning. Kan (og bør) endres hvis man får geometrier
N=input('Velg antall celler(under ~100)');

dx=(bredde/N); %som avviker mye
fra rektangulær form.
dy=(hoyde/N);

xv=dx/2:dx:(bredde-dx/2);
yv=dy/2:dy:(hoyde-dy/2);
%Definerer hydrostatisk trykkfelt(benytttes først når man sjekker
%resulterende trykkfelt
p_hydstat=zeros(N,N);

```

```

for i=1:N
p_hydstat(i,:)=rho/tykkelse*g*(hoyde-yv(:));
end

a=dx/dy; %Konstanter benyttet i utregningen av trykkfeltet
b=1/a; %Konstanter benyttet i utregningen av trykkfeltet

%løsningsmatriser;
p=zeros(N,N);

%Sinks and sources
q_normal=13.13; %kW/m2 %Startverdi for whileløykken og
utgangspunkt for hotspot.

hotspotvalg=input('Velg vertikal plassering av hotspot.1- oppe, 2-midten, 3-nede, alt
annet gir ingen hotspot');
hotspotvalg2=input('Velg horisontal plassering av hotspot.1- siden, 2-midten, alt annet
gir ingen hotspot');

Trykkratio=0.5;
while Trykkratio>1.0001 || Trykkratio<0.9999 %While løkke for å finne maksimal
kapasitet til veken. Denne kjører til kapasiteten er maksimal.

q_burn=300;%20*q_normal;%kW/m2
m_normal=q_normal/Hfg;%kg/sm2
m_burn=q_burn/Hfg;%kg/sm2
alpha=zeros(N,N);
alpha(1:N,1:N)=-m_normal;

if hotspotvalg==1 && hotspotvalg2==1
%Gjennombrenning oppe til venstre
alpha(floor(N/4-N/20):(floor(N/4+N/20)),(floor(3*N/4-N/20)):(floor(3*N/4+N/20)))=-
m_burn;
hotspotposisjon=1;
elseif hotspotvalg==2 && hotspotvalg2==1
% %Gjennombrenning midten til venstre
alpha(floor(N/4-N/20):(floor(N/4+N/20)),(floor(N/2-N/20)):(floor(N/2+N/20)))=-m_burn;
hotspotposisjon=3;
elseif hotspotvalg==3 && hotspotvalg2==1
%Gjennombrenning nede til venstre
alpha(floor(N/4-N/20):(floor(N/4+N/20)),(floor(N/4-N/20)):(floor(N/4+N/20)))=-m_burn;
hotspotposisjon=5;

elseif hotspotvalg==1 && hotspotvalg2==2
%Gjennombrenning oppe og midten
alpha((floor(N/2-N/20)):(floor(N/2+N/20)),(floor(3*N/4-N/20)):(floor(3*N/4+N/20)))=-
m_burn;
hotspotposisjon=2;
elseif hotspotvalg==2 && hotspotvalg2==2
%Gjennombrenning midten og midten
alpha((floor(N/2-N/20)):(floor(N/2+N/20)),(floor(N/2-N/20)):(floor(N/2+N/20)))=-m_burn;
hotspotposisjon=4;

```

```

elseif hotspotvalg==3 && hotspotvalg2==2
%Gjennombrenning nede og midten
alpha((floor(N/2-N/20):(floor(N/2+N/20)),(floor(N/4-N/20):(floor(N/4+N/20)))=-m_burn;
hotspotposisjon=6;
end

%Boundary Conditions

pBC=p_sat-(rho/tykkelse*g*hojede);           %Grensebetingelse ved nedre flate.

A=zeros(N^2);
B=zeros(N^2,1);
for I=1:N^2                                     %Oppsett av problemet. Setter opp en
pentadiagonal matrise der hver rekke i matrisa tilsvarer ligningen til en celle

        EnDtilToD=I/N;                         %Konvertering fra/til 2D koordinatsystem og 1D
koordinatsystem
        j=ceil(EnDtilToD);
        i=I-(j-1)*N;

        if i==1 && (j<N && j>1)                %W
            A(I,I)=-(2*a+b);
            A(I,I+1)=b;
            A(I,I+N)=a;
            A(I,I-N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);
        elseif i==N && (j<N && j>1)           %E
            A(I,I)=-(2*a+b);
            A(I,I-1)=b;
            A(I,I+N)=a;
            A(I,I-N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);
        elseif j==N && (i<N && i>1)           %N
            A(I,I)=-(a+2*b);
            A(I,I-1)=b;
            A(I,I+1)=b;
            A(I,I-N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);%+rho*g*dx;
        elseif j==1 && (i<N && i>1)           %S
            A(I,I)=-(3*a+2*b);
            A(I,I-1)=b;
            A(I,I+1)=b;
            A(I,I+N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j)-2*a*pBC;
        elseif i==1 && j==1                    %SW
            A(I,I)=-(3*a+b);
            A(I,I+1)=b;
            A(I,I+N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j)-2*a*pBC;
        elseif i==1 && j==N                    %NW
            A(I,I)=-(a+b);
            A(I,I+1)=b;
            A(I,I-N)=a;
            B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);%+rho*g*dx;
        elseif i==N && j==N                    %NE

```

