

Spillvarmeutnyttelse ved Aluminiumsverk

Jon Petter Grandal

Master i produktutvikling og produksjon
Oppgaven levert: Juli 2008
Hovedveileder: Erling Næss, EPT
Biveileder(e): Håkon Skistad, SefAS

Oppgavetekst

Bakgrunn

Store mengder energi, i all hovedsak elektrisk energi går med til produksjon av aluminium. Store deler av denne energien går tapt som varme som ventileres til atmosfæren. Størsteparten av denne energien er i form av lavtemperatur varme, som har begrenset anvendelsespotensial.

Mål

Oppgavens målsetting er å identifisere og kvantifisere spillvarmekilder i aluminiumsverk samt deres utnyttelsespotensialer.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Med utgangspunkt i ett eller flere valgte aluminiumsverk skal spillvarmestrømmene kvantifiseres med hensyn på tilgjengelighet, mengde og temperaturnivå. Valg av aluminiumsverk gjøres i samarbeid med Instituttet. Informasjonen skal systematiseres og presenteres. I den grad det er mulig skal data sammenliknes med tilgjengelig informasjon fra andre aluminiumsverk, og eventuelle forskjeller skal diskuteres.
2. Et måleprogram for kartlegging av energistrømmene i et utvalgt prosessavsnitt skal gjennomføres, og resultatene skal presenteres og diskuteres.
3. Anvendelsespotensialer for de ulike spillvarmestrømmene skal vurderes, inklusive intern utnyttelse av varmen, ekstern utnyttelse til omkringliggende infrastruktur, samt kraftproduksjon.
4. Det skal utarbeides forslag til videre arbeid.

Oppgaven gitt: 21. januar 2008

Hovedveileder: Erling Næss, EPT

EPT-M-2008-67



MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Jon Petter Grandal

Våren 2008

Spillvarmeutnyttelse ved Aluminiumsverk

Waste Heat Utilization from Aluminum Production Plants

Bakgrunn

Store mengder energi, i all hovedsak elektrisk energi går med til produksjon av aluminium. Store deler av denne energien går tapt som varme som ventileres til atmosfæren. Størsteparten av denne energien er i form av lavtemperatur varme, som har begrenset anvendelsespotensial. (osv)

Mål

Oppgavens målsetting er å identifisere og kvantifisere spillvarmekilder i aluminiumsverk samt deres utnyttelsespotensialer.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Med utgangspunkt i ett eller flere valgte aluminiumsverk skal spillvarmestrømmene kvantifiseres med hensyn på tilgjengelighet, mengde og temperaturnivå. Valg av aluminiumsverk gjøres i samarbeid med Instituttet. Informasjonen skal systematiseres og presenteres. I den grad det er mulig skal data sammenliknes med tilgjengelig informasjon fra andre aluminiumsverk, og eventuelle forskjeller skal diskuteres.
2. Et måleprogram for kartlegging av energistrømmene i et utvalgt prosessavsnitt skal gjennomføres, og resultatene skal presenteres og diskuteres.
3. Anvendelsespotensialer for de ulike spillvarmestrømmene skal vurderes, inklusive intern utnyttelse av varmen, eksternt utnyttelse til omkringliggende infrastruktur, samt kraftproduksjon.
4. Det skal utarbeides forslag til videre arbeid.

- ” -

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og evt. forsøksplan for oppgaven til evaluering og evt. diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved evt. 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.

resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

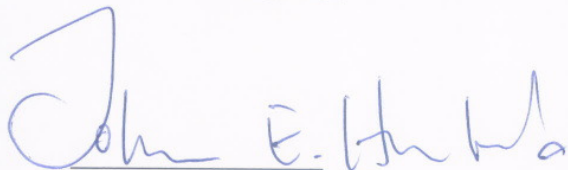
Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. (For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og evt. figurnummer.)

Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved Alstom og alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

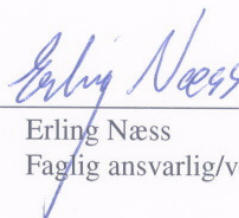
I henhold til Reglement for sivilarkitekt- og sivilingeniøreksamen ved NTNU § 8, forbeholder Instituttet seg retten til å benytte alle resultater i undervisnings- og forskningsformål, samt til publikasjoner.

Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert. (Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maks. en 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 evt. medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og evt. leveres direkte til, de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

Institutt for energi- og prosesssteknikk, 07.01.2008



Johan E. Hustad
Instituttleder



Erling Næss
Faglig ansvarlig/veileder

Kontaktperson(er)/medveileder(e):
Håkon Skistad, Sefas

Forord

Hensikten med denne rapporten er å gi en overblikk over spillvarmestrømmene ved Hydro Aluminium Sunndal og muligheten for å utnytte denne energien, samt kartlegge partikkelkonsentrasjon og partikkelstørrelsesfordeling i rågassen fra elektrolyseprosessene ved Hydro Sunndal, til bruk i forbindelse med et NTNU-Hydro-samarbeid om å utvikle en rågassvarmeveksler.

Studenten har bakgrunn i PuP - Industriell mekanikk med teoretisk bakgrunn innen faststoff- og strømningsmekanikk. I de senere år har studenten fått større og større interesse for energi og miljø, og tok initiativ til denne oppgaven. Detaljene rundt oppgaven er imidlertid satt ved institutt for Energi, Prosess- og strømningsmekanikk ved NTNU, i tillegg til at deler av oppgaven har utviklet seg underveis.

Studenten har imidlertid liten eller ingen erfaring med feltmålinger og varmetransport, så lærerkurven har vært bratt og timene på kontoret vært mange.

Jeg vil med dette takke Erling Næss og Håkon Skistad for god veiledning, tett oppfølging og oppmuntring underveis i arbeidet. Ved Hydro Aluminium Sunndal vil jeg takke Bjørn Petter Moxnes for å gi grønt lys for samarbeid med Hydro, Øyvind Oliver Johansen for all informasjon om verket, Jan Olav Polden for lån av laboratoriet og måleresultater, Steinar Kjørnes for god oppfølging de gangene jeg har besøkt verket og alle andre som har hjulpet meg med gjennomføringen av denne oppgaven.

I tillegg vil jeg takke Geir Hansen og Mitchell Pearson for meget god assistanse under måleprogrammene som ble utført ved Hydro Sunndal, Simon S. Simonsen for godt selskap på leseplassen, samt mamma og pappa for oppbacking hjemmefra.

San Francisco, California 16. juni 2008



Jon Petter Grandal

Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven var å kartlegge spillvarmestrømmene på et aluminiumsverk, samt diskutere deres utnyttelsespotensialer. Det ble ansett som mest hensiktsmessig å ta utgangspunkt i Hydro Aluminium Sunndal. Hydro var villige til å samarbeide om dette med kriterie om at oppgaven må kunne være matnyttig for et NTNU-Hydro-prosjekt som omhandler utvikling av en rågassvarmeveksler. Å undersøke partikkelkonsentrasjon og partikkelstørrelsesfordeling i rågassen fra elektrolysen på Hydro Sunndal ble dermed en viktig del av oppgaven.

Spillvarmestrømmene på Hydro Sunndal ble kvantifisert til 3,4 TWh per år. Av denne energien forsvinner 304 GWh/år med rågassen fra SU3 ved en gasstemperatur på omtrent 90°C, og 673 GWh/år med rågassen fra SU4 ved en gasstemperatur på omtrent 110°C. 977 GWh/år med spillvarme har derfor et middels stort utnyttelsespotensial. Energien er meget godt egnet for distribusjon med fjernvarme, men markedet for dette i nærliggende områder er meget lite. Elektrisitetsproduksjon kan bli aktuelt i fremtiden.

Spillvarmestrømmene er hovedsakelig kartlagt med dataer fra ulike kilder på Hydro Sunndal, blant annet fra HERE-databasen og målinger gjort av laboratorieteamet på verket, samt et måleprogram for varmetapet gjennom en elektrolysecelles overflater, utført fra 28. til 30. april 2008 på Hydro Sunndal, med tilhørende beregningsmodell.

Et måleprogram for rågassen fra elektrolyseceller ble utført på Hydro Sunndal i perioden 10. - 14. mars 2008. Støvkonsentrasjonen i rågassen fra 56 elektrolyseceller i SU3 ble målt til å være 363 mg/Nm³ med et standardavvik på 12 %. Dette avviker sterkt fra resultater fra målinger gjort av Hydro Sunndals laboratorieteam i perioden februar 2007 til januar 2008, hvor støvkonsentrasjonen er målt til 848 mg/Nm³ med et standardavvik på 15 %. Avviket antas i hovedsak å skyldes naturlige variasjoner i støvkonsentrasjonen i rågassen.

Resultatene for partikkelstørrelsesfordelingen forelå ikke da oppgaven gikk i trykken.

Anbefalt videre arbeid er analyse av partikkelstørrelsesfordeling i rågassen så snart de nødvendige data foreligger, et omfattende måleprogram for å kartlegge energibalansen til en elektrolysecelle, samt et måleprogram for å kartlegge partikkelkonsentrasjon og -størrelsesfordeling for rågassen fra Hydro SU4.

Abstract

The purpose of this thesis was to find and discuss the potential of utilizing the waste heat flows through an aluminum plant. Hydro Aluminium Sunndal was found to be an appropriate plant for this case. Hydro agreed to participate with one criteria; that this paper should be useful also for an NTNU-Hydro project concerning the development of a heat exchanger to be used in a flue gas environment. Thus, investigating the particle concentration and particle size distribution in the flue gas from aluminium production at Hydro Sunndal became an important part of this thesis.

The waste heat flows at Hydro Sunndal were quantified to 3,4 TWh per year. 304 GWh/year of this energy ventilates out the surroundings with the flue gas from SU3 with an temperature of approximately 90°C, while 673 GWh/year goes with the flue gas from SU4 at a gas temperatur of approximately 110°C. Therefore, 977 GWh/year of waste heat flows has a fairly good potential of utilization. This energy is very well suited for district heating. However, the size of this market in the area is very limited. Production of electricity may become feasible in the future.

The waste heat flows quantifications are mainly based on data from sources at Hydro Sunndal: the HERE database and measurements done by the laboratory team at the plant among others, in addition to measurements of the heat flow through the surfaces of an electrolytic cell done by the student at Hydro Sunndal from April 28th through April 30th 2008.

A measuring program concerning the flue gas from electrolytic cells was carried out at Hydro Sunndal between the 10th and 14th of March 2008. The particle concentration in the flue gas from 56 electrolytic cells in SU3 was found to be 363 mg/Nm³ with a standard deviation of 12 %. This result deviates considerably from the results found from measurements done by the laboratory team at Hydro Sunndal from February 2007 through January 2008, where the particle concentration was found to be 848 mg/Nm³ with a standard deviation of 15 %. The disagreement is assumed to be caused mainly by natural variations in the particle concentration of the flue gas.

The results from the particle size distribution measurements was not available at the date of deadline of this paper.

Future work concerns analyzing the particle size distribution in the flue gas when necessary data are accessible, a measuring program for quantifying the energy balance of a eletrolytic cell, as well as a measuring program for finding the concentration and size distribution of the particles in the flue gas from SU4.

Innhold

1. Innledning	1
1.1. Oppgavens bakgrunn, formål og to aspekter	1
1.1.1. Identifisering og kvantifisering av spillvarmekilder i aluminiumsverk	1
1.1.2. Kartlegging av partikkelkonsentrasjon og -størrelsesfordeling i rågass	2
1.1.2.1. NTNU-Hydros rågassvarmeveksler-prosjekt	2
1.2. Hall-Héroutl-prosessen	3
1.3. Kort presentasjon av Hydro Sunndal verk	3
1.3.1. Produksjon av anoder	3
1.3.2. Støperier	3
1.3.3. Renseanlegg	4
1.3.4. Ytterligere hjelpesystemer	4
1.4. Oppgavens struktur	4
2. Energibalanser	5
2.1. Energibalanser på 3 nivåer	5
2.2. Grunnlag for beregninger	5
2.3. Hydro Sunndal verk	6
2.4. Energibalanse SU3 og SU4	6
3. Varmetap elektrolyseceller	9
3.1. Innledning	9
3.2. Utstyr og framgangsmåte	9
3.3. Geometri	9
3.4. Fysisk modell	10
3.5. Matematisk modell	10
3.5.1. Stråling	10
3.5.2. Frikonveksjon	11
3.6. Feilkilder	12
3.6.1. Kommentar til databehandling av termobilder	12
3.7. Resultater og diskusjoner	13
3.7.1. Varmetapsfordeling over celleoverflate	13
4. Måleprogram støvmålinger	16
4.1. Valg av målested	16
4.1.1. Innløpslengde	16
4.2. Gjennomføring av måleprogram	16
4.2.1. Oppsett av støvmåleutstyr	16

4.2.1.1.	Isokinetisk av sug	17
4.2.2.	Behandling av filtre	18
4.2.3.	Hastighets- og temperaturmålinger	18
4.2.4.	Valg av målepunkter	18
4.2.4.1.	Kommentar til målestussene	19
4.3.	Resultater og diskusjon	19
4.3.1.	Hastighets- og temperaturprofil	19
4.3.2.	Støvkonsentrasjon og partikkelstørrelsesfordeling	20
4.3.3.	Partikkelstørrelsesfordeling	23
5.	Gjenvinningspotensial	25
5.1.	Generelle betraktninger om eksergi	25
5.2.	Gradering av utnyttelsespotensialer	25
5.3.	Anvendelse av spillvarmestrømmene	26
5.3.1.	Rågass	27
5.3.2.	Ventilasjonsluft	27
5.3.3.	Kjølevann fra støperiene	27
5.3.4.	Fjernvarme Sunndalsøra	27
6.	Konklusjoner og forslag til videre arbeid	29
6.1.	Konklusjoner	29
6.1.1.	Partikkelkonsentrasjon i røykgassen	29
6.1.2.	Utnyttelse av spillvarmestrømmer	29
6.2.	Forslag til videre arbeid	30
6.2.1.	Gassmålinger	30
6.2.2.	Varmetap fra elektrolyseceller	30
	Bibliografi	31
A.	Beregninger	33
A.1.	Middelhastighet og hastighetsprofil	33
A.2.	Elektrolysecellens geometri, fysisk og matematisk modell	34
A.2.1.	Elektrolysekjeller	34
A.2.1.1.	Hjørner	34
A.2.1.2.	Kortside	34
A.2.1.3.	Langside	36
A.2.1.4.	Bunn	37
A.2.2.	Elektrolysecellens toppdel	38
A.2.2.1.	Langsider	38
A.2.2.2.	Kortsider	39
A.2.2.3.	Celletopp	39
B.	Regneark, kildekode og innsamlede data	44

Figurer

2.1. Energiflyt Hydro Sunndal [GWh/år]	7
2.2. Energiflyt Hydro SU3 [GWh/år]	8
2.3. Energiflyt Hydro SU4 [GWh/år]	8
3.1. Fargespekter versus temperaturspekter	13
3.2. Sankeydiagram for celle A004 i SU4	14
3.3. Sammenligning av energitapsfordeling elektrolysecelle	14
3.4. Fordeling av energitapet fra elektrolysecelle	15
4.1. SINTEF Støvmåleutstyr	17
4.2. Ubalansert partikkelmåling	18
4.3. Turbulent hastighetsprofil - teoretisk og målt med maks/min-verdier	20
4.4. Temperaturprofil med maks/min-verdier	21
4.5. Støvkonsentrasjon - egne målinger	22
4.6. Støvkonsentrasjon - Hydros egne målinger	24
5.1. Utnyttelsespotensial spillvarmestruer	26
5.2. Fjernvarmeanlegg Sunndalsøra	28
A.1. Målepunkter for hastighets- og temperaturmålinger	33
A.2. Elektrolyscellens hjørne - kjeller [mm]	35
A.3. Elektrolysecellens kortside - kjeller [mm]	36
A.4. Elektrolysens langsider - kjeller [mm]	37
A.5. Elektrolysecellens bunn [mm]	38
A.6. Elektrolysecellens langside - toppdel [mm]	39
A.7. Termobilde av celleluker og toppside	41
A.8. Elektrolysecellens overdel - kortside [mm]	42
A.9. Kortside - termobilde med bakgrunn	43

Tabeller

4.1. Støvkonsentrasjoner over rørtverrsnitt	23
5.1. Utnyttelsespotensial spillvarmestrømmer	26

1. Innledning

Etter energikrisen på 1970-tallet ble det satt stort fokus på ENØK, både på samfunnsmessig og industrielt plan. Den energikrevende aluminiumsindustrien var intet unntak. Siden den gang har fokuset på miljøet, og dermed energisparing og -økonomi, hele tiden vært økende. Men etter at FNs klimapanel (IPCC) i februar 2007 offentliggjorde sin urovekkende rapport om vår klodes tilstand har miljø- og energiforvaltning for alvor kommet på alles lepper. Man snakker nå om en klimakrise snarere enn en energikrise.

