



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

En studie av potensialet for utnyttelse av termoelektrisk energikonvertering på ULA-klassen

*Økt slagkraft til de norske ubåtene ved hjelp av termoelektrisitet*

av

Henrik Øyen

Bernhard Winther-Sørensen

Øystein Bang-Olsen

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I Maskinfag

Innlevert: Mai 2017

**Godkjent for offentlig publisering**

## Publiseringsavtale

### En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadettene har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadettenene har godkjent publisering.

Opgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Vi gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/>

## Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

**Dato: 24-05-2017**

HENRIK ØYEN

\_\_\_\_\_  
Kadett navn

\_\_\_\_\_  
Kadett, signatur

BERNHARD WINTHER-SØRENSEN

\_\_\_\_\_  
Kadett navn

\_\_\_\_\_  
Kadett, signatur

ØYSTEIN BANG-OLSEN

\_\_\_\_\_  
Kadett navn

\_\_\_\_\_  
Kadett, signatur

## Forord

Forfatterne av denne oppgaven er Henrik Øyen, Bernhard Winther-Sørensen og Øystein Bang-Olsen. Vi er tre personer som er ulike på mange måter som alder, bosted i barndomsårene og har ulike bakgrunn fra både skole og militært. Henrik Øyen er 29 år, oppvokst på Årnes med fagbrev som elektriker og har seilt ubåt som elektriker fra 2010-2014. Bernhard Winther-Sørensen er 25 år, oppvokst i Bergen der han gikk studiespesialisering før han tok befalsutdanning i heimevernet. Øystein Bang-Olsen er 24 år, oppvokst i Florø der han gikk studiespesialisering og tok befalsutdanning sin i Sjøforsvaret.

Når bacheloroppgave skulle velges på Sjøkrigsskolen på senhøsten 2016 var det en oppgave som skilte seg ut for alle tre, energikonvertering ved termoelektrisitet. Hva var nå det for noe? Det viste seg etter noen googlesøk at dette var meget spennende, mye fordi det var et nytt tema for oss. Siden veilederen som gav oss oppgaven jobber på Høyskolen på Vestlandet, og ikke i Forsvaret så er denne oppgaven primært konstruert som en skoleoppgave. Dog har vi vært i tett dialog med ubåt-våpenet og vi har selvsagt et lite håp om at denne oppgaven kan gi inspirasjon til tilsvarende prosjekter slik som denne studien.

Det har vært utrolig spennende og interessant å få muligheten til å studere et relativt nytt fenomen i samhandling med de norske ubåtene. Dog har det ikke vært mulig å gjennomføre denne oppgaven utenom hjelp utenfra og vi ønsker dermed å rette en stor takk til de.

**Ragnar Gjengedal** vår veileder og opphavskilde til denne oppgaven for god veiledning og rettleiding gjennom denne skriveprosessen.

**Espen Engebretsen og personell i ubåtbunker** som alltid har vært tilgjengelige og mottakelige for besøk, tegninger, spesifikasjoner og andre spørsmål.

**Torleif Tollefsen ved TEGma** som vi har hatt løpende mailkontakt med som både har besvart utallige spørsmål, men også evaluert oppgaven.

**Marit Skivenes** som har gjentatte ganger har korrekturlest og veiledet oss på hvordan en skal skrive en god oppgave.

**Faglærer Gisle Strand** som alltid er tilgjengelig for både små og store spørsmål.

## Oppgaveformulering

### Termoelektrisk energikonvertering til bruk i marinen

#### **Oppgave gitt av veileder:**

«Kadettene skal studere emnet for å kunne beskrive en mulig anvendelse ift å redusere IR-signatur samt gjenvinning av energi. Et forslag til løsning på eksosanlegget til ULA-klassen utformes og beskrives. Kadettene skal prøve å beregne virkningsgraden for et slikt anlegg og sammenligne det med andre teknologier som for eksempel stirlingmotor. Det er og ønskelig å få laget til en enkel prototype for demonstrasjon og måling.»

Formulert problemstilling:

Spørsmålet vi stiller i denne bacheloroppgaven er i hvilken grad det er mulig å utnytte energikonverteringsteknologien fra varmeenergi til elektrisk energi ved hjelp av et termoelektrisk materiale. Vi skal undersøke det eksisterende kjøleanlegget til eksosgassen fra en dieselmotor på forsvaret sine ubåter, og arbeider ut fra følgende problemstilling.