```

        A(I,I)=-(a+b);
        A(I,I-1)=b;
        A(I,I-N)=a;
        B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);%+rho*g*dx;
elseif i==N && j==1 %SE
        A(I,I)=-(3*a+b);
        A(I,I-1)=b;
        A(I,I+N)=a;
        B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j)-2*a*pBC;
else

%Diagonal
A(I,I)=-(2*a+2*b);
%Temp til venstre
A(I,I-1)=b;
%Temp til høyre
A(I,I+1)=b;
%Temp over
A(I,I+N)=a;
%Temp under
A(I,I-N)=a;
%b vektor
B(I)=-dx*dy*beta*alpha(i,j);
end

end

A=sparse(A); %Løsning av problemet
P= A\B;

for I=1:N^2 %Konvertering fra/til 2D koordinatsystem og 1D
koordinatsystem
        EnDtilToD=I/N; %Konvertering fra/til 2D koordinatsystem og 1D
koordinatsystem
        j=ceil(EnDtilToD);
        i=I-(j-1)*N;
        p(i,j)=P(I); %omgjør løsningsvektoren til en løsningsmatrise
end

u=zeros(N-2,N-2);
v=zeros(N-2,N-2);

for i=2:N-1 %Hastighetsvektorer, Darcy
        for j=2:N-1
                u(i-1,j-1)=-K/my*((p(i+1,j)-p(i-1,j))/dx/2);
                v(i-1,j-1)=-K/my*((p(i,j+1)-p(i,j-1))/dy/2));%+rho*g);
        end
end
p=p+p_hydstat; %Legger på det hydrostatiske trykkfeltet før trykksjekken
(Trykkratio) gjøres)
p=p'; %Triksing med svarmatriser for at plottingen gir
bedre gravitasjonsvektor langs y-aksen.
alpha=alpha';
u=u';
v=v';

```



```

    q_endelig=q_normal
    pmin=p_sat-2*sigma/reff;
    Trykkratio=min(min(p))/pmin;
if Trykkratio<1
    q_normal=q_normal*0.9999;
else
    q_normal=q_normal*1.0001;
end
end

% subplot(1,3,1),
[c, h] = contour(xv,yv,p);
clabel(c, h);
ylabel('Hoydeakse[m]')
xlabel('Breddeakse[m]')
title(['Trykkfordeling[Pa] - Høyfluksposisjon ', num2str(hotspotposisjon),])
grid on
% subplot(1,3,2),
% [c, h] = contour(xv,yv,alpha);
% clabel(c, h);
% ylabel('Hoydeakse[m]')
% xlabel('Breddeakse[m]')
% title(['Posisjon av hotspot, total massesluk: ', num2str(sum(sum(alpha(:, :))
*dx*dy)), ' kg/s'])
% legend(['Gjennomsnittlig varmefluks:', num2str(Hfg/bredde/hoyde*sum(sum(alpha)
*dx*dy)), ' kW/m2'])

% subplot(1,3,3),
% quiver(u,v)
% ylabel('Breddeakse[m]')
% xlabel('Hoydeakse[m]')
% title('Hastighetsvektorer')

if p_sat > 2*sigma/reff
    pmin=p_sat-2*sigma/reff;
    Trykkratio=min(min(p))/pmin;
    text1=['Ok damptrykk, trykkratio er: ', num2str(Trykkratio), ', '];
else
    Trykkdifferanse=min(min(p));
    text1='Lavt damptrykk, ';
end

M_maks=sum(sum(abs(alpha*dx*dy)));
q_maks=M_maks*Hfg/bredde/hoyde;
text3=['Maksimal gjennomsnittlig varmefluks er: ', num2str(q_maks), 'kW/m2, '];
%Biten under gir maksimalhastigheten. Siden standard utrgning over bare
%beregner interiørceller, må dette gjøres separat.
Maksimalhastighet1=abs(q_maks*hoyde/Hfg/rho);
Maksimalhastighet2=max(max(abs(u)));
Maksimalhastighet3=max(max(abs(v)));
Maksimalhastighet=max([Maksimalhastighet1,Maksimalhastighet2,Maksimalhastighet3]);
ReK=Maksimalhastighet*K^0.5*rho/my;
if ReK<1

```