I tillegg til det miljømessige aspektet rundt reduksjon av energiforbruk, kommer også rent økonomiske aspekter inn. Folkerike land som Kina og India industrialiseres i stort tempo med mål om å øke levestandarden opp på vestlig nivå. Dette krever selvsagt enorme mengder energi, og presser energiprisene i været. Relativt små innsparinger i energiforbruk eller bedret energi-utnyttelse, som for eksempel utgangspunktet for denne masteroppgaven: spillvarmeutnyttelse ved aluminiumsverk, kan dermed gi betydelige økonomiske gevinster. Den norske aluminiumsindustrien har imidlertid lenge vært vel-signet med kontrakter om lave strømpriser, men mange av disse er i ferd med løpe ut på dato. En del av Hydros kraftkontrakter er kortsiktige, og i forbindelse med avviklingen av Söderberg-linjene på Årdal, Høyanger og Karmøy vil ikke disse fornyes [6].

1.1. Oppgavens bakgrunn, formål og to aspekter

1.1.1. Identifisering og kvantifisering av spillvarmekilder i aluminiumsverk

Aluminiumsproduksjon er Norges mest energikrevende industri og stod i 2005 for over 17% [4, 1] av Norges totale elektrisitetsforbruk. Store deler av denne energien går tapt som varme som ventileres til atmosfæren, blant annet med røykgassen ut fra elektrolysecellene, stråling og konveksjon fra elektrolysecellene til ventilasjonsluften i elektrolysehallen og som termisk energi i aluminiumen som suges ut av elektrolysecellene. Fra Hydro Sunndal alene er det energimengder i størrelsesorden 3 TWh som går tapt som varme per år. Dette tilsvarer omtrent det årlige elektrisitetsforbruket til Oslo kommunes private husholdninger. 1% av denne energimengden gjenvunnet som strøm tilsvarer en ekstraintekt i størrelsesorden 15-20 millioner NOK hvis solgt på det frie strømmarkedet.

Den industrielle metoden for fremstilling av aluminium har vært den samme siden 1886 da Paul Héroult og Charles Hall uavhengig av hverandre utviklet Hall-Héroult-prosessen (se avsnitt 1.2). Gjennom drøye 120 år har denne prosessen selvsagt blitt utviklet, raffinert og forbedret, men grunnprinsippene som ligger til grunn er de samme som i 1886. Så før ny og revolusjonerende teknologi innen aluminiumsproduksjon kommer på banen, er det den energikrevende Hall-Héroult-prosessen aluminiumsindustrien må forholde seg til, og utnyttelse av spillvarme forblir et viktig tema. Kartlegging av spillvarmekilder og

deres utnyttelsespotensiale ved aluminiumsverk er derfor av stor interesse, og er et av to hovedmål med denne oppgaven.

1.1.2. Kartlegging av partikkelkonsentrasjon og -størrelsesfordeling i rågass

Som utgangspunkt for å kvantifisere spillvarmestrømmer på et aluminiumsverk ble Hydro aluminiumsverk på Sunndalsøra utpekt som det mest interessante alternativet, både fordi det er et av verdens mest moderne aluminiumsverk og fordi det ikke ligger i avskrekkende avstand fra Trondheim og NTNU. Hydro stilte imidlertid som et kriterie for å bruke Hydro Sunndal som case at denne oppgaven skal kunne inngå i NTNU-Hydro-prosjektet beskrevet under.

1.1.2.1. NTNU-Hydros rågassvarmeveksler-prosjekt

Hydro Aluminium og NTNU ved Erling Næss jobber med et prosjekt som går ut på å bygge en varmeveksler som kan plasseres i rågassen fra elektrolyseceller. Utnyttelse av av spillvarme fra røykgassen fra aluminiumsproduksjon gjøres i dag ved at en varmeveksler monteres etter gassreanleggets posefiltersystem, uformelt omtalt som tørrfilteret. Tørrfilteret filtrer bort mesteparten av den relativt store mengden støv og partikler som finnes i røykgassen, og som ellers ville tettet igjen varmeveksleren. Det ville imidlertid være meget gunstig å plassere varmeveksleren før tørrfilteret, av flere grunner:

- Standard posefiltere tåler maksimalt en temperatur på omkring 140 °C. Det suges derfor med overlegg store mengder kaldluft inn i elektrolysecellene for å senke temperaturen på rågassen. Ved å plassere varmeveksleren før tørrfilteret vil man ved å tette elektrolysecellene bedre og isolere rågassrørene kunne øke rågassstemperaturen, ultimatt sett høyt nok til å muliggjøre strømproduksjon, samtidig som posefiltrene bevarer.
- Ved å redusere mengden kaldluft som suges inn i elektrolysecellene, reduserer man også rågassens volumstrøm slik at avsugsviftene kan neddimensjoneres med tanke på effekt.
- Rågassens volumstrøm, som også er en dimensjonerende faktor for posefilterne, er sterkt avhengig av temperatur (jamfør den idelle gasslov). Nedstrøms rågassvarmeveksleren reduseres gasstemperaturen, og følgelig volumstrømmen, slik at også tørrfilteret kan dimensjoneres ned.

En fungerende rågassvarmeveksler vil dermed kunne føre til økt utnyttelse av spillvarme, samtidig som at reanleggets kapasitet kan neddimensjoneres.

To viktige designparametre for en rågassvarmeveksler er partikkelkonsentrasjon og -størrelsesfordeling. Disse parametrene varierer fra aluminiumsverk til aluminiumsverk. Det er derfor av interesse for det omtalte NTNU-Hydro-prosjektet å kartlegge disse også på Hydro Sunndal. For å oppfylle kriteriet fra Hydro Aluminium, ble en viktig del av denne avhandlingen derfor å gjennomføre et måleprogram for partikkelkonsentrasjon og -størrelsesfordeling i rågassen fra et avsnitt på Hydro Sunndal Verk.

Masteroppgavens tidsrammer er imidlertid svært rigide, og et kompromiss mellom omfangene av oppgavens to aspekter var derfor uunngåelig.

1.2. Hall-Héroutt-prosessen

Uavhengig av hverandre, og på hver sin side av atlanterhavet, oppdaget og patenterte Paul Héroult fra Frankrike og Charles Hall fra USA i 1886 prosessen hvor aluminiumsoksid (Al_2O_3) løst i smeltet kryolitt (Na_3AlF_6) og elektrolytisk dekomponert, produserer flytende aluminium [8]. Det finnes to grunnleggende anode-design på en Hall-Héroult elektrolysecelle, forbakte og Söderberg-anoder. Söderberg-celler er mindre effektive enn celler med forbakte anoder, og flere og flere aktører innen aluminiumsproduksjon sverger kun til sistnevnte design. Dette er også situasjonen på Hydro Sunndal, så Söderberg-designet vil ikke bli nærmere diskutert her. Figur XX viser en celle med forbakte anoder.

1.3. Kort presentasjon av Hydro Sunndal verk

Hydro Sunndal er lokalisert på Sunndalsøra i Møre og Romsdal, og har produsert aluminium siden 1954. Fra 2002 - 2004 ble det gjort en større utbygging av verket. De gamle elektrolysehallene med Söderberg-teknologi ble revet til fordel for en ny elektrolysehall med nye moderne elektrolyseceller med forbakte anoder. Hydro Sunndal består i dag av to elektrolysehall, SU3 og SU4. SU3 stod ferdig i 1969 og produserer i dag med sine 184 elektrolyseceller omtrent 97 000 tonn aluminium per år. Med ferdigstillingen av SU4 i 2004 plasserte Hydro Sunndal seg som Europas største produsent av primæraluminium. SU4 produserer i dag omtrent 270 000 tonn aluminium per år fordelt på 340 elektrolyseceller med en strømstyrke på 300 000 ampere. Hydro Sunndal verk stod i 2007 alene for nesten 4% av Norges totale elektrisitetsforbruk [1]. Når i underkant av 2/3 av denne energien går tapt som spillvarme til atmosfæren er det naturlig å spørre seg hva som kan gjøres for å redusere dette tapet, og hvordan.

I tillegg til produksjon av primæraluminium finnes det flere bi-aktiviteter på Hydro Sunndal.

1.3.1. Produksjon av anoder

Verket produserer selv omtrent 40 prosent av karbonanodene som blir brukt i elektrolyseprosessen. Tre fabrikker på verket tar for seg henholdsvis produksjon av anodemasse, baking av anodemassen til anodekull og montering av anodepinner på anodene.

1.3.2. Støperier

Primæraluminiumen fra elektrolysehallene blir sendt til to støperier på verket, EIBU og FABU. EIBU støper ekstrusjonsemner (Extrusion Ingots) og hadde en produksjon på 357 000 tonn i 2007. FABU produserer støpelegeringer (Foundry Alloys) og hadde en produksjon på 98 000 tonn i 2007.

1.3.3. Renseanlegg

Det finnes fire renseanlegg på Hydro Sunndal, FTP1-4. Hvert anlegg har to hovedtrinn: tørrfiltre som filtrerer bort mesteparten av støvet og partiklene i rågassen, og våtvaskere som tar hånd om SO₂-rensing ved å bruke sjøvann som absorpsjonsvæske. Elektrolysehall SU4 er delt inn i tre seksjoner som er koblet til hvert sitt renseanlegg, henholdsvis FTP1-3. Renseanlegg FTP4 tar om hånd om avgassene fra SU3.

1.3.4. Ytterligere hjelpesystemer

I tillegg kommer hjelpesystemer som likerettere, kompressorstasjoner og fellestjenester (administrasjon og lignende). Drivende kraft for elektrolyse av aluminium er likestrøm. SU3 og SU4 har hver sin likeretterstasjon som gjør om vekselstrøm til likestrøm. Store deler av renseanleggene drives med hjelp fra trykkluft som sørges for av store kompressorstasjoner rundt på verket.

1.4. Oppgavens struktur

I det følgende er overordnede energibalanser, energibalanse for elektrolysecelle og rågassmålinger behandlet for seg i 3 kapitler, med oppsett av utstyr, gjennomføring, framstilling av resultater, samt diskusjon av disse. Overordnede diskusjoner, samt konklusjoner, er plassert deretter.

2. Energibalanser

Termodynamikkens første hovedsetning statuerer at energi verken kan oppstå eller tilintetgjøres, men kan kun endre form. I et system er derfor forandringen av den indre energien i systemet lik summen av arbeidet som blir utført på systemet og varmen som blir tilført systemet.

$$dU = W + Q \quad (2.1)$$

Et systems energibalanse omfatter i teorien et komplett balanseregnskap for energien inn og ut av systemet; hvor og i hvilken tilstand energien kommer inn, hvilket forløp den har gjennom systemet og hvor og i hvilken tilstand energien forlater systemet. For et så stort system som et aluminiumsverk er det i praksis umulig å kartlegge en komplett energibalanse; det vil alltid gjenstå en post med en viss mengde energi man ikke har data nok for å forklare opphavet til. Denne posten forsøkes imidlertid å minimeres, og bør i en god energibalanse være under 5 % av total energi inn. Energibalanser er visualiseres godt med Sankey-diagrammer, som gir en grafisk fremstilling av balansen ved hjelp piler hvor tykkelsen på disse gjenspeiler størrelsen på energistrømmen som vises.

2.1. Energibalanser på 3 nivåer

Det ble satt opp 4 energibalanser for Hydro Sunndal med 3 forskjellige perspektiver:

- Overordnet energibalanse for hele aluminiumsverket, som inkluderer anodemassefabrikken, anodefabrikken, anode roddingfabrikken, elektrolysehallene SU3 og SU4, likeretter-service for SU3 og SU4, de to støperiene, samt hjelpesystemer og fellestjenester.
- Én energibalanse for SU3 og én for SU4 med elektrolysehallene systemgrenser.
- Energibalanse for en enkelt elektrolysecelle

2.2. Grunnlag for beregninger

Energibalanser for hele Hydro Sunndal verk, SU3, SU4 og en enkelt elektrolysecelle ble beregnet med grunnlag i data fra Hydros HERE-database, målinger gjort av laboratoriet på Hydro Sunndal, hallgassmålinger gjort av SINTEF [10], samt målinger gjort i forbindelse med denne oppgaven. Alle anvendte data er fra 2007 med unntak av data for hallgassen i SU4 og cellegassen i SU3, som henholdsvis er fra 2006 og 2004, samt målinger tatt i forbindelse med denne oppgaven våren 2008.

Gjennomsnittlig temperatur på Sunndalsøra de siste 10 årene [2], $7,7^{\circ}\text{C}$, ble satt til referansetemperatur for energibalansene for SU3, SU4 og hele Hydro Sunndal verk. Energibalansen for elektrolysecelle A004 ble beregnet ut fra en omgivelsestemperatur på 30°C inne i SU4.

2.3. Hydro Sunndal verk

Sankey-diagrammet i figur 2.1 viser den overordnede energiflyten for hele Hydro Sunndal.

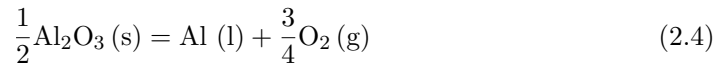
Foruten elektrisitet kan energien deles inn to kategorier: termisk energi og kjemisk energi. Termisk energi er regnet ut basert på temperaturredifferanser, mens kjemisk energi avhenger av de kjemiske substansene involvert i en kjemisk prosess.

Energistrømmene i figurene 2.1 til 2.3 er termiske og kjemiske energistrømmer beregnet basert på henholdsvis formel 2.3 og 2.2 [11]. ΔT er temperaturendring mellom to tilstander, C_p spesifikk varmekapasitet, \dot{m} massestrøm per år og X årlig operasjonstid i antall timer. *LHV* (Lower Heat Value) betegner nedre brennverdi, som er mengden energi som frigjøres ved forbrenning av en kjemisk substans. For energien som lagres i aluminiumet er "brennverdi" et misvisende begrep. Potensiell kjemisk energi er mer passende, og regnes ut fra entalpibalansen, $\Delta H_{\text{tot}}^{\circ}$, for en teoretisk reduksjonsprosess hvor alumina reduseres til aluminium, som gitt i formel 2.4.

Den kjemiske energien som lagres i aluminiumen, nesten 40 % av total energi inn på verket, forblir uendret gjennom hele aluminiumens levetid, og vil ikke granskes videre i denne oppgaven.

$$E_{kj} = LHV \cdot \dot{m} \cdot X \quad (2.2)$$

$$E_{th} = \Delta T \cdot C_p \cdot \dot{m} \cdot X \quad (2.3)$$

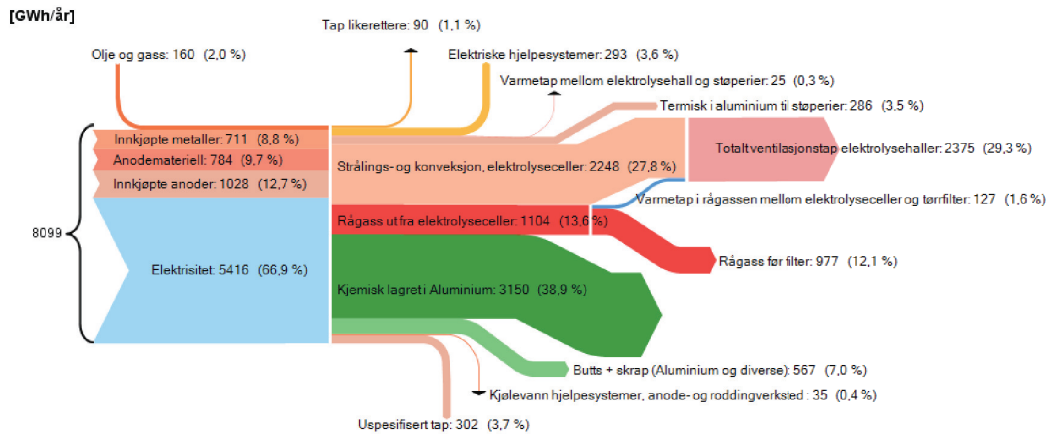


Omtrent 45 % av all energien som forbrukes på Hydro Sunndal verk går tapt som spillvarme. De største spillvarmepostene er relatert til prosessene i elektrolysehallene. Drøye 29 % av totalenergien på verket går med til å varme opp ventilasjonsluften i SU3 og SU4, mens omtrent 12 % av energien finnes igjen som varme i rågassen i det denne går inn på tørrfiltrene i renseanleggene.