*Er det mulig å utnytte spillvarmen til eksisterende eksosanlegget ved hjelp av en termoelektrisk generator, og hvis så, er det gunstig for ULA-klassen?*

Denne problemstillingen tar først for seg spørsmålet om det faktisk er mulig å implementere en termoelektrisk generator (TEG) på det allerede eksisterende anlegget. Gitt at dette er mulig, så reises spørsmålet om installasjon av en termoelektrisk generator er gunstig. Dette skal vurderes etter aspektene strategisk kapasitet og kostnad, mot en optimal løsning for installasjonen. Dette gir gruppen grunnlag for å diskutere om installasjon av termoelektrisk-element om bord på ULA-klassen og fremtidige ubåter er gunstig.

# Sammendrag

Denne studien har undersøkt om det er mulig og om det er gunstig å utnytte spillvarmen til dieselgeneratoren på de norske ubåtene ULA-klassen ved hjelp av en termoelektrisk generator (TEG). Et termoelektrisk element konverterer elektrisk energi der det finnes en temperaturforskjell, og systemet har ingen bevegelige deler. Det påhengte sjøkjølevannsystem har som formål å redusere støy og termisk signatur og dermed oppstår det spillvarme. Siden termoelektrisitet ikke er pensum og ikke er en del av undervisningen på Sjøkrigsskolen, inneholder oppgaven en grundig utredelse om hva termoelektrisitet er. For å besvare problemstillingen er det først gjort utredelser om det er mulig å utnytte spillvarmen ved hjelp av termoelektrisitet. Deretter er det gjort utredelser for om det er gunstig med en slik installasjon. For å besvare om det er gunstig har vi først sett på en optimal løsning. Deretter er det evaluert etter to aspekter: kostnad og strategisk kapasitet.

Resultatene viste at ved en installasjon av en termoelektrisk generator så vil følgende skje: Termisk signatur øker med 34 °C, samt effektøkning på cirka 10kW. Effektøkningen bidrar til økt rekkevidde per tokt med 62 nautiske mil, og ved en snorkletid på 20 minutt kan en redusere snorkletiden med 11 sekunder. Det har ikke blitt laget en prototype for testing i denne oppgaven, det må derfor tas forbehold om feil i beregninger siden vi ikke har fått verifisert dem. Likevel mener vi at det gir en god indikasjon på hva som blir påvirket og hvordan det blir påvirket. Dette gjør det lettere for oss å konkludere med at det vi tror er riktig.

Ved å evaluere de to aspektene kostnad og strategisk kapasitet kom vi frem til at svaret på problemstillingen er at det *ikke* er gunstig med en termoelektrisk installasjon på den eksisterende varmeveksler. Grunnen til dette er fordi en installasjon ikke gir høy nok militær strategisk effekt. Snarere tvert imot er fordelene av installasjonen slik resultatene viser ubetydelige.

Oppgaven gir også en kort utredelse av mulighetene for en ny konfigurasjon av en varmeveksler på de fremtidige ubåtene. Disse resultatene viser at det er mulig å generere opp til 10 ganger så mye effekt som gir økt rekkevidde tilsvarende norskekysten per tokt, samtidig som snorkletiden reduseres med 1 minutt og 30 sekund, - i tillegg reduseres termisk signatur. Vi anbefaler derfor at det gjøres videre utredelser på potensiale for en mulig installasjon av en TEG på de nye norske ubåtene.