```
    text2='Innenfor Darcy domene, ';\nelse\n    text2='Utenfor Darcy domene, ';\nend\n%Sjekker overenstemmelse med kapillærgrensen.\nm_maks=2*K*rho*bredde/hoyde/my*(2*sigma/reff-rho/tykkelse*g*hoyde);\nRatio=M_maks/m_maks;\n\n%clc\ndisp([text1,text2,text3])
```

Bibliografi

- [1] *A. Faghri*: Heat Pipe Science and Technology, 1995 ISBN: 1-56032-383-3
- [2] *D.A. Reay og P.A. Kew*: Heat Pipes 5.Ed, 2006 ISBN: 978-0-7506-6754-8
- [3] *D. Stelman og J.C. Newcomb*: Filling and sealing sodium heat pipes, 1993
- [4] *F.W. Reiter*: Thermal outgassing behaviour of inconel 600 after different methods of surface preparation, Pergamon
- [5] *F. Edelstein*: Heat pipe manufacturing study, 1974, Grumm Aerospace
- [6] *L.N Rozanov*: Vacuum technique, 2002, ISBN: 0-415-27351-x, ib.
- [7] Daemar Inc, produsent av o-ringer og pakninger,

http://www.daemar.com/kalrez-chemical-resistance_128.htm

Hentet den 23.11.2010
- [8] *K. Jousten*: Handbook of vacuum technology, 2008, ISBN: 978-3-527-40723-1, ib.
- [9] *X.Y Huang og C.Y Liu*:The pressure and velocity fields in the wick structure of a localized heated flat plate heat pipe, 1995, Pergamon
- [10] *D.A. Nield og A. Bejan*: Convection in Porous Media, 2006, ISBN: 9780387334318
- [11] Caburn MDC Europe, produsent av høyvakuumkanponenter

<http://www.caburn.com/>
- [12] Präzisions Glas & Optik, Produsent av Pyrex

http://www.pgo-online.com/intl/katalog/curves/pyrex_kurve.html

Hentet den 23.11.2010

- [13] *R. Siegel og J. Howell*: Thermal Radiation Heat Transfer, 4.Ed, 2002, ISBN: 1-56032-839-8
- [14] *Y.A. Çengel*: Heat and Mass Transfer: A practical approach, 3.Ed, 2007, ISBN: 007-125739-X
- [15] *Einar Halmøy*: Sveiseteknik, kompendium, 2007, Institutt for produktutvikling og materialer
- [16] *H.K Versteeg og W. Malalasekera*: An introduction to computational fluid dynamics: the final volume method, 2.Ed, 2007, ISBN:978-0-13-127498-3
- [17] *Kolbeinn Kristjansson*: Prosjektoppgave: Energigjenvinning fra aluminiumsindustrien; Kjøling av sideforinger, Institutt for energi og prosessteknikk 2009.
- [18] *P.I Bystrov, D.N Kagan, G.A Kretchetova og E.E Shpilrain*: Liquid-metal coolants for heat pipes and power plants, 1988, Hemisphere Publishing
- [19] *Geir Hansen* Stipendiat ved Institutt for energi og prosessteknikk -Muntlig informasjon 2010
- [20] *Rolf Dahl* Vakuumpkonsulent - Muntlig informasjon 2010
- [21] *Erling Næss* Professor ved institutt for Energi og Prosessteknikk - Muntlig informasjon 2010
- [22] *Reidar Tellebon* Avdelingsingeniør ved institutt for Energi og Prosessteknikk - Muntlig informasjon 2010
- [23] *Hilde Løken Larsen* Gruppeleder for forskning, Elkem AS - E-mail sendt den 18.01.2010
- [24] *J.A. Tagle og A. Psospieszczyk*: Measurement of desorption energies of H_2 and CO from ss-304ln and inconel 625 surfaces by laser induced thermal desorption, 1983, Elsevier
- [25] *Y. Hirohata, K. Suzuki og T. Hino*: Gas desorption properties of low-activation ferritic steel as a blanket or a vacuum vessel material, 1998, Fusion Engineering and design
- [26] *A. Faghri og B. Holley*: Permeability and effective pore radius measurements for heat pipe and fuel cell applications, 2006, Applied Thermal Engineering
- [27] *Pradyot Patnaik*: A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances, 2007, Wiley ISBN-13:978-0-471-71458-3
- [28] Aerlikon Leybold Vacuum, Produsent av vakuumpkomponenter

http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/products/produktkatalog_03.aspx?l=1&cid=50_40_0

Hentet den 19.01.2010

- [29] *D.A King*: Nitrogen adsorption on nikkel and palladium films, 1967, Journal of Surface Science
- [30] *Sears, Zemansky og Young*: University Physics 7.Ed, 1986, ISBN: 0-201-06694-7