2.4. Energibalanse SU3 og SU4

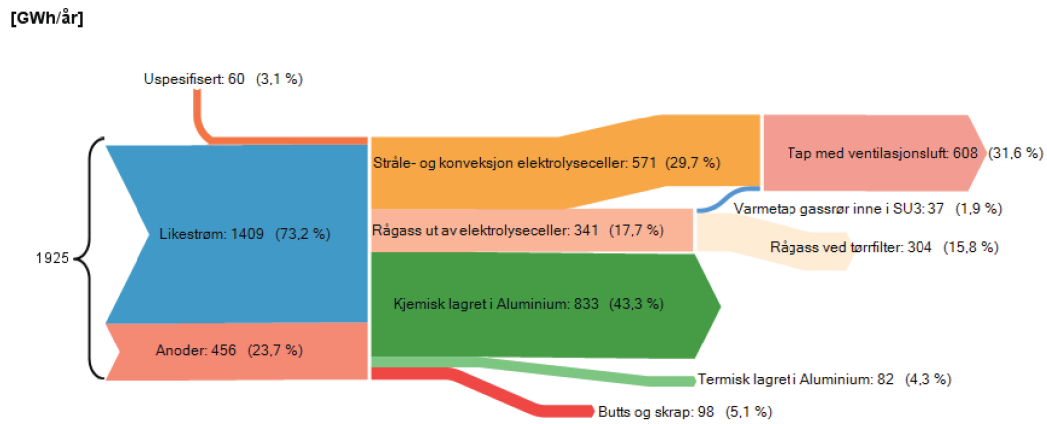
Figurene 2.2 og 2.3 illustrerer energiregnskapene for kjerneprosessene på Hydro Sunndal, elektrolyse av aluminium, henholdsvis i SU3 og SU4. Energifordelingene ligner den for hele Sunndal verk, hvor de største spillvarmepostene er varmetap med ventilasjon av elektrolysehallene og varmetap med rågassen. Disse to postene utgjør henholdsvis 32 og 16 prosent av energien inn på SU3 og 34 og 13 prosent av energien inn på SU4.

Den uspesifiserte posten på energibalansen for SU3 er på 3,1 % og innenfor forventede feilmarginer. Elektrisitet og kjemisk energi inn på SU3 og SU4 er godt dokumentert

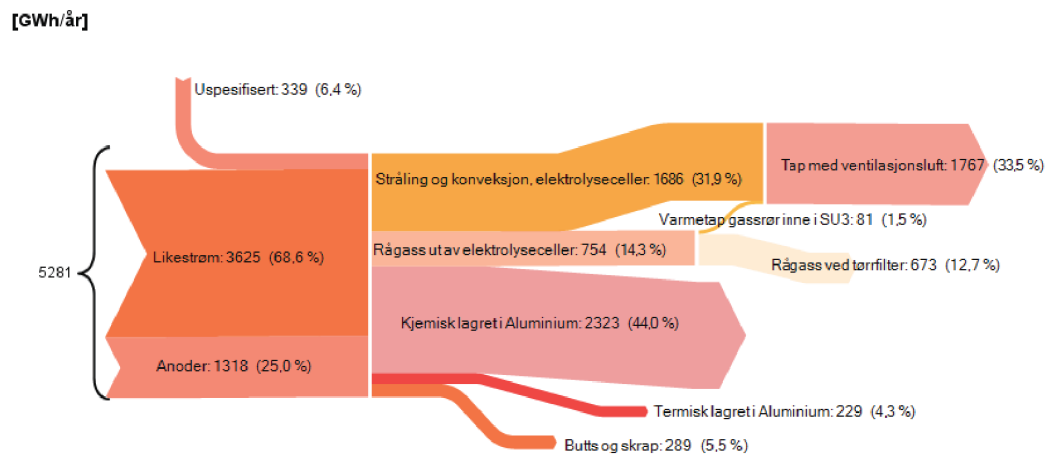


Figur 2.1.: Energifyt Hydro Sunndal [GWh/år]

og de uspesifiserte postene antas å høre tilhøre energi ut fra elektrolysehallene. Den uspesifiserte posten på energibalansen for SU4 er på 6,4 % og på grensen av hva man kan forvente av feilmargin for en god energibalanse, likevel er likevel akseptabel.



Figur 2.2.: Energifyt Hydro SU3 [GWh/år]



Figur 2.3.: Energifyt Hydro SU4 [GWh/år]

3. Varmetap elektrolyseceller

3.1. Innledning

Overordnede energibalanser, så som for hele Sunndal verk, gir en god pekepinn på hvor og hvor mye energi som går til spille og kan utnyttes. For å forbedre verkets energiforbruk er det viktig å se nærmere på alle detaljer. Varmetap som følge av ventilasjon i elektrolysehallene har blitt målt tidligere. Det var derfor ønskelig å finne ut hvor stor del av denne varmeenergien som tapes gjennom overflatene på elektrolysecellene.

Energi inn på en elektrolysecelle er gitt av mengde strøm og anoder som forbrukes. Energi ut består av kjemisk og termisk energi oppbundet i aluminiumen som tappes fra ovnene, varmetap ved tapping, termisk energi i rågassen og ikke minst varmetap gjennom overflatene på elektrolysecellen. Det ble gjennomført et måleprogram på Hydro Sunndal for å undersøke dette siste punktet. Grunnet tidsrammene for dette prosjektet var hovedmålet med måleprogrammet å *samle* data, snarere enn å behandle dem. En beregningsmodell på varmetapet gjennom celleoverflater ble likevel satt opp. Selv om denne modellen er til dels grovt forenklet, igjen på grunn av prosjektets tidsrammer, gir den et kvalitativt bilde på fordelingen av varmestrømmene gjennom elektrolysecellens overflater.

3.2. Utstyr og framgangsmåte

For å få en viss representasjon av hvordan varmetapet varierer med celle-alder ble det valgt ut 2 elektrolyseceller i SU4, én celle tidlig og én celle sent i livsløpet, henholdsvis celle A059 og A004. Det ble imidlertid kun gjort analyse og beregninger av dataene fra celle A004. Rådata for celle A059, samt begrensede data for celle I13 i SU3, finnes vedlagt på CD-ROM.

Cellens overflatetemperaturer ble målt med et termokamera av typen Fluke Ti45 IR FlexCam[®]. Varmedektoren i dette kameraet er av typen ukjølt bolometer, som måler temperaturøkninger i måleobjektets overflate som følge av absorpsjon av IR-stråling i spektralbandet 8-14 μm . Kameraet har en nøyaktighet på ± 2 °C eller 2 % (etter hvilken som er størst).

3.3. Geometri

Elektrolysecellens geometri, samt beregnings-detalljer utover det som er gitt i avsnitt 3.4 og 3.5 er diskutert i appendiks A.2.

3.4. Fysisk modell

Som diskutert innledningsvis er den fysiske modellen til dels grovt forenklet . Følgende generelle antagelser og forenklinger ble gjort:

- Varmetap fra elektrolysecellen ble antatt å skyldes stråling og frikonveksjon, varmetap grunnet tvunget konveksjon ble neglisjert.
- Elektrolysecellens overflater ble satt til å ha uniform temperaturfordeling. De forskjellige overflatetemperaturene ble satt lik den aritmetiske middeltemperaturen til de respektive flatene.
- Elektrolysecellens overflater i kjelleren ble antatt å ha en emissivitet på 0,95 etter Hydros egne prosedyrer for måling av overflatetemperatur ved bruk av termokamera.
- Omgivelsene tilnærmes som et svart legeme med emissivitet lik 1.
- Alle overflater er antatt å være grå legemer, diffuse og ugjennomsiktelige.
- Toppdekslet på elektrolysecellen består av overflater med forskjellig emissivitet. Termokameraet kan imidlertid bare stilles inn på én emissivitet per bilde slik at termobildene viser feil temperatur på overflater med emissivitet ulik den innstilte. Temperaturene over disse overflatene ble justert i etterkant etter formel 3.1 utledet analogt etter framgangsmåte i Gustavsen og Berdahl 2003 [5].

$$T_{korrigert} = \left(\frac{\epsilon_{korrigert}}{\epsilon_{målt}} \right)^{1/4} \cdot T_{målt} \quad (3.1)$$

Antagelsen om at varmetapet fra elektrolysecellens overflater kun skyldes stråling og frikonveksjon er konservativ. Det er derfor sannsynlig at virkelig varmetap gjennom cellens overflater er større enn hva beregningene nedenfor tilsier.

3.5. Matematisk modell

3.5.1. Stråling

Formfaktoren F_{ij} er definert som den brøkdelen av stråling som forlater overflate i som mottas av overflate j [7], og er en viktig kvantitet ved beregning av strålingsutveksling mellom overflater. Tabeller i [7], samt resiprositets-relasjonen (formel 3.2) og summasjonsregelen (formel 3.3) er brukt ved beregning av formfaktorer.

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.3)$$

Strålingsutveksling mellom diffuse, grå overflater er gitt av formel 3.4, hvor q_i betegner netto stråling som forlater overflate i , E_{bi} er den emisjonen overflate i ville hatt om den var et svart legeme, J_i er radiositet, ϵ_i overflatens emissivitet og A_i betegner overflatens areal. Radiositet inkluderer all strålingsenergi som forlater en overflate.

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i)/\epsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (3.4)$$

Emisjon for et svart legeme er gitt av Stefan-Boltzmanns lov:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3.5)$$

hvor σ er Stefan-Boltzmanns konstant gitt av $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ og T er overflatetemperatur i kelvin.

Ved strålingsinteraksjon mellom kun to overflater kan formel 3.6 benyttes.

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (3.6)$$

Strålingstapet fra elektrolysecellens toppdel beregnes med antagelse at hele denne overflaten kun stråler til omgivelsene. Omgivelsenes areal (A_2) kan da regnes å gå mot uendelig mens formfaktoren (F_{12}) går mot 1. Ligning 3.6 reduseres da til

$$q_1 = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_{\text{omgivelser}}^4) \quad (3.7)$$

3.5.2. Frikonveksjon

Varmetapet fra elektrolyscellen som følge av frikonveksjon ble beregnet med Newtons avkjølingslov gitt i formel 3.8

$$q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.8)$$

hvor \bar{h} er gjennomsnittlig varmeovergangstall for overflaten A_s , T_s er overflatetemperatur og T_∞ er omgivelsestemperatur. Varmeovergangstallet er gitt av $\bar{h} = \frac{k \cdot \overline{Nu}_L}{L}$ hvor k er termisk konduktivitet, \overline{Nu}_L gjennomsnittlig Nusselt-tall og L karakteristisk lengde. Nusselt-tallet for frikonveksjon over en vertikal flate finnes fra formel 3.9:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.9)$$

hvor $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ er Prandtl-tallet og Ra Rayleigh-tallet for strømmingen. Formel 3.9 gjelder alle Rayleigh-tall. Prandtl-tallet, som beskriver forholdet mellom kinematisk viskositet, ν , og termisk diffusivitet, α , kan slåes opp i tabeller. Rayleigh-tallet for frikonveksjon over en vertikal plate finnes fra formel 3.10:

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (3.10)$$

hvor g er tyngdens akselerasjon og $\beta = \frac{1}{T_s}$ er termisk-volumetrisk ekspansjonskoeffisient. ν , k , α og Pr slås opp i tabeller for temperatur $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$.

Varmetap via frikonveksjon over en skrå flate beregnes tilnærmet ved å anvende ligning 3.9 og 3.10 med $g = g \cos \theta$ hvor θ er som skissert i figur A.8.

Ved frikonveksjon over en horisontal, oppvarmet flate beregnes det gjennomsnittlige Nusselt-tallet etter formel

$$\overline{Nu}_L = 0,54 Ra_L^{1/4} (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (3.11)$$

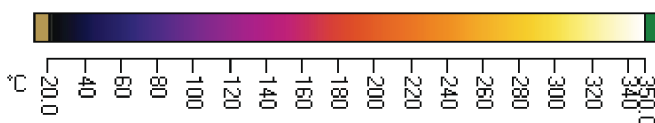
Karakteristisk lengde er her definert som $L \equiv \frac{A_s}{P}$, hvor A_s og P er henholdsvis overflatens areal og omkrets.

3.6. Feilkilder

- Varmetap som følge av tvunget konveksjon ble neglisjert. Dette er en grov tilnærming nærmest elektrolysehallens yttervegger, hvor kald uteluft suges inn som ventilasjonsluft og strømmer over elektrolysecellens kortsider med relativt stor hastighet. Dette illustreres tydelig med en målt temperaturforskjell på 54°C i kjelleren mellom kortside ved yttervegg og kortside ved midtgang (henholdsvis 67°C og 121°C). Oppe i elektrolysehallen ble tilsvarende temperaturforskjell målt til 22°C (henholdsvis 64°C og 86°C). Lenger unna elektrolysehallens yttervegg antas forenklingen å være kurant.
- Ideellt sett skulle man integrert over flatene med temperatur som variabel størrelse i stedet for å anvende middeltemperaturer.
- Beregning av temperatur via fargebilder i stedet for å hente temperaturdata rett ut fra termokameraets database anses for å tilføre unøyaktigheter i beregningene da et temperaturberegninger via lav-oppløselige fargebilder er mindre nøyaktig enn om man hadde hentet dataene som termobildene er basert på rett fra termokameraet.
- Noen termobilder tatt med en vinkel i forhold til overflate og kan gi en forskjøvet temperaturfordeling.
- Lukene på elektrolysecellene har varierende emissivitet grunnet varierende oksidtykkelse og aluminastøv på lukene. Emissiviteten ble målt på flere luker og satt til en gjennomsnittlig verdi på 0,36.

3.6.1. Kommentar til databehandling av termobilder

Dataene fra termokameraet ble lagret som bilder i BMP-filformatet hvor hver farge tilsvarer en temperatur. Hver enkelt farge består av en kombinasjon av fargenyanser av rødt, grønt og blått, en såkalt RGB-fargemodell som gir i underkant av 16,8 millioner forskjellige fargekombinasjoner. Med et termobilde følger et fargespekter hvor hver farge representerer en bestemt temperatur som vist i figur 3.1. Temperatur-nøyaktigheten



Figur 3.1.: Fargespekter versus temperaturspekter

er dermed bestemt av antall farger i fargespekteret. På grunn av lav oppløsning på fargespekterbildene som ble hentet ut fra termokameraet er hvert temperaturspekter representert med 314 farger. Et temperaturspenn på temperaturmålingene på 330°C (ref. figur 3.1) gir derfor en nøyaktighet på omtrent 1°C.

Et Matlab-program ble brukt til midling av overflatetemperaturene. Temperaturene i hvert bildepunkt ble summert opp og dividert på antall punkter. I de tilfellene hvor termobildene ikke er tatt normalt på celleoverflatene vil dette kunne føre til at gjennomsnittstemperatur blir feil vektet på grunn av perspektivet termobildet er tatt i.