## Innhold

Forord .....	3
Oppgaveformulering .....	5
Sammendrag .....	6
Figurliste.....	10
Tabelliste .....	12
Formelliste.....	13
1. Innledning .....	15
1.1 Bakgrunn .....	15
1.2 Mål.....	16
1.3 Begrensninger .....	16
1.4 Struktur .....	16
2. Redegjørelse om Ubåtvåpenet og termoelektrisitet .....	17
2.1 Norske ubåter og operasjonsmønster.....	17
2.1.1 Forsvarets oppgaver og fellesoperative doktrine (FFOD). .....	17
2.1.2 Relevans og karakteristikkk til ubåtvåpenet .....	18
2.1.3 Ubåtoperasjoner: .....	19
2.1.4 Mulige fordeler fra en installasjon av en termoelektriske generator. ....	19
2.2 Termoelektrisitet.....	20
2.2.1 Termoelektriske egenskaper .....	20
2.2.2 Termoelektrisk generator: .....	21
2.2.3 Sammensetning og konstruksjon en termoelektrisk generator (TEG).....	22
3. Metode .....	25
3.1 Informasjonsinnhenting .....	26
3.1.1 Litteratursøk .....	26
3.1.2 Intervju og samtaler .....	28
3.1.3 Utfordringer med informasjonsinnhenting.....	29
3.2 Datainnsamling .....	29
3.2.1 Forsøk om bord på ULA-klassen .....	29
3.2.2 Solidworks .....	30
3.2.3 Beregninger:.....	30
3.3 Evaluering av oppgaven .....	35
3.3.1 Litteratursøk .....	35
3.3.2 Intervju .....	35
3.3.3 Forsøk .....	36
3.3.4 Beregninger.....	36

3.3.5 Konklusjon .....	38
4. Resultater .....	39
4.1 Eksosystem.....	40
4.1.1 Varmeveksling: .....	40
4.1.2 Lyddemping: .....	41
4.2 Varme .....	43
4.2.1 Temperatur: .....	43
4.2.2 Varmeledning: .....	44
4.2.3 Konveksjon: .....	48
4.2.5 Stråling:.....	50
4.2.6 Bevaring av energi .....	50
4.2.7 Samlet varmeoverføringskoeffisient (U) og varmeoverføringsevne (UA):.....	52
4.3 Grunnleggende om termoelektriske egenskaper og modulsammensetning: .....	58
4.3.1 Termoelektrisk egenskaper: .....	58
4.3.2 Produksjon, design og sammensetning av termoelektrisk element/modul .....	63
4.4 Utredning om termoelektrisk materiale .....	69
4.4.1 Skutteruditt.....	70
4.4.2 Vismut Tellur: .....	71
4.4.3 Tin Tellurid .....	73
4.4.4 Sammenligning av termoelektriske materialer .....	73
4.5 Forsøk gjennomført ombord på Ula-klassen. ....	74
4.5.1 Hensikt .....	74
4.5.2 Forberedelser: .....	74
4.5.3 Måleinstrument: .....	74
4.5.4 Gjennomføring:.....	74
4.5.5 Observasjoner .....	75
4.5.8 Diskusjon: .....	79
4.5.9 Konklusjon .....	80
4.6 Potensialet til eksisterende lyddemper ved bruk av en termoelektrisk generator.....	81
4.6.1 Dette vet vi: .....	82
4.6.2 Hva må vi finne:.....	82
4.6.3 Skisse: .....	82
4.6.4 Antakelser: .....	83
4.6.5 Data: .....	86
4.6.6 Analyse: .....	89
4.6.7 Resultater .....	96



4.6.8 Oppsummering av nøkkel funn.....	100
4.7 Utredning av mulig integrasjon på eksisterende lyddemper .....	102
4.7.1 Løsning en - Maskinere en 24-kant plate.....	103
4.7.2 Løsning to - Sliping av sylinder.....	107
4.7.3 Visuell konstruksjon tegnet i Solidworks. ....	107
4.7.4 Beregninger og resultater av mulig installasjon på eksisterende lyddemper.....	108
4.8 Utredning om alternativ varmeveksler konfigurasjon .....	119
4.9 Operativ betydning og kostnadsbesparelse.....	128
4.9.1 Bakgrunn.....	128
4.9.2 Fiktivt eksempelet på generatorytelse.....	128
4.9.3 Potensiale fremstilling .....	129
4.8.5 Konklusjon: Hvordan vil dette påvirke den strategiske kapasiteten til ubåten.....	131
5. Diskusjon .....	132
5.1 Er det mulig? .....	132
5.2 Er det gunstig på eksisterende varmeveksler.....	133
5.2.1 Optimal løsning for en installasjon av en TEG .....	133
5.2.2 Strategis kapasitet.....	134
5.3.2 Kostnad .....	135
5.2.4 Diskusjon .....	136
5.3 Veien videre.....	137
6. Konklusjon.....	139
7. Bibliografi .....	141
8. Vedlegg.....	145
Vedlegg A – Tekniske tegninger og bilder hentet fra vedlikeholds-rapport lyddemper ....	145
Vedlegg B Sertifikat til lyddemperen.....	148
Vedlegg C – Spesifikasjoner til TEP-series fra Thermonamic.....	150
TEP1-24156-2.4 Vismut Tellur .....	151
TELP1-12662-0.9 Bly Tin Tellur .....	158
Vedlegg D - Beregninger gjort i Excel .....	165
Vedlegg E - Solidworks.....	166
Vedlegg F - Rapport lyddemper .....	167
Vedlegg G - IR-kamera Fluke .....	168
Vedlegg H - Sertifikat sjøvannspumpe.....	169

## Figurliste

Figur 1 Illustrasjon av en enkel termoelektrisk generator .....	22
Figur 2 Serie og parallell kobling av flere termoelektriske moduler (Rowe; Min 1996, 354). .....	22
Figur 3 Smoke- Tube boiler og Water-tube boiler (Meier-Peter et.al 2009, 669). .....	40
Figur 4 Absorption silencer og Sound absorbing reflector (Meier-Peter et.al 2009, 669). .....	41
Figur 5 Kombinasjonslyddempere (Meier-Peter et.al 2009, 670). .....	42
Figur 6 Varmeledning gjennom en vegg eller flate .....	45
Figur 7 Varmeledning gjennom en sylindervegg .....	45
Figur 8 Sammensatte vegger i serie og parallell (Incropera; DeWitt 2002, 93). .....	46
Figur 9 Varmeledning gjennom en vegg av flere flater .....	47
Figur 10 Illustrasjon over konveksjon .....	48
Figur 11 Typiske installerte finner (Incropera; DeWitt 2002, 127) .....	49
Figur 12 Ulike type finner (Incropera; DeWitt 2002, 128). .....	50
Figur 13 Termisk resistans i serie gjennom en sammensatt plan vegg (Incropera; DeWitt 2002, 92)... ..	53
Figur 14 Termisk resistans i serie gjennom en sammensatt sylindrisk vegg (Incropera; DeWitt 2002, 106). .....	54
Figur 15 Kontakt resistans (Incropera; DeWitt 2002, 94) .....	56
Figur 16 Viser zT-verdien, Seebeck koeffisient, elektrisk og termisk konduktivitet som funksjon av konsentrasjon av ladningsbærere (Skomedal 2016, 16). .....	60
Figur 17 Krystall system <a href="http://www.smartway2study.com/2016_03_01_archive.html">http://www.smartway2study.com/2016_03_01_archive.html</a> .....	61
Figur 18 Illustrativt bilde av produksjonsprosessen til en termoelektrisk modul (Skomedal 2016, 17). .....	63
Figur 19 Termoelektrisk modul (Skomedal 2016, 11). .....	64
Figur 20 Grunnleggende byggeklosser til en termoelektrisk-modul (Skomedal 2016, 34). .....	65
Figur 21 Produksjonsprosess til et malbart termoelektriske-element (Park et.al 2016, 3). .....	68
Figur 22 Krystallstrukturen til Skutteruditt (Skomedal 2016, 23). .....	71
Figur 23 Krystallstruktur Vismut Tellur hentet fra <a href="https://www.researchgate.net/figure/45904785_fig1_Figure-1-Schematic-of-Bi-2-Te-3-crystal-structure-of-D-3d5-R-3m-space-group-showing">https://www.researchgate.net/figure/45904785_fig1_Figure-1-Schematic-of-Bi-2-Te-3-crystal-structure-of-D-3d5-R-3m-space-group-showing</a> .....	72
Figur 24 skisse av eksosanlegg .....	75
Figur 25 Massestrøm eksos med målepunkt 1 og 2 .....	76
Figur 26 Massestrøm sjøkjølevann målepunkt 1 og 2 .....	77
Figur 27 Lyddemper overflate .....	78
Figur 28 Overflate kjølevann ut av lyddemper .....	78
Figur 29 Eksosledning ut at lyddemper .....	78
Figur 30 Eksosklaff ytterkappe .....	79
Figur 31 Illustrasjonsskisse av eksisterende varmeveksler-lyddemper .....	83
Figur 32 Sylinder hentet fra wikipedia 03.04.2017 .....	84
Figur 33 Bilde av oppskjært eksisterende varmeveksler .....	84
Figur 34 Ringrom - wikipedia 15.04.2017 .....	84
Figur 35 Viser forskjell mellom strømningsbilde ved turbulent og laminær strømning (Incropera; DeWitt 2002, 336) .....	92
Figur 36 Hastighetsprofil i rør (Incropera; DeWitt 2002, 466). .....	92
Figur 37 Varmefordeling gjennom sylindrer skall .....	96
Figur 38 Sammenligning av hvordan varmeoverføringsevne er presentert grafisk. .....	97
Figur 39 Temperaturfordeling fra senter av eksosstrømmen .....	98
Figur 40 Grafisk fremstilling av usikkerheten til de teoretiske beregningene .....	98
Figur 41 Sammenligning av varmeoverføringskoeffisienten til saltvann og eksos ved Dittus-Boelter og Petukhov-metodene .....	100
Figur 42 Prinsippskisse av kontaktflate .....	102
Figur 43 Kjølevannsråbne til eksisterende lyddemper - rapport lyddemper .....	104
Figur 44 Spenningsrekke (Ashby 2014, 488). .....	106