3.7. Resultater og diskusjoner

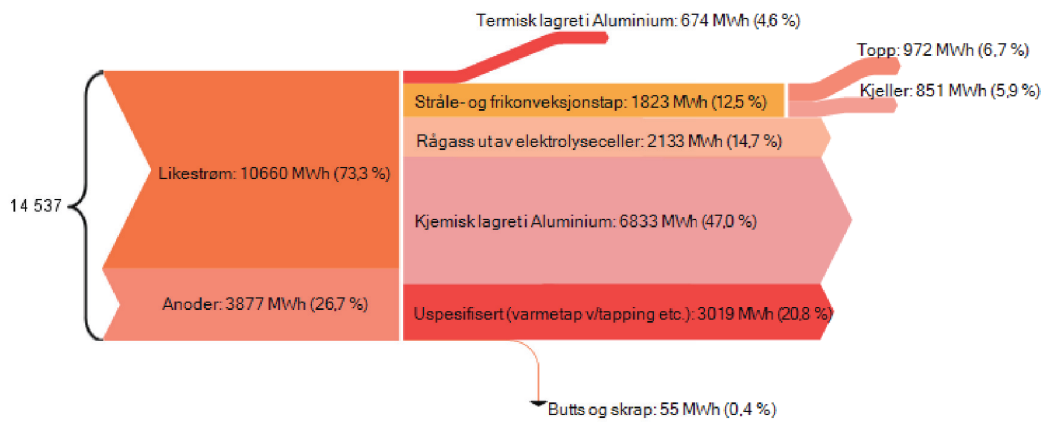
Figur 3.2 viser energibalansen for én elektrolysecelle i SU4. Fordelingen av varmetapet her viker noe fra det som ble observert for de overordnede energibalansene for SU3 og SU4. Resultatet for røykgassen samsvarer med hva vi fant for SU3 og SU4 og ligger på 13,2%, men posten for strålings- og konveksjonstap ligger hele 15 prosentpoeng lavere, samt at hele 21% av energimengden ut av cellen utgjøres av ukjente faktorer. Som tidligere nevnt antas én del av denne mengden å kunne tilskrives strålings- og konveksjonstapet fra celleoverflatene, men hvor stor denne delen er, samt på hvilke poster resten av det uspesifiserte varmetapet skal salderes, blir rene antagelser. Regnemodellen for varmetapet gjennom celle-overflatene må derfor forbedres, og et måleprogram for hele elektrolysecellen settes opp for å kunne danne et mer nøyaktig bilde av energistrømmene gjennom denne. Programmet bør omfatte å måle strømforbruk, anodeforbruk og volumstrøm og temperatur på røykgassen ut av cellen. I tillegg bør det også redegjøres for varmetapet i forbindelse med anodeskift.

Foruten posten “Stråle- og frikonveksjonstap” er alle tall i denne oversikten beregnet ved å dele totalverdier for SU4 på antall elektrolyseceller (340 stykk) i SU4.

3.7.1. Varmetapsfordeling over celleoverflate

Fordelingen av varmetapet gjennom elektrolysecellens overflater sammenlignes med tilsvarende data for en typisk Hall-Héroult-celle [8] i figur 3.3. Målte og beregnede verdier for varmetapet gjennom toppen av elektrolysecellen ser ut til å være langt større enn for en typisk Hall-Héroult-celle. Størstedelen av dette varmetapet er den varmemengden som forsvinner ut av cellen med rågassen (se figur 3.4). Som nevnt i avsnitt 3.4 *Fysisk modell* antas det at varmetapet gjennom elektrolysecellens overflater i realiteten er høyere, og derfor vil ta en større del av kaka enn hva som er tilfelle vist i figur 3.3a. Men som nevnt

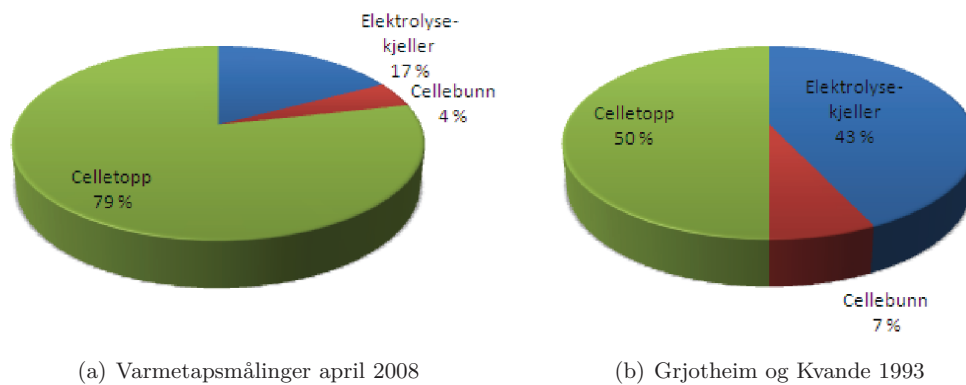
[MWh/år]



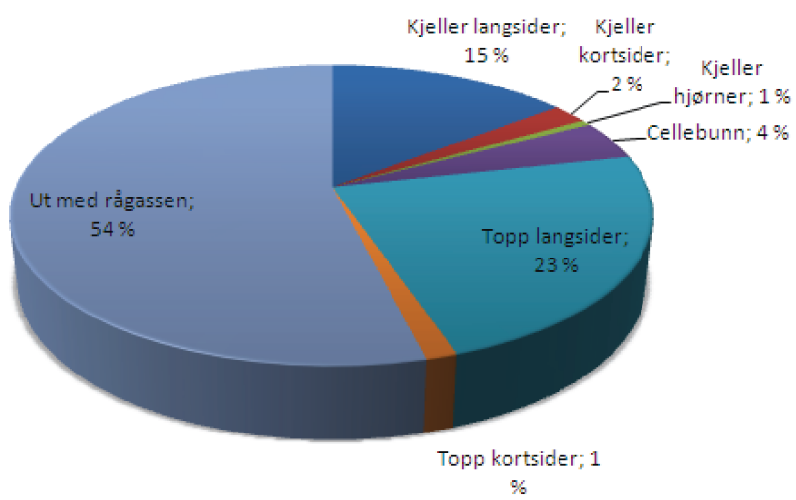
Figur 3.2.: Sankeydiagram for celle A004 i SU4

ovenfor må et mer omfattende måleprogram gjennomføres, samt beregningsmodellen for varmetapet gjennom celleoverflatene raffineres, før man kan si noe sikkert om dette.

Figur 3.4 viser en mer detaljert fordeling av varmetapet gjennom elektrolysecellens overflater. Her varmetapet gjennom alle overflater som ble brukt i beregningsmodellen tatt med, i tillegg til varmetapet med rågassen. Totalt varmetap gjennom elektrolysecelle A004s overflater ble beregnet til å være 208 kW.



Figur 3.3.: Sammenligning av energitapsfordeling elektrolysecelle



Figur 3.4.: Fordeling av energitapet fra elektrolysecelle

4. Måleprogram støvmålinger

Et måleprogram for å måle støvkonsentrasjon og støvpartikklenes størrelsesfordeling ble gjennomført på Hydro Aluminiums verk på Sunndalsøra fra 10. til 14. mars.

4.1. Valg av målested

Valg av målested for støvmålingene ble gjort ut ifra en tommelfingerregel som sier at slike målinger bør utføres minst 10 diameter nedstrøms et rørbend, for å sikre fullt utviklet rørstrømning. Samtidig bør man ha minst et par diameter rettstrekk oppstrøms neste rørbend. Det lengste rettstrekket som ble funnet på Hydro Sunndal hadde en anslått lengde på 17-18 diameter, men ligger meget utilgjengelig. Målestedet som ble valgt ligger ved det lengste rette rørstrekket hvor installasjon av måleutstyr var praktisk gjennomførbart. Dette røret samler opp røykgassen fra 56 elektrolyseceller i SU3s sørligste seksjon. Målestusser ble boret opp på to sider av røret, 6,6 diameter nedstrøms et rørbend og 1,7 diameter oppstrøms det neste. Rørstrekket det er snakk om ligger på bakkenivå under kjørebri mellom SU3 og SU4.

4.1.1. Innløpslengde

En klassisk løsning på idealisert innløpslengde for turbulent strømning i sirkulære rør er av den typen utviklet av H. Latzko i 1921. Latzkos løsning for innløpslengden er gitt i formel 4.1 [13].

$$\left(\frac{x}{D}\right)_{inngang} = 0,623 \operatorname{Re}^{0,25} \quad (4.1)$$

hvor $\operatorname{Re} = \frac{VD}{\nu}$ er reynoldstallet for sirkulære rør. V er strømmingens middelhastighet, D rørets diameter og ν kinematisk viskositet. I følge målingene som ble gjort på Sunndal verk er $\operatorname{Re}_D = 2,1 \cdot 10^6$, som gir en innløpslengde på $\frac{x}{D} = 23,7$. Det er dermed forventet et meget flatt hastighetsprofil for gass-strømmen. Hovedmålet med disse målingene var å kartlegge støvkonsentrasjon i rågassen, samt partikkelstørrelsesfordeling. En ikke fullt utviklet rørstrømning er da ikke kritisk for resultatet av støvmålingene.

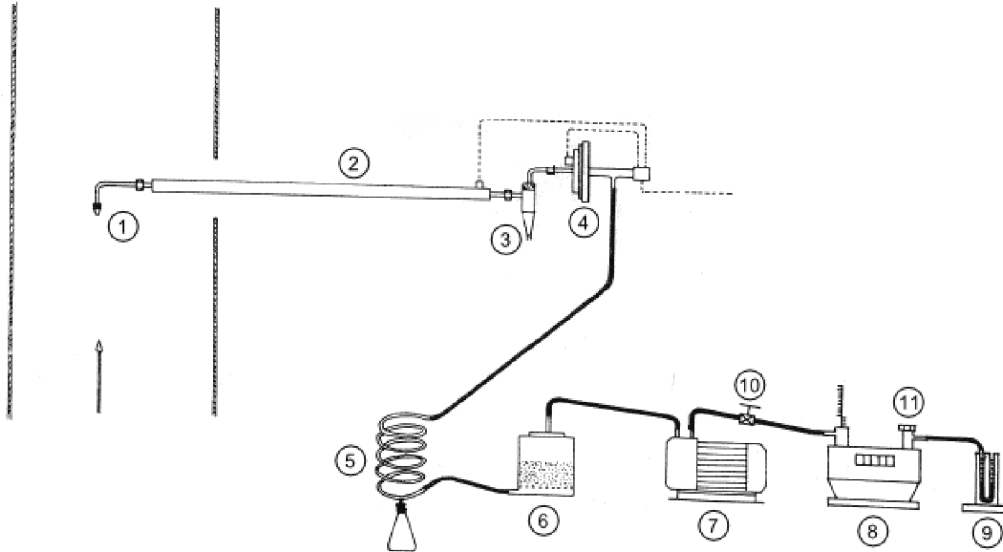
4.2. Gjennomføring av måleprogram

4.2.1. Oppsett av støvmåleutstyr

Støvpartikkene i røykgassen fra SU3 ble fanget opp med et totalfilter. Figur 4.1 viser standardoppsettet av SINTEF støvmålingsutstyret. Visse forandringer ble gjort på utstyret brukt i dette forsøket. Sondespiss (1) og avsugssonde (2) ble spesiallaget i ett

stykke å nå over gassrørets store diameter, syklonen (3) er beregnet for gasser med høyt støvinnhold (over cirka 5-10 g/Nm³) og ble ikke tatt i bruk, filterholderen (4) var ikke av den oppvarmede typen, spiralkondensator (5) ble ikke anvendt med antagelse om lite fuktighet i rågassen fra elektrolysecellene.

Den lille fuktigheten i rågassen ble fjernet ved hjelp av en beholder med silikagel (6) for å skåne vakuumpumpen (7). Et gassur (8) målte mengden tørr gass avsugd per måling. Tiden ble tatt med stoppeklokke. Isokinetisk avsug sikres ved å holde trykket over blenden (11) ved en verdi gitt av formel 4.2. Dette trykket avleses med et U-rørmanometer (9) og reguleres med en strupeventil (10).



Figur 4.1.: SINTEF Støvmåleutstyr

Det ble målt fra 2 sider for å dekke over hele gassrørets diameter.

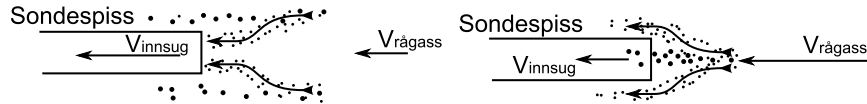
4.2.1.1. Isokinetisk avsug

For å få en riktig representasjon av partikkelstørrelsesfordeling i rågassen er det viktig at avsugningen skjer isokinetisk. Med en innsugningshastighet høyere enn rågasshastigheten vil små partikler suges inn fra strømmen rundt sondespissen, og man får en overrepresentasjon av disse i prøven. Analogt vil man få en overrepresentasjon av store partikler når $V_{\text{innsug}} < V_{\text{rågass}}$, som skissert i figur 4.2 b).

Trykket over blenderåpningen bestemmes ut fra følgende formel:

$$\Delta P_b = \Delta P_p \cdot 1,234 \cdot B_0^2 \cdot E \cdot \frac{T_B}{T_p} \quad (4.2)$$

, hvor ΔP_b er differensialtrykk over blenden, ΔP_p dynamisk gasstrykk fra pitotrørsmåling, B_0 andel tørr gass, E en funksjon av blendekonstant og sondespissens diameter, T_B ab-



a) Overrepresentasjon av små partikler b) Overrepresentasjon av store partikler

Figur 4.2.: Ubalansert partikkelmåling

solutt temperatur for gassen ved gassuret og T_p er absolutt temperatur pitotrør. E er gitt av tabell i [9] for sondespissens diameter $d_s = 10\text{mm}$. Andel tørr gass ble satt til 1.

4.2.2. Behandling av filtre

Totalfilterne ble veid på en fintfølende vekt på NTNU før avreise til Sunndalsøra. Etter hver støvmåling ble filterne veid på en tilsvarende vekt på Hydros eget laboratorium.

4.2.3. Hastighets- og temperaturmålinger

Hastighet i gassstrømmen ved de forskjellige målepunktene bestemmes med følgende formel utledet fra Bernoullis ligning:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P_d}{\rho}}$$

, hvor gassens tetthet, ρ , bestemmes fra en omskrevet versjon av den idelle gasslov:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 P_s}{T P_0}$$

, hvor indeks 0 indikerer verdier ved $T_0 = 0^\circ\text{C}$. T er gassens absolute temperatur og P_s statisk trykk. Gassens tetthet er antatt å være tilnærmet den samme som for luft. Trykkene ble målt med ved hjelp av pitorrørstraversing.

4.2.4. Valg av målepunkter

Støvprøvene ble tatt ved 5 punkter på gassrørets tverrgående horisontallinje. Målepunktene plassering ble valgt som anbefalt av SINTEF [9]: parvis antall målepunkter plassert i hvert sitt tyngdepunkt til kosentriske sirkler av like store areal. (Se appendiks A.1 for detaljer.) I tillegg ble det lagt til et målepunkt i senter av rørtverrsnittet. Måleserien ble utført over 4 dager og hvert avsug varte i cirka 1,5 timer.

Gassrørets store diameter gjorde det nødvendig å gå inn fra to sider for å nå over hele tverrsnittet.

Ideelt sett skulle det også vært gjort målinger langs en vertikallinje, men det var praktisk meget vanskelig å utføre gassmålinger både fra undersiden og oversiden av gassrøret. Det var i tillegg sterkt frarådet av Hydros HMS-representanter.

4.2.4.1. Kommentar til målestussene

Det viste seg at de første målestussene som ble boret opp lå noe under horisontallinjen. Da det ikke er noe krav om at linjen man måler langs skal være horisontal, så lenge den går gjennom røretverrsnittets sentrum, ble det tatt utgangspunkt i en målelinje som, på den ene siden av røret, var vridd $4,8^\circ$ ned i forhold til horisontallinjen. Da det skulle gjøres målinger fra den andre siden viste det seg imidlertid at rørveggenes tykkelse gjorde det problematisk å tilte målestyret slik at alle målepunkter havnet på samme linje. For å forenkle måleprosessen ble det boret opp to nye målestusser på horisontallinjen framfor å utvide de gamle. Målinger gjort fra og med 13. mars er tatt langs horisontallinjen. Siden forskyvningen av de tidligere målingene er såpass liten (under 0,4% i radiell og 2,7% i periferiretning), er også målingene fra 11. og 12. mars behandlet som om de er gjort langs horisontallinjen.