Figur 45 Zinkanoder .....	106
Figur 46 Prinsipptegning av modul installasjon på eksisterende varmeveksler tegnet i Solidworks ..	107
Figur 47 Prinsipptegning av modul installasjon på eksisterende varmeveksler tegnet i Solidworks ..	107
Figur 48 Tegning fra solidworks av maskinert plate .....	107
Figur 49 Illustrasjonsskisse av eksisterende varmeveksler-lyddemper med tillegg av TEG .....	109
Figur 50 Geometrisk form av termoelektrisk element.....	113
Figur 51 Tegning av termoelektriske moduler i serie og parallell .....	114
Figur 52 Termoelektriske moduler i serie om eksisterende varmeveksler .....	114
Figur 53 Endring i opprinnelig varmeoverføringsevne ved installasjon av TEG-moduler .....	115
Figur 54 Temperatur ut av varmeveksler ved forskjellig dekningsgrad av TEG-moduler rundt sylind- er .....	116
Figur 55 Temperaturfordeling fra senter av eksosstrømmen gjennom sylindervegg ved tillegg av TEG .....	116
Figur 56 varmestrøm grunnet peltier og resistans opp mot varme eksos og saltvann .....	117
Figur 57 Kompakte varmevekslerer (Incropera; DeWitt 2002, 644). .....	120
Figur 58 Volum til rådighet.....	121
Figur 59 Kvadratisk 8x8 matrise sett forfra .....	124
Figur 60 Kvadratisk 8x8 matrise sett fra siden.....	125
Figur 61 Kvadratisk 8x8 matrise sett forfra med TEG .....	125
Figur 62 Temperaturfordeling over NY VV8x8 sammenlignet med eksisterende lyddemper.....	126
Figur 63 Fiktiv MTU-motor .....	129
Figur 64 Kart over norskekysten som illustrerer økt rekkevidde ved installasjon av TEG 1 og TEG 2. .....	137
Figur 65 Teknisktegning 1 hentet fra vedlikeholds-rapport av lyddemper .....	145
Figur 66 Teknisktegning 2, nærbilde av teknisk tegning 1 og presisert radius hentet fra vedlikeholds- hentet fra rapport av lyddemper .....	146
Figur 67 Teknisktegning 3, spesifikasjonsdata for lyddemper .....	147
Figur 68 Vismut Tellur modulinstallasjon side 1 .....	151
Figur 69 Vismut Tellur modulinstallasjon side 2 .....	152
Figur 70 Vismut Tellur modulinstallasjon side 3 .....	153
Figur 71 Vismut Tellur modulinstallasjon side 4 .....	154
Figur 72 Vismut Tellur modulinstallasjon side 5 .....	155
Figur 73 Vismut Tellur spesifikasjoner side 1 .....	156
Figur 74 Vismut Tellur spesifikasjoner side 2 .....	157
Figur 75 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 1 .....	158
Figur 76 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 2 .....	159
Figur 77 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 3 .....	160
Figur 78 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 5 .....	161
Figur 79 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 5 .....	162
Figur 80 Bly Tin Tellur spesifikasjoner side 1 .....	163
Figur 81 Bly Tin Tellur spesifikasjoner side 2 .....	164
Figur 82 Kalibreringssertifikat for Fluke .....	168
Figur 83 Sjøvannspumpe.....	169

## Tabelliste

Tabell 3-1 Spesifikt litteratursøk.....	26
Tabell 4-1 Typiske deler og dens egenskaper i en termoelektrisk modul (Skomedal 2016, 35).....	66
Tabell 4-2 Sammenligning av Vismut Tellur og Tin Tellur.....	73
Tabell 4-3 Måleinstrument for forsøket .....	74
Tabell 4-4 Temperaturoversikt BB-diesel testkjøring .....	77
Tabell 4-5 Maskinroms temperatur .....	77
Tabell 4-6 Temperaturfordeling over lyddemper .....	80
Tabell 4-7 Tekniskdata på lyddemper tatt fra Vedlegg A figur 65. ....	86
Tabell 4-8 Tekniskdata på lyddemper tatt fra prinsippskisse 2. ....	86
Tabell 4-9 Tekniskdata på lyddemper tatt fra vedlegg A figur 66. ....	87
Tabell 4-10 Verdier målt ved forsøk ombord på ULA-klassen.....	87
Tabell 4-11 Relevante data fra forsøket .....	87
Tabell 4-12 Verdier hentet fra tabell 4-11 avhengig av målt middeltemperatur ved 1 atm .....	88
Tabell 4-13 Funn av samlet varmeoverførings koeffisient.....	99
Tabell 4-14 Beregnet samlet varmeoverføringskoeffisient .....	99
Tabell 4-15 Sammenligning av Kobber og Titan legeringer.....	105
Tabell 4-16 Teknisk data ved installasjon av termoelektriske-element.....	110
Tabell 4-17 Termoelement spesifikasjoner fra Thermonamic .....	111
Tabell 4-18 Effekt og kostand av TEG over sylinder.....	117
Tabell 4-19 Total vekt til varmeveksler .....	120
Tabell 4-20 Varmeoverføingsareal pr. volum: .....	120
Tabell 4-21 Verdier til VV 8x8 .....	126
Tabell 4-22 En enkel kostnadsoversikt over materiellpris og effekt ut for VV 8x8.....	126
Tabell 4-23 Parameter til fiktiv historie .....	128
Tabell 4-24 Himoinsa HMW-915 T6 HEAVY RANGE Diesel Standard static.....	128
Tabell 4-25 Driftstid til fiktivt eksempel på MTU-generator.....	129
Tabell 4-26 Forbruk fiktiv diesel.....	129
Tabell 4-27 Forhåndstall .....	130
Tabell 4-28 Potensialet ved installasjon av TEG .....	130
Tabell 4-29 Totale kostander med installasjon av TEG .....	130
Tabell 4-30 Tokt kapasitet med og uten TEG .....	131
Tabell 4-31 kapasitet taktisk ladning med og uten TEG .....	131
Tabell 8-1 Viser sertifikatet til lyddemperen, hentet fra vedlikeholds-rapport av lyddemper .....	148