4.3. Resultater og diskusjon

4.3.1. Hastighets- og temperaturprofil

Målt hastighetsprofil sammenlignes med teoretisk hastighetsprofil for en fullt utviklet turbulent rørstrømning [13].

$$u^+ = 2,5 \ln \left[y^+ \frac{1,5(1+r/r_0)}{1+2(r/r_0)^2} \right] + 5,5 \quad (4.3)$$

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (4.4)$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (4.5)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = V \sqrt{\frac{c_f}{2}} \quad (4.6)$$

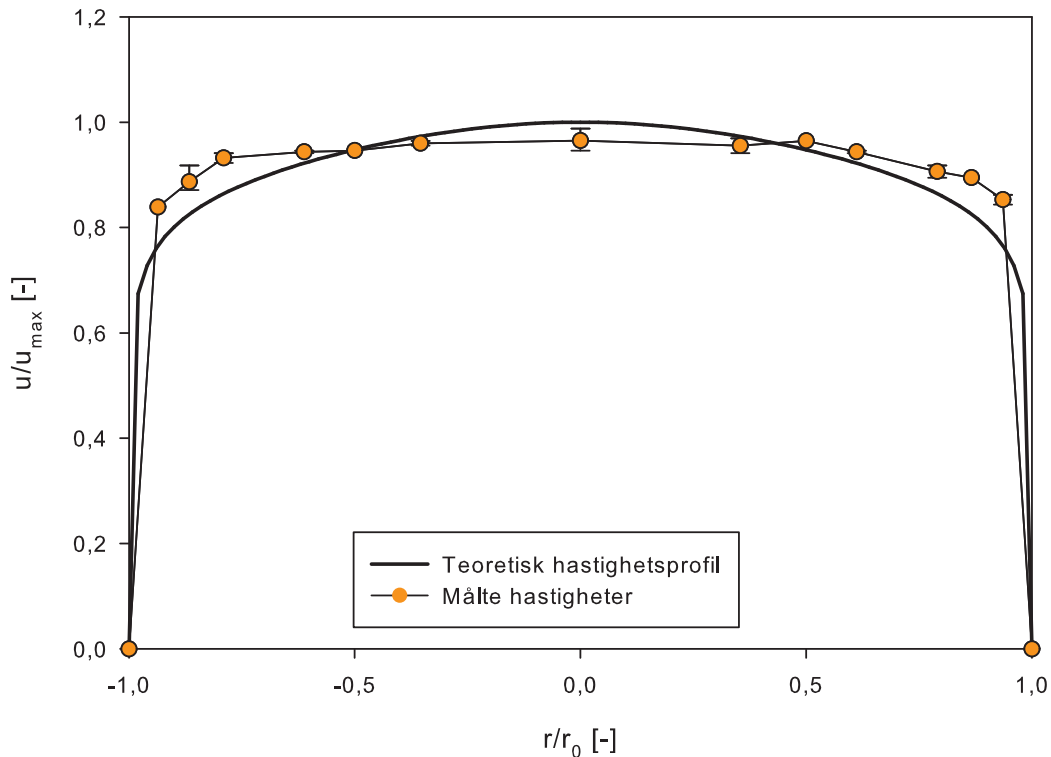
$$\frac{c_f}{2} = \frac{f}{8} \quad (4.7)$$

$$\frac{V}{u_c} = 0,817 \quad (4.8)$$

Moody's friksjonsfaktor, f , ble regnet ut med en kalkulator basert på Moody-diagrammet. [3].

I figur 4.3 er teoretisk turbulent hastighetsprofil, samt målte middelhastigheter med maksimum- og miniumverdier plottet. Som det tydelig går fram av det flate hastighetsprofil, er gassstrømningen langt fra fullt utviklet, noe som også stemmer overens med hva som var antatt på forhånd. Hastighetsprofilen er derimot symmetrisk og fint.

Det må nevnes her at det teoretiske hastighetsprofilen i figur 4.3 er justert slik at arealet under kurven er likt arealet under det målte hastighetsprofilen. Tverrsnittsmidlet hastighet, V , blir noe for stor når den regnes ut fra innsamlede hastighetsdata. Dette



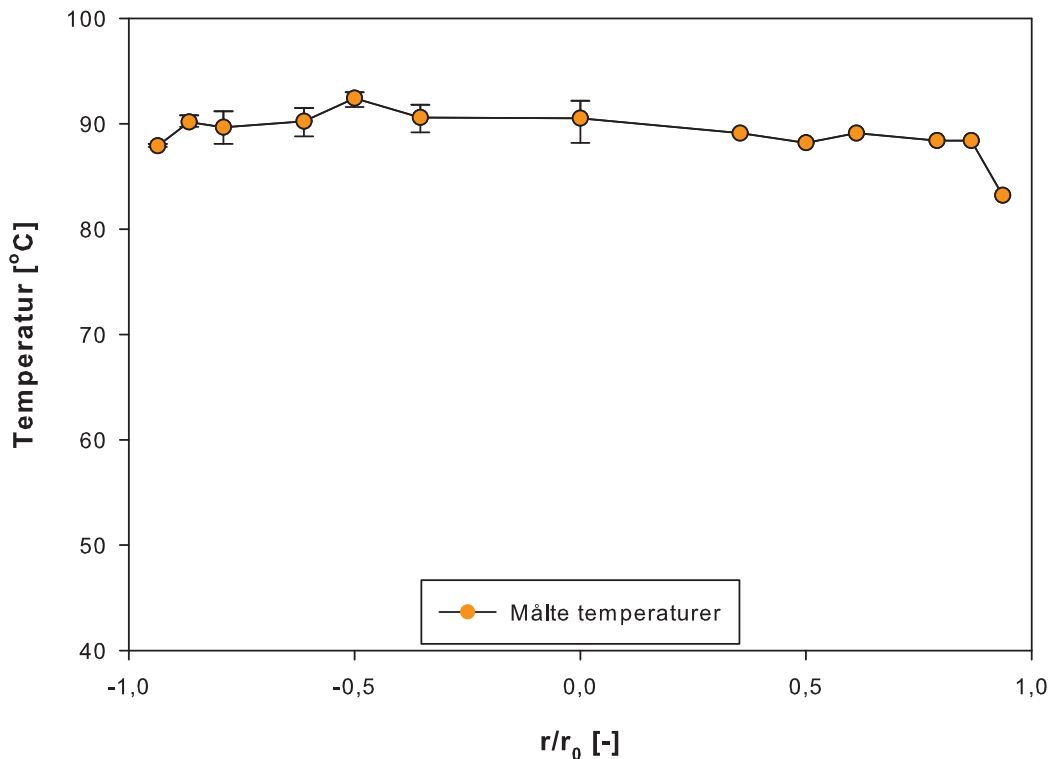
Figur 4.3.: Turbulent hastighetsprofil - teoretisk og målt med maks/min-verdier

skyldes i all sannsynlighet for få målepunkter nær rørveggen slik at de lave hastighetene nær veggen får for liten effekt ved utregning av volumstrøm og middelhastighet.

Målt temperaturprofil er vist i figur 4.4. Temperaturene på innsiden av rørvegg ble ikke målt og er derfor ikke plottet her. Temperaturprofilen er flatt over en stor del av rørets midtseksjon, som forventet for en ikke fullt utviklet turbulent rørstrømning. Det vises også at profilen er noe skjevt. Dette skyldes sannsynligvis at den siden av røret hvor $r/r_0=1$, på grunn av geometrien til omkringliggende bygninger, var utsatt for betraktelig sterkere vinder enn på motsatt side og dermed større varmetap ved konveksjon.

4.3.2. Støvkonsentrasjon og partikkelstørrelsesfordeling

Resultatene fra totalfilter-målingene gjort på Hydro Sunndal fra 11. - 14. mars 2008 er vist i figur 4.5. Aritmetisk gjennomsnittlig støvkonsentrasjon over hele rørtverrsnittet er 363 mg/Nm^3 med et standardavvik på 12 %. Ut ifra gassstrømmens flate og symmetriske hastighetsprofil er det nærliggende å anta at også støvkonsentrasjonsprofilen vil

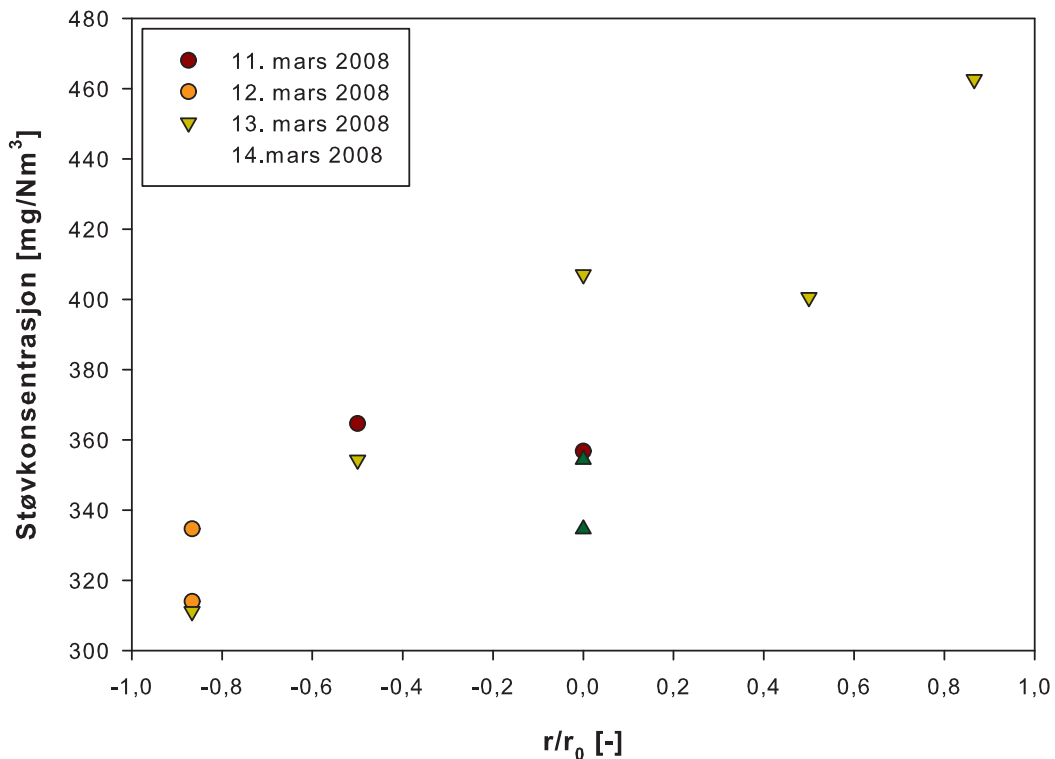


Figur 4.4.: Temperaturprofil med maks/min-verdier

være flatt og symmetrisk. Figur 4.5 indikerer imidlertid et meget skjevt konsentrasjonsprofil. Dessverre ble rågassmåleprogrammet noe amputert, blant annet på grunn av problemet med målestussene. Det foreligger derfor kun ett sett med måledata for rågassen i målepunktene 4 og 5, slik at det ikke er statistisk grunnlag for å kommentere disse resultatene isolert sett. Likevel, med rågassstrømmens symmetriske hastighetsprofil tatt i betraktning, er det grunn til å mistenke partikkelkonsentrasjonen i målepunkt 5 å være en statistisk utligger.

I sin doktorgradsavhandling [12] gjorde Næss tilsvarende støvprøver i en testseksjon på Hydro Aluminium Årdal i 2002, med lignende resultater. Gjennomsnittlig partikkelkonsentrasjon ved posisjon $r/r_0 = 0,4$ målt med totalfilter var omtrent 350 mg/Nm^3 .

Midlet støvkonsentrasjon i de forskjellige målepunktene, samt over hele rørtverrsnittet er listet opp i tabell 4.1. Standardavvikene er overraskende lave og indikerer relativt stabile støvkonsentrasjoner. Men man må være oppmerksom på at det er få støvprøvetakinger over en relativt kort tidsperiode som ligger til grunn for disse resultatene. Støvkonsentrasjonene vil høyst sannsynlig variere over året og med operasjonen av elek-



Figur 4.5.: Støvkonsentrasjon - egne målinger

trolysehallen.

Hydros egne målinger av støvkonsentrasjonen i rågassen inn på FTP4, vist i figur 4.6, gir et dramatisk annerledes bilde av situasjonen. Gjennomsnittlig støvkonsentrasjon fra februar 2007 til januar 2008 er $848 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ med et standardavvik på 15 %. Det er nær 2,5 ganger så høy konsentrasjon som målingene i forbindelse med denne oppgaven tilsier. Hva som skyldes denne enorme forskjellen vites ikke. Det skal nevnes at Hydros målinger gjelder for alle SU3s 184 elektrolyseceller mot 54 celler omfattet i egne målinger, men det er ikke nærliggende å tro at støvkonsentrasjonen de forskjellige seksjonene i SU3 vil variere i så stor grad. Hydro kan ha en annerledes framgangsmåte ved måling av støvkonsentrasjoner, men det er heller ikke nærliggende å tro at dette kan utgjøre en forskjell i måleresultater med en faktor på 2,5. Naturlige variasjoner i støvkonsentrasjonen i rågassen kan skyldes variasjoner i operasjonen av elektrolysecellene, åpning av celleluker ved anodebyte og endringer i råmateriale. Markante avvik mellom støvmålinger tatt over lengre tid (fra desember 1996 til oktober 2005) og målinger tatt i et test-utsnitt over kortere tid ble også påvist i [12].

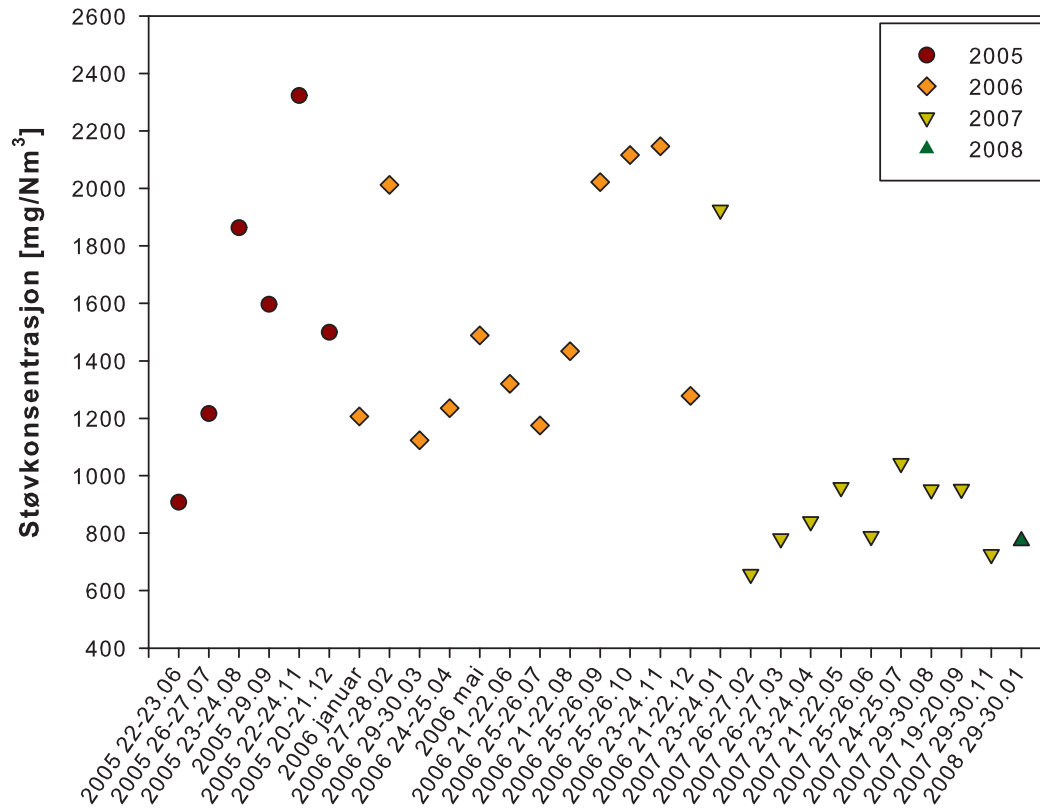
Målepunkt	Antall måledata	r/r_0	Midlet støvkonsentrasjon [mg/Nm ³]	Standardavvik
1	3	-0,87	320	4 %
2	2	-0,5	359	2 %
3	4	0	363	9 %
4	1	0,5	401	-
5	1	0,87	463	-
Over rørtverrsnittet	12	-	363	12 %

Tabell 4.1.: Støvkonsentrasjoner over rørtverrsnitt

Noe som i tillegg er verdt å merke seg fra figur 4.6 er de store variasjonene i støvkonsentrasjon over perioden juni 2005 til januar 2007, samt det markante droppet i støvkonsentrasjon fra denne perioden til perioden februar 2007 til januar 2008. Det kan tenkes at dette skyldes endringer i produksjonen i SU3, men denne antagelsen er ikke bekreftet av Hydro.

4.3.3. Partikkelstørrelsesfordeling

Siste støvmåling pågikk i 4 timer og det ble avsugd cirka 2 gram støv. Denne prøven ble sendt til SINTEF for massespektrografi-analyse av partikkelstørrelsesfordelingen. Resultatene av denne analysen foreligger dessverre ikke i det rapporten må i trykken.



Figur 4.6.: Støvkonsentrasjon - Hydros egne målinger

5. Gjenvinningspotensial

5.1. Generelle betraktninger om eksergi

Når to systemer ved forskjellige tilstander bringes i kontakt med hverandre oppstår muligheten for at arbeid kan utføres. I prinsippet kan det bli gjort arbeid mens systemene nærmer seg likevekt. Når et av de to systemene er et passelig idealisert system kalt et eksergisk referansemiljø, eller bare *omgivelser*, og det andre er et system av interesse, er *eksergi* det maksimale teoretiske arbeidet som kan hentes ut når disse systemene går til likevekt. [11].

En inngående eksergianalyse av spillvarmestrømmene på Hydro Sunndal vil ikke gjennomføres i dette arbeidet, snarere en enkel inndeling av utnyttelsespotensialet til de ulike energikildene basert på enkle, generelle kriterier.

5.2. Gradering av utnyttelsespotensialer

For rangering av utnyttelsespotensialet til spillvarmestrømmene på Hydro Sunndal er det to hovedparametre som legges til grunn: temperaturdifferanser og varmekapasitet til de bærende medier. En energikilde er, med tanke på utnyttelse av energien til arbeid, mer fleksibel jo større temperaturdifferansen er i forhold til omgivelsene. Samtidig vil det være lettere å utvinne energi fra et medium med høy varmekapasitet kontra et med lav varmekapasitet ved samme temperaturdifferanse i forhold til omgivelsene. Det er derfor lettere å utvinne energi fra vann ($C_{p,vann} \approx 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ for $0^\circ\text{C} < T_{vann} < 110^\circ\text{C}$) enn fra gass/luft ($C_{p,luft} \approx 1,01$ for $0^\circ\text{C} < T_{luft} < 140^\circ\text{C}$).

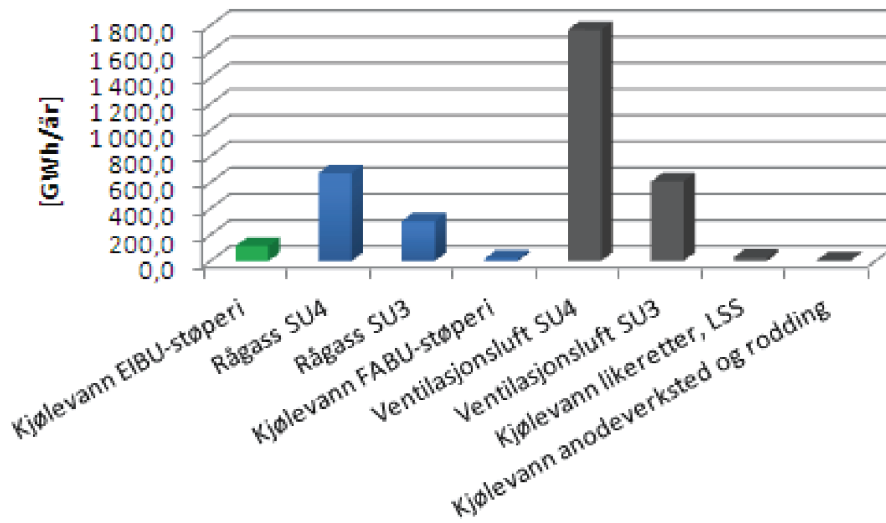
Utnyttelsespotensialet til spillvarmen defineres som:

- **Høyt** når
 - bærende medium er vann, $\Delta T \geq 15^\circ\text{C}$ og effekt $P \geq 5$ MW
 - bærende medium er luft/gass og $\Delta T \geq 200^\circ\text{C}$
- **Middels** når
 - bærende er medium vann og $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$
 - bærende er medium luft/gass $50^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 150^\circ\text{C}$ eller effekt $P \geq 100$ MW
- **Lavt** når
 - bærende medium er vann og $\Delta T < 10^\circ\text{C}$
 - bærende medium er luft/gass og $\Delta T < 50^\circ\text{C}$

Tabell 5.1 gir en oversikt over mengde, temperatur og anvendbarhet av de forskjellige varmestrømmene på Hydro Sunndal Verk, som også er illustrert i figur 5.1.

Lokalisering	Mengde [GWh/år]	Effekt [MW]	ΔT [°C]	Medium
Kjølevann EIBU-støperi	113	13	15 - 20	Vann
Rågass SU4	673	77	102,3	Gass
Rågass SU3	304	35	82,3	Gass
Kjølevann FABU-støperi	19	2	15 - 20	Vann
Ventilasjonsluft SU4	1 767	202	22,4	Gass
Ventilasjonsluft SU3	608	69	21,9	Gass
Kjølevann likeretter, LSS	28	3	5,0	Vann
Kjølevann anodeverksted og rodding	7	1	5,0	Vann

Tabell 5.1.: Utnyttelsespotensial spillvarmestrømmer



Figur 5.1.: Utnyttelsespotensial spillvarmestrømmer

5.3. Anvendelse av spillvarmestrømmene

De vanligste teknologiene for å utnytte spillvarme er enten ved bruk av varmepumpe eller varmeveksler.

5.3.1. Rågass

Spillvarmestrømmene med størst utnyttelsespotensiale kommer med rågassen. Denne varmen kan best utnyttes med varmevekslere. Det er allerede i dag installert en varmeveksler etter tørrfilteret ved renseanlegget FTP3 (se seksjon 5.3.4), men potensialet for å hente ut energi til fjernvarme er langt større enn hva Sunndalsøras drøyt 4 000 innbyggere klarer å ta i mot, selv med 100 % utbygd fjernvarmenett. Det optimale ville vært å produsere strøm av spillvarmen i rågassen, men slik det er i dag er det for lave temperaturer på rågassen til at det er økonomisk gjennomførbart.

5.3.2. Ventilasjonluft

Enorme mengder varmeenergi forsvinner ut til atmosfæren med ventilasjonsluften i SU3 og SU4, nærmere bestemt 43,9 % av det totale elektrisitetsforbruket på Hydro Sunndal. Denne energien er det imidlertid vanskelig å utnytte. For det første har den i utgangspunktet et lavt teoretisk potensial, med en temperaturdifferanse i forhold til utetemperaturen på omtrent 22°C og maksimumstemperaturer som varierer mellom omtrentlig 20 og 50°C gjennom året. For det andre er det meget vanskelig å utnytte energien i praksis, siden ventilasjonsluften ikke samles i ett punkt, men er fordelt over elektrolyshallene. Dette nærmest umuliggjør installering av varmevekslere og samtidig ha en positiv økonomi i prosjektet.

5.3.3. Kjølevann fra støperiene

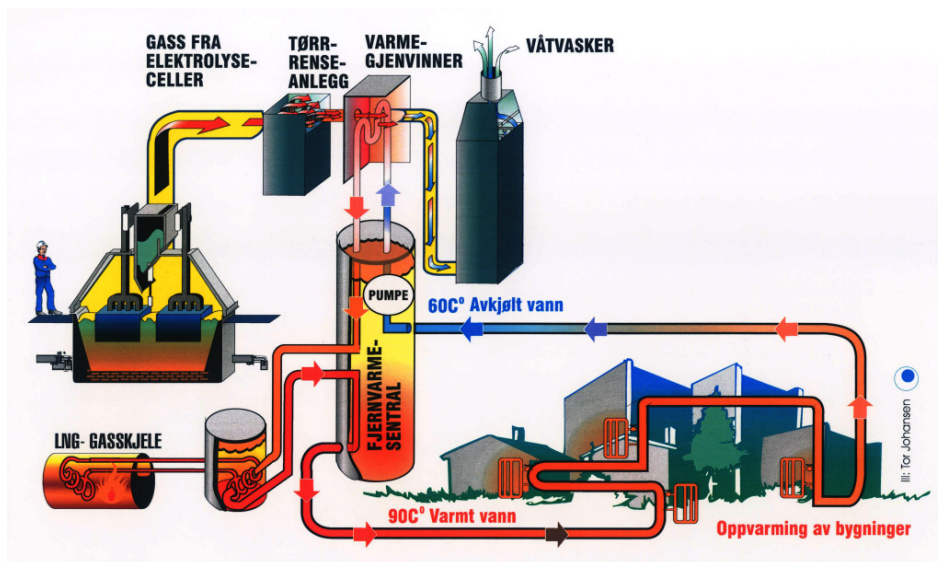
Varmepumper kan brukes for å heve temperaturen i kjølevannet. Kjølevannet er hentet fra elva Driva med temperaturer varierende mellom 1°C og 11-12°C over året. $\Delta T_{kjølevann}$ holder seg relativt konstant over året, slik at høyeste temperatur på kjølevannet er opp mot 30°C. En varmepumpe kan COP \approx 4 kan løfte potensialet nok til å anvendes som kilde til aerotemper oppvarming. Energien i kjølevannet fra EIBU-støperiet vil alene være nok til å varme opp bygningene på Hydro Sunndal.

5.3.4. Fjernvarme Sunndalsøra

På Sunndalsøra utnyttes en liten del av røykgassvarmen fra SU4 til fjernvarme. En varmeveksler er plassert mellom tørr-reseanlegget og våtvaskeranlegget (figur 5.2) på FTP3, og tar ut cirka 7 MW effekt fra røykgassen. Utnyttelsesgraden er på rundt regnet 0,5 og gir en årlig energimengde på 30 GWh. Fjernvarmesentralen på Sunndalsøra er designet for å gi 90°C ut på fjernvarmeanlegget og få vann ved 60 grader tilbake.

Ved morgenrushet (mellom cirka klokken 7 og 9) i de kalde vintermånedene supplerer en spisslastkjel varmeveksleren ved SU3 for å opprettholde 90°C varmt vann ut på fjernvarmenettet.

Varmen fra fjernvarmesentralen går hovedsaklig til oppvarming av kommunale og statlige bygg på Sunndalsøra. Private husstander har mulighet til å koble seg på fjernvarmenettet, men med relativt lave strømpriser og høye investeringskostnader blir dette nedprioritert av folk flest.



Figur 5.2.: Fjernvarmeanlegg Sunndalsøra

6. Konklusjoner og forslag til videre arbeid

6.1. Konklusjoner

6.1.1. Partikkelkonsentrasjon i røykgassen

Hastighets- og temperaturprofilene for rågassen fra søndre seksjon av SU3 viste seg å være meget symmetriske, og et godt utgangspunkt for tolking av videre resultater. Gassstrømmen var imidlertid lite utviklet, men dette er av liten betydning for tolkning av støvkonsentrasjonen i rågassen. Støvkonsentrasjonen over rørtverrsnittet ble fra målingene funnet å være 363 mg/Nm^3 med et standardavvik på 12 %. Dette ligner resultater fra lignende målinger gjort på Hydro Årdal [12] i 2002, men avviker voldsomt fra målinger gjort over et helt år av laboratorieteamet på Hydro Sunndal. Midlet støvkonsentrasjon for perioden februar 2007 til januar 2008 var målt til 848 mg/Nm^3 med et standardavvik på 15 %.

Dette store avviket kan skyldes naturlige variasjoner i støvkonsentrasjonen i rågassen kan forårsakes variasjoner i operasjonen av elektrolysecellene, åpning av celleluker ved anodebyte og endringer i kvaliteten på råmaterialene og lignende.

6.1.2. Utnyttelse av spillvarmestrømmer

Til tross for at enorme mengder energi, rundt 3,4 *terawatt-timer* per år, går tapt i spillvarmestrømmene ved Hydro Sunndal har størsteparten av disse energistrømmene (67 % forsvinner med ventilasjonluften i SU3 og SU4) for lavt potensial til å la seg utnytte slik ståa er i dag. Store mengder energi, nærmere bestemt 977 GWh, kan la seg hente ut fra rågassen fra elektrolysehallene til bruk som fjernvarme. Men markedet for fjernvarme begrenser seg til Sunndalsøra som ikke har behov for mer enn en brøkdel av denne energien, selv om alle husstander skulle vært forsynt med fjernvarme.

Det mest optimale vil selvfølgelig være å produsere lett transporterbar elektrisitet av spillvarmestrømmene. Dette krever imidlertid en høyere eksergi på strømmene enn hva som er tilfellet i dag. Det finnes systemer i dag for produksjon av strøm fra gasstemperaturer ned mot 150°C , men å øke rågassstemperaturen til dette nivået vil gi tørrfilterne ved renselanleggene problemer.

I framtiden kan det bli mer aktuelt med elektrisitetsproduksjon fra spillvarmestrømmene. Forskning pågår, blant annet ved SINTEF og NTNU, på å produsere elektrisitet fra gasstemperaturer helt ned til 120°C . Et viktigere bidrag til spillvarmeutnyttelse på Hydro Sunndal ville imidlertid vært et gjennombrudd på rågassvarmeveksler-prosjektet omtalt i innledningen. Da vil man potensielt kunne øke temperaturen på rågassen og muliggjøre produksjon av elektrisk strøm. En hyggelig bieffekt vil være lavere varmetap

til omgivelsene, hovedsakelig ventilasjonsluften i elektrolysehallene, som følge av isolering av gassrør og potensielt bedre varmeisolering av elektrolyseceller.

Det er mer enn nok energi tilgjengelig i spillvarmestrømmene til anvendelse internt på Hydro Sunndal, da hovedsaklig til oppvarming av bygninger ved bruk av vannbåren varme. For et snaut tiår siden ble det lagt om fra oppvarming med radioatorer til oppvarming med panelovner i administrasjonsbygget, så det er nærliggende å tro at infrastrukturen for vannbåren varme fortsatt ligger tilgjengelig, men dette er ikke bekreftet.

6.2. Forslag til videre arbeid

6.2.1. Gassmålinger

Data på partikkelstørrelsesfordelingen i rågassen fra SU3 foreligger som nevnt ikke når rapporten går i trykken. Disse forventes imidlertid å komme fra SINTEF innen rimelig tid. Det anbefales at studenten tolker disse dataene når de foreligger for å komplettere støvmåleprogrammet utført ved Hydro SU3 i mars 2008.

SU4 er bygget på langt nyere og mer moderne elektrolyseteknologi enn hva som er tilfellet for SU3. Det er derfor nærliggende å tro at partikkelkonsentrasjonen og -fordelingen kan være annerledes i SU4. Det anbefales derfor å gjennomføre støvmålinger i rågassen fra SU4 som et bidrag til NTNU-Hydros rågassvarmeveksler-prosjekt. Etter som rågassvarmeveksler-prosjektet modnes anbefales det også et mer omfattende rågass-måleprogram, både for SU3 og SU4, ved bruk av både totalfilter og impaktor over lengre tid. Resultater fra et slikt prosjekt kan bidra med konkrete designparametre for et eventuell rågassvarmeveksler.

6.2.2. Varmetap fra elektrolyseceller

Beregningsmodellen for varmetapet gjennom overflatene på elektrolysecelle A004 i SU4 lider som presisert tidligere av grove forenklinger, og bør erstattes av en mer sofistikert beregningsmodell.

For å få et godt bilde av varmestrømmene gjennom en elektrolysecelle bør et komplett måleprogram utføres. Dette programmet bør omfatte måling av elektrisitet og råstoffer inn på elektrolysecellen, samt varmetap gjennom overflater, med rågass og ved anodeskift.

Bibliografi

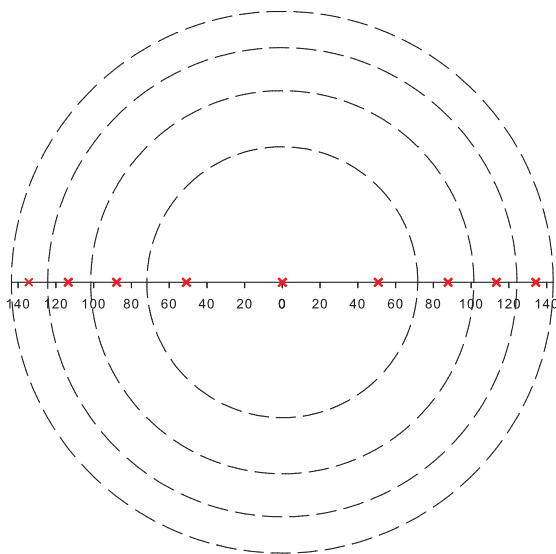
- [1] Statistisk sentralbyrå, Energi. Tabeller og figurer [online] Tilgjengelig på: <http://www.ssb.no/energi/> [konferert 11. juni 2008].
- [2] Meteorologisk institutt, eKlima klimadatabase [online] Tilgjengelig på <http://eklima.met.no> [konferert 10. april 2008].
- [3] LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd., Moody Friction Factor Calculator [online] Tilgjengelig på <http://www.lmnoeng.com/moody.htm> [konferert 29. mai 2008].
- [4] Danish Environmental Protection Agency. Environmental impact of packaging materials. Appendix 3, August 2001. [online] <http://glwww.mst.dk/waste/Pack-App3ProductSystems.htm> [Konferert: 10.04.2008].
- [5] Paul Berdahl Arild Gustavsen. Spectral emissivity of anodized aluminum and the thermal transmittance of aluminum window frames. *Nordic Journal of Building Physics*, 3, 2003.
- [6] Torunn Kvinge Bjørne Grimsrud. Har aluminiumsindustrien en framtid i norge? Technical report, Fafo, 2006.
- [7] David P. DeWitt Frank P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 5th edition, 2002.
- [8] Kai Grjotheim and Halvor Kvande, editors. *Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Héroult Process*. Aluminium-Verlag, 2nd edition, 1993.
- [9] SINTEF Institutt for dampteknikk og forbrenningsteknikk. Brukerveiledning for sintef støvmåleutstyr. 1985.
- [10] Olav Juliussen. Måling av mengde hallgass fra su-iii, sunndal verk. 2007. SINTEF Rapport.
- [11] Howard N. Shapiro Michael J. Moran. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc., 5th edition, 2006.
- [12] Erling Næss. *An Experimental Study of Heat Transfer and Pressure Drop in Serrated-Fin Tube Bundles and Investigation of Particulate Fouling in Waste Heat Recovery Heat Exchangers*. PhD thesis, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Mars 2007.

- [13] M. E. Crawford W.M. Kays. *Convective Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, Inc., 3rd edition, 1993.

A. Beregninger

A.1. Middelhastighet og hastighetsprofil

Middelhastigheten, V , ble regnet ut via volumstrøm. Volumstrøm $Q = V \cdot A$, hvor A er tverrsnittsarealet. Rørtverrsnittet ble delt opp i like store arealer tilsvarende antall målepunkter. Hvert målepunkt ligger i tyngdepunktet til hvert delareal som vist i figur A.1, og er valgt etter SINTEFs brukerveiledning for måleutstyr [9] som er basert på metoder gitt av Norsk Standard i NS 4861, NS 4862 og NS 4863. Det midterste målepunktet er ikke tatt med i beregningen av volumstrøm da [9] opererer med partall antall målepunkter.



Figur A.1.: Målepunkter for hastighets- og temperaturmålinger

De røde punktene illustrerer plasseringen av målepunktene for gassavsug. Antall mulige målepunkter for gassavsug var begrenset av tid. En pitotrørstraversering går i motsetning relativt kjapp. Det ble derfor lagt til ekstra målepunkter for bestemmelse av temperatur og hastighetsprofil.

A.2. Elektrolysecellens geometri, fysisk og matematisk modell

Foruten dimensjonene til elektrolysecellens totale lengde og bredde ble det ikke gitt studenten tilgang til informasjon om elektrolysecellenes eksakte geometri. Alle resterende geometriske betraktninger er derfor basert på egne oppmålinger av de termodynamisk sett viktigste overflatene av cellen. Disse oppmålingene ble gjort for hånd med målestokk og vil dermed avvike noe fra eksakte dimensjoner. Elektrolysecellens lengde og bredde ble oppgitt til å være henholdsvis 12 010 og 4 080 millimeter. Tilsammenligning ble elektrolysecellens lengde målt til 12 040 millimeter og cellens bredde til 4 226 millimeter. Dette gir feilmålinger på henholdsvis 0,2% og 3,6%.

Elektrolysecellens geometri ble delt opp i to hovedområder som grunnlag for beregning av varmetapet fra cellen: elektrolysekjeller og celletopp. Hver av disse ble igjen delt opp i delområder som nærmere beskrevet nedenfor. Et sett med grove skisser av de forskjellige delgeometriene ble tegnet ned for hånd og brukt som grunnlag for videre beregninger.

A.2.1. Elektrolysekjeller

Undersiden av elektrolysecellen, den delen som ligger i elektrolysehallkjelleren, ble delt opp i fire hoveddeler: cellebunn, kortsider, langsider og hjørner.

A.2.1.1. Hjørner

Figur A.2 viser en skisse av elektrolysecellens hjørner i kjelleren. Arealene A_3 , A_4 og A_8 utgjør av hjørnet av selve elektrolysecellen, mens arealene A_1 og A_2 utgjør enden på en av tyve tverrgående bærebjelker langs langsiden av elektrolysecellen. Areal A_9 representerer en av ni kjøleribber som stikker ut på hver kortside. Alle mål er gitt i millimeter.

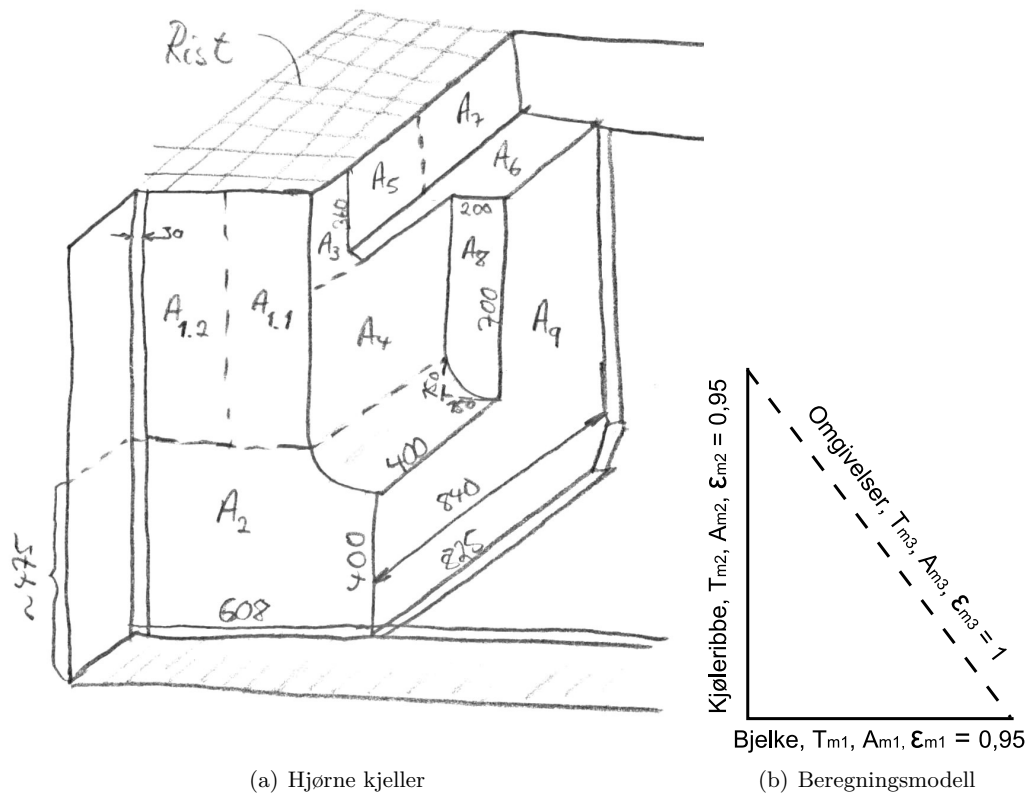
Fysisk modell Strålingstapet fra cellehjørnene ble beregnet med utgangspunktet i modellen skissert i figur A.2b, hvor beregningsflate A_{m1} (omfatter arealene $A_{1.1}$, $A_{1.2}$, A_2 og A_8 skissert i figur A.2a) og beregningsflate A_{m2} (omfatter arealene A_3 , A_4 , A_5 , A_7 og A_9) stråler til omgivelsene som i figur A.2b er representert ved flaten A_{m3} .

Varmetap via frikonveksjon ble beregnet ut fra samme modell, over flatene A_{m1} og A_{m2} som gitt ovenfor og karakteristisk lengde lik $L = 1390\text{mm}$ (gitt i figur A.3a).

Matematisk modell Strålingstapet beregnes med formel 3.4 med antagelsen om at omgivelsene kan tilnærmes som et svart legeme, slik at $J_{m3} = E_{b,m3} = \sigma T_{m3}^4$. Formfaktor F_{12} er gitt av tabell 13.2 i [7], mens de resterende formfaktorene er beregnet med formlene 3.2 og 3.3.

A.2.1.2. Kortsider

Cellens kortsider i kjelleren består hver av 8 “moduler” hvorav én slik “modul” er skissert i figur A.3. Areal A_1 og A_4 utgjør en del av selve celleveggen, mens areal A_2 og A_3 representerer kjøleribbene.



Figur A.2.: Elektrollyscellens hjørne - kjeller [mm]

Fysisk modell Området som utgjør de 300 øverste millimetrene av kortsid-modulene er bygd opp som en kasse med 4 vegger og mulighet for gjennomstrømming av luft i vertikal retning. Oppvarmet luft vil strømme fra kjelleren opp gjennom det elliptiske hullet skissert i figur A.3a og videre ut i elektrolysehallen. I denne delen ble det kun regnet frikonveksjon over areal A_4 da det skraverte området i figur A.3a har en overflatetemperatur nær omgivelsestemperaturen, og det ikke lot seg gjøre å måle temperaturen på de to sideflatene. Med den lave temperaturen over det skraverte området ble også stråling til omgivelsene fra denne delen neglisjert.

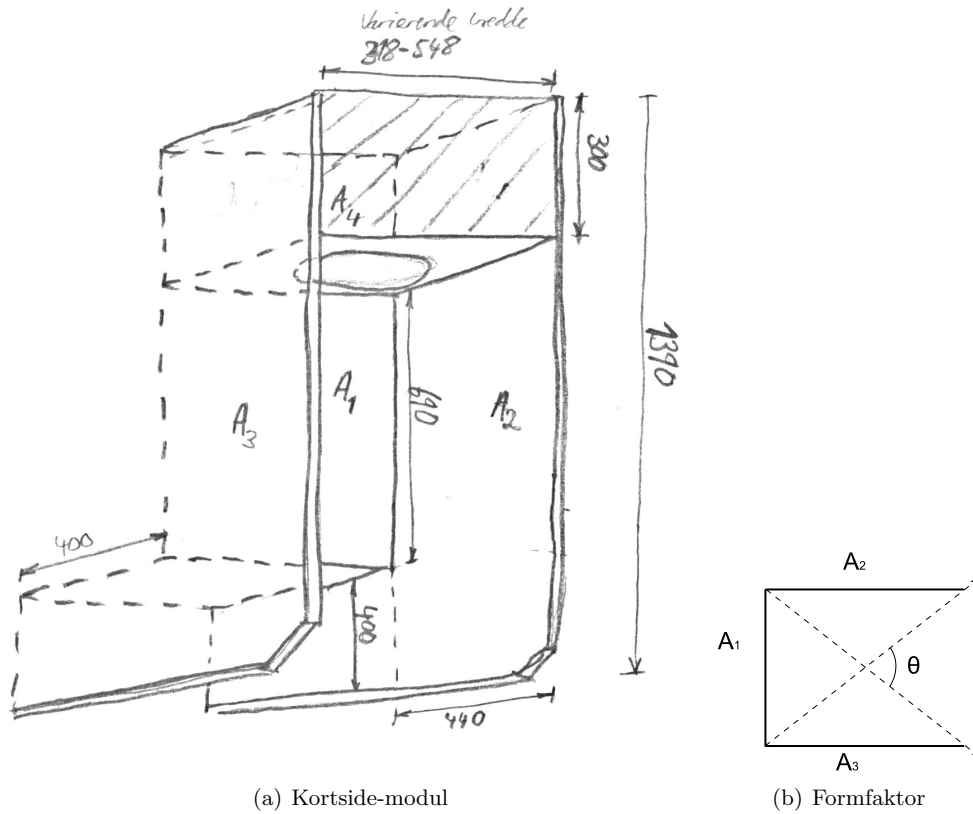
Videre ble det regnet frikonveksjon over flatene A_1 , A_2 og A_3 , samt stråling fra flate A_1 med formfaktor $F = \frac{\theta}{180^\circ}$, hvor θ er skissert i figur A.3b. Stråling fra flatene A_2 og A_3 til omgivelsene er neglisjert i beregningene på grunn av lave overflattemperaturer og liten formfaktor.

Matematisk modell Frikonveksjon ble beregnet etter formlene for frikonveksjon over vertikale flater. Med antagelse om at $A_{omgivelser} \rightarrow \infty$ og $0 < F_{12} < 1$ reduseres formel

3.4 til

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}}} \quad (\text{A.1})$$

hvor indeks 2 betegner omgivelser.



Figur A.3.: Elektrolysecellens kortside - kjeller [mm]

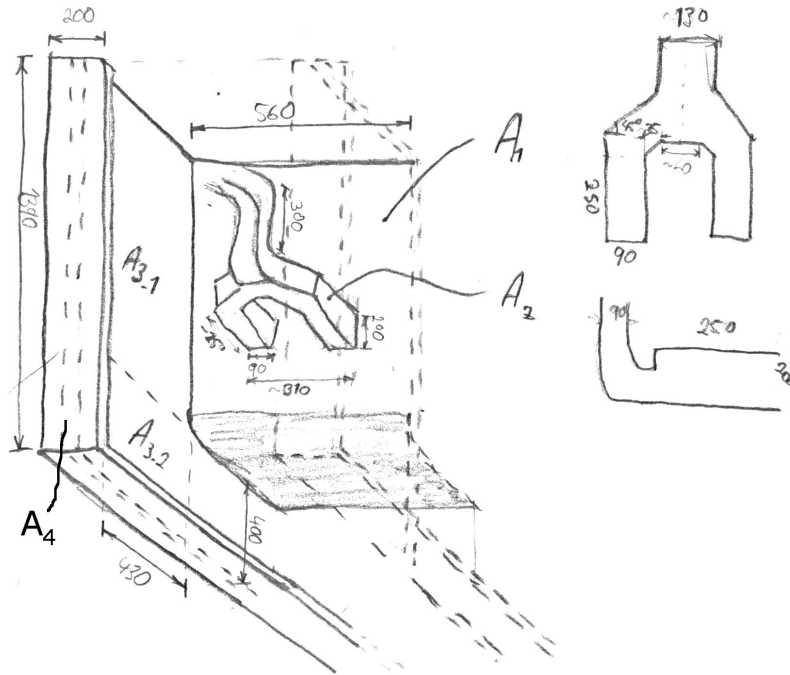
A.2.1.3. Langside

I kjelleren består hver langside av 19 “moduler” som skissert i figur A.4. Det er også 19 strømskinner på hver langside koblet til elektrolysecellens katode. Disse er representert ved areal A_2 , samt to skisser av henholdsvis strømskinnens side og underside i figur A.4. Arealene A_3 og A_1 representerer henholdsvis bjærebjelker og cellevegg.

Fysisk og matematisk modell Å sette opp en nøyaktig beregningsmodell for varmetapet fra denne relativt kompliserte geometrien ville være langt mer omfattende enn hva som kunne innlemmes i denne oppgaven. Siden elektrolysecellenes langsider ligger meget nært

hverandre (i underkant av 1 meter) er det antatt at disse stråler seg imellom og ikke til omgivelsene. Strålingstapet fra denne delen er derfor neglisjert. Det ble regnet frikonveksjon over flatene A_1 , A_3 og A_4 med formlene 3.8 til 3.10.

Varmetapet ble beregnet modulvis og summert opp til totalt varmetap. 3 moduler på hver langside var utilgjengelig for måling. Varmetapet fra disse ble da beregnet som aritmetisk snitt av varmetapet fra nabomodulene.



Figur A.4.: Elektrolysens langsider - kjeller [mm]

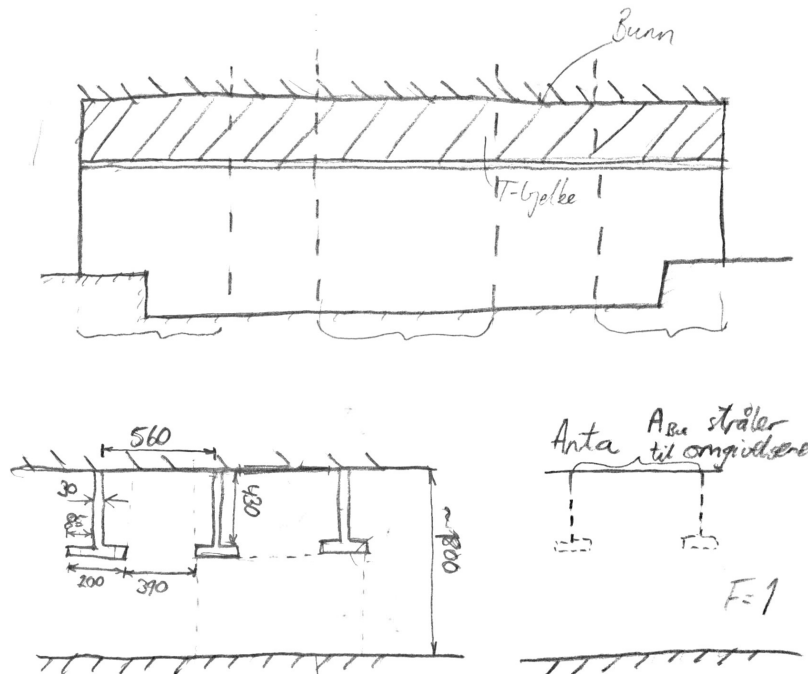
A.2.1.4. Bunn

I øverste og nederste del av figur A.5 finner man igjen bærebjolkene sett henholdsvis fra cellens kortsida og cellens langside.

Datainnsamling Det ble tatt termobilder av elektrolysecellebunnen for hver tredje strømskinne bortover langsiden av cellen. På traversen ble det tatt termobilder midt på og ute på sidene.

Fysisk og matematisk modell Varmetap ved frikonveksjon ble neglisjert. For beregning av varmetap ved stråling gjordes antagelsen at hele bunnarealet til elektrolyscellen stråler til omgivelsene, som her er kjellergulvet av betong ved $T_{omg} = 50^{\circ}\text{C}$, med en formfaktor lik 1. Bærebjolkenes innvirkning på varmestrålingen neglisjeres altså.

Formel 3.7 ble anvendt ved beregningene. Totalt varmetap ble regnet ut fra en gjennomsnittlig varmefluks over hele bunnarealet.



Figur A.5.: Elektrolysecellens bunn [mm]

A.2.2. Elektrolysecellens toppdel

Elektrolysecellens øvre del ble delt opp i kortsider, langsider og celletopp.

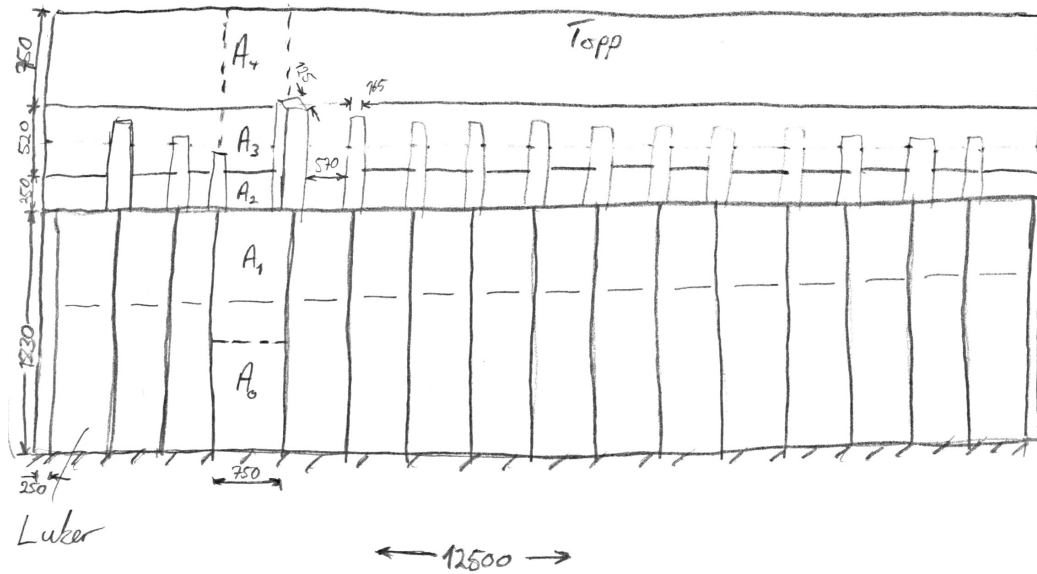
A.2.2.1. Langsider

Hver elektrolysecelle i SU4 har 15 anoder og 16 luker på hver langsider. Cellens luker ble fotografert med termokameraet i to vendinger, og er i figur A.6 representert ved arealene A_0 og A_1 . Arealene $A_2 - A_4$ er vertikale, hvor A_3 er en bevegelig bom med klemmer som holder fast anodene, og A_4 er en kanal hvor røykgassen samles og strømmer ut av elektrolysecellen.

Datainnsamling Det ble tatt termobilder av hver fjerde luke.

Fysisk modell Frikonveksjon ble beregnet for cellelukene som skjeve flater og arealene $A_2 - A_4$ som samlede vertikale flater etter formlene gitt i avsnitt 3.5.2. Ved beregning av strålingstapet ble det antatt at hele langsiden stråler som én enhet til omgivelsene. En gjennomsnittlig strålingsfluks ble beregnet for hele langsiden og ganget opp med

totalarealet for å finne varmetapet via stråling ved bruk av formel 3.7. Figur A.7 viser 3 termobilder satt sammen, og viser fra bunnen av og opp i figur A.6 arealene $A_0 - A_4$.



Figur A.6.: Elektrolysecellens langside - toppdel [mm]

A.2.2.2. Kortsider

Kortsidene av elektrolysecelledekselet er vist i figur A.8. Emissiviteten ble målt til 0,95 og 0,77 på henholdsvis stolpene (areal A_4) og de resterende arealer.

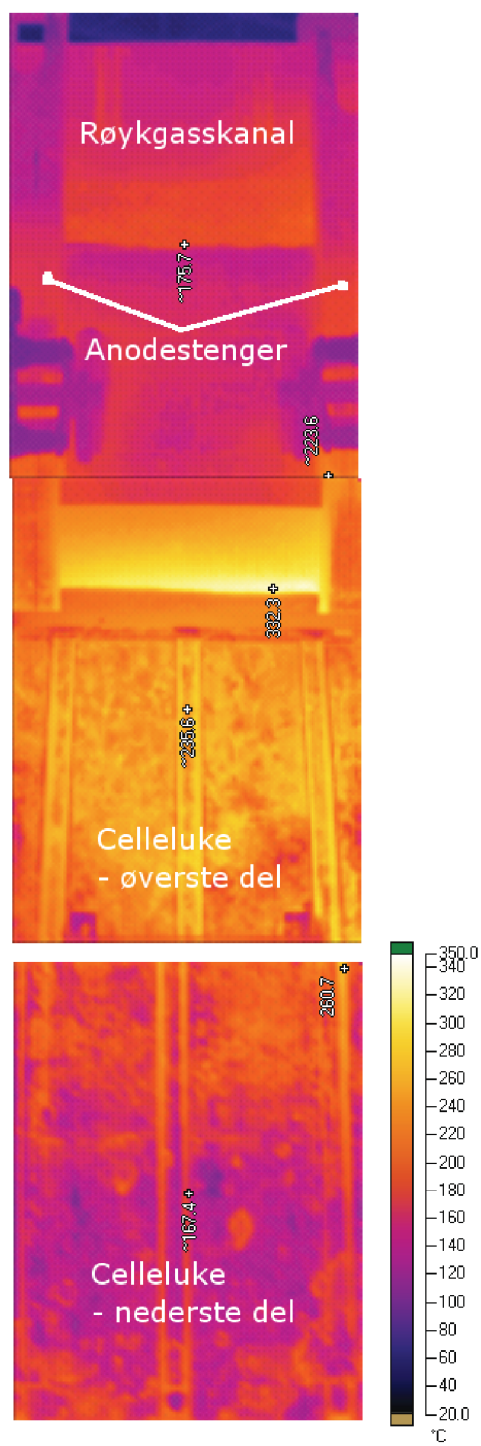
Fysisk og matematisk modell For både beregninger av frikonveksjon og stråling ble hver kortside beregnet som komplette overflater. Stråling ble beregnet etter formel 3.7, mens frikonveksjon ble beregnet som beskrevet i avsnitt 3.5.2 for en vertikal flate.

Figur A.9 viser 6 termobilder satt sammen til ett termobilde av kortsiden mot midtgangen av SU4, fusjonert med et fotografi av en elektrolysecelle tilsvarende A004.

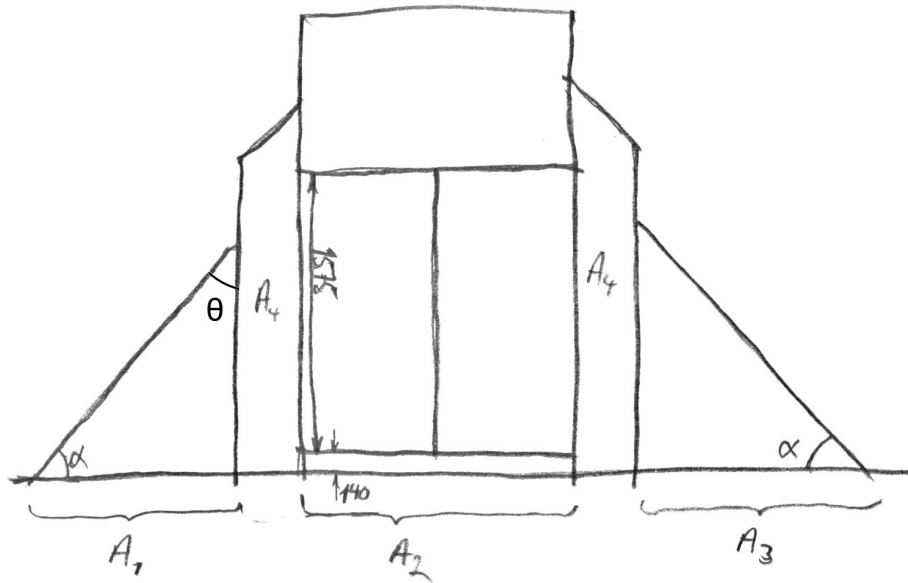
A.2.2.3. Celletopp

Celletoppen var utilgjengelig for målinger med termokamera. Varmetapet derfra ble da beregnet med antagelse om at overflatetemperaturen her er den samme som for siden av røykgasskanalen (areal A_4 i figur A.6).

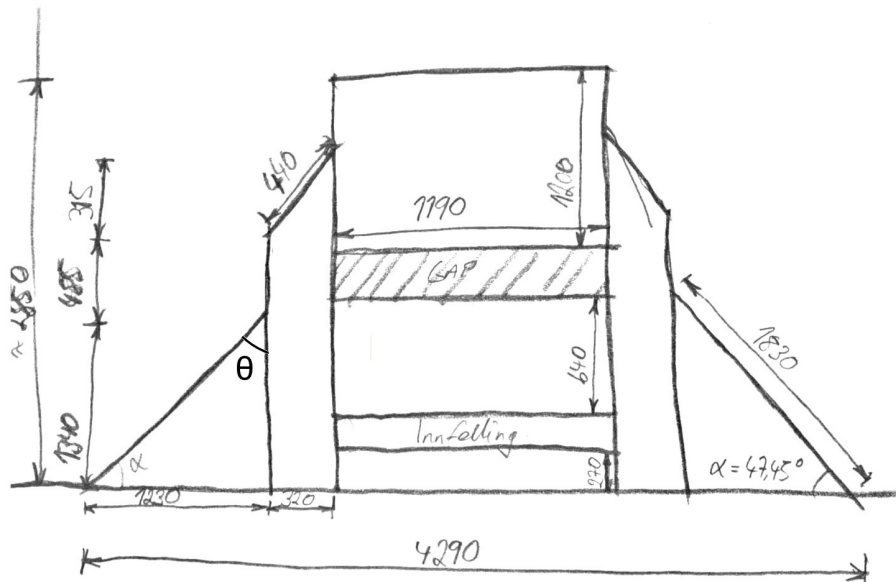
Fysisk og matematisk modell Stråling ble beregnet som ved de andre overflatene til elektrolyscellens toppdel, etter formel 3.7. Frikonveksjon ble beregnet som for en horisontal flate beskrevet i avsnitt 3.5.2.



Figur A.7.: Termobilde av celleluker og toppside

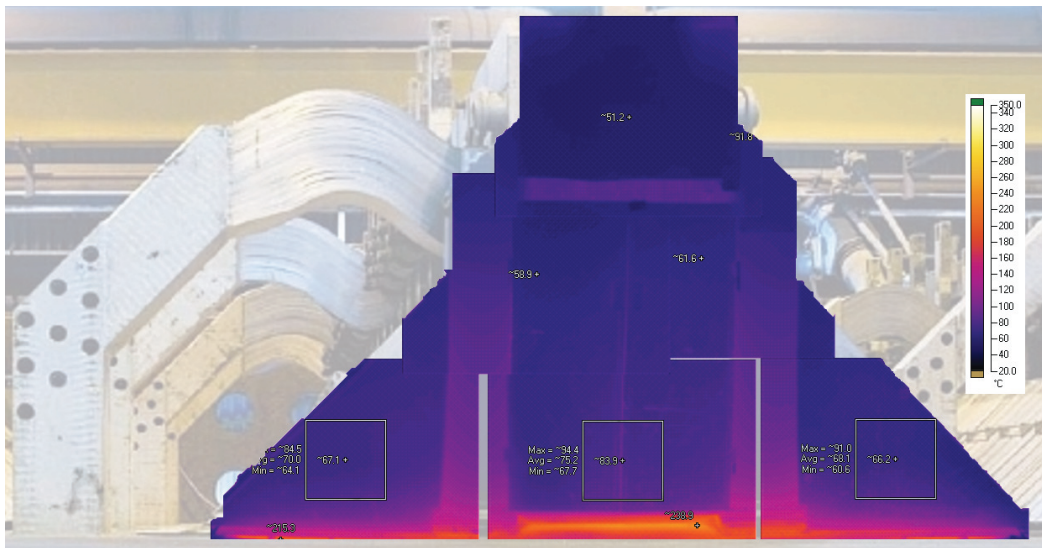


(a) Framside - mot midtgang SU4



(b) Bakside - mot yttervegg SU4

Figur A.8.: Elektrolysecellens overdel - kortside [mm]



Figur A.9.: Kortsid - termobilde med bakgrunn

B. Regneark, kildekode og innsamlede data

Alle innsamlede data, samt regneark og kildekode brukt i forbindelse med denne oppgaven ligger som vedlegg på CD-ROM da det ikke var fortjenelig å legge ved dette her.