## Formelliste

Formel 2.1 Seebeck-koeffisienten .....	20
Formel 2.2 Peltierkoeffisienten. ....	21
Formel 2.3 Thomsonkoeffisienten.....	21
Formel 2.4 Ohms lov .....	23
Formel 2.5 Total spenning.....	23
Formel 2.6 Total strøm.....	23
Formel 2.7 Total effekt ut.....	23
Formel 2.8 Last resistans gitt likhet .....	23
Formel 4.1 Energooverføring ved varme .....	43
Formel 4.2 Varmeledning gjennom en vegg eller flate .....	44
Formel 4.3 Varmeledning gjennom en sylinder .....	45
Formel 4.4 Varmeledning gjennom en vegg av flere overflater.....	46
Formel 4.5 Varmeledning gjennom et termoelektrisk-modul .....	47
Formel 4.6 Energooverføring per tid.....	48
Formel 4.7 Energibalansen .....	51
Formel 4.8 Energooverføring for et åpent stasjonært system.....	52
Formel 4.9 Varmeoverføringskoeffisient for en sammensatt vegg .....	52
Formel 4.10 Varmeoverføringskoeffisienten plan vegg.....	53
Formel 4.11 Total termisk resistans .....	54
Formel 4.12 Samlet termisk konduktivitet .....	54
Formel 4.13 Varmeoverføringskoeffisient .....	54
Formel 4.14 Samlet varmeoverføringsevne til en sylinder.....	55
Formel 4.15 Varmeoverføringsevne til en sylinder med fouling factor. ....	55
Formel 4.16 Termoelektrisk overføringsevne. ....	58
Formel 4.17 Dimensjonsløs termoelektrisk overføringsevne.....	58
Formel 4.18 Seebeck-koeffisient formel nr.2.....	59
Formel 4.19 Elektrisk konduktivitet.....	59
Formel 4.20 Entalpibalansen for eksos. ....	89
Formel 4.21 Entalpibalansen for saltvann. ....	89
Formel 4.22 Varmeoverføring.....	89
Formel 4.23 Logaritmiskmiddeltemperatur.....	90
Formel 4.24 Overføringsevnen.....	90
Formel 4.25 Hydraulisk diameter for ringorm. ....	91
Formel 4.26 Hydraulisk diameter til sirkulært rør.....	91
Formel 4.27 Turbulent strømning.....	93
Formel 4.28 Reynoldstall for et konsentrisk rør.....	93
Formel 4.29 Gjennomsnittlige Nusselnummeret.....	93
Formel 4.30 Varmeoverføringskoeffisienten løst med Nusselnummeret.....	94
Formel 4.31 Dittus-Boelter ligning .....	94
Formel 4.32 Analyse av turbulent forhold. ....	94
Formel 4.33 Gjennomsnittlig Nusselnummeret - Petukhov ligning.....	94
Formel 4.34 Petukhov ligning er gyldig i henhold til forholdene. ....	95
Formel 4.35 Nusselnummeret ved turbulent strømning. ....	95
Formel 4.36 Total termisk resistans sammen med varmestrøm og grense temperatur. ....	95
Formel 4.37 Samlet varmeoverføringsevne til en sylinder.....	95
Formel 4.38 Temperaturfordeling gjennom sylinder .....	95
Formel 4.39 Varmeoverføringskoeffisient differanse .....	111
Formel 4.40 Total varmeoverføringskoeffisient.....	111
Formel 4.41 Maksimal varmeoverføringsevne.....	112
Formel 4.42 Maksimal overføringsevne multiplisert med effektivitetsfaktor.....	112
Formel 4.43 Funksjon av parameterne NTU og $Cr$ .....	112

Formel 4.44 NTU.....	112
Formel 4.45 $\epsilon$ fro varmeveksler der $C_r = 0$ .....	112
Formel 4.50 Mulige antall rader geometrisk utforming.....	123
Formel 4.51 Mellomrom mellom rader.....	123
Formel 4.52 Hydraulisk diameter.....	123
Formel 4.53 Forhåndstall.....	130

# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Forurensing i form av avgasser er et stort miljøproblem. Statsledere, organisasjoner og enkeltpersoner over hele verden jobber iherdig for å finne ulike løsninger for å begrense og redusere utslippene våre. Det forskes og arbeides med å finne og ta i bruk alternative energikilder, og helst fornybare energikilder. For det er dessverre slik i dag at de mest brukte energikildene - olje, gass og kull - som avgir mest avgasser.

Denne avgassen er varm, og derfor sies det at rundt halvparten av all energien som produseres går tapt i form av spillvarme. Dette øker interessen for å undersøke mulighetene for å utnytte spillvarme på en bedre måte, slik at mer energi kan konverteres fra samme mengde og dermed redusere produksjonen og da også avgassene.

Et termoelektrisk-materiale er et interessant fenomen å undersøke i en slik kontekst, fordi det kan utnytte varmen til å produsere elektrisk energi ved hjelp av temperaturdifferansen som oppstår. Det kan være av interesse for ubåtvåpenet - hvis det er mulig å kombinere en slik teknologi til å øke slagkraften og den strategiske kapasiteten til en norsk konvensjonell ubåt.

Dette kan være gunstig for ubåtene av tre årsaker:

For det første så blir temperaturen på eksosen allerede kjølt ved hjelp av et kjølevannssystem ombord. Det vil si at ubåten allerede bruker energi på å kjøle eksosen, og hovedgrunnlaget for et godt termoelektrisk anlegg allerede ligger til grunne - en stabil temperaturdifferanse.

For det andre så er en konvensjonell ubåt avhengig av å være nær havoverflaten for å lade batteriene, og da er den mest eksponert for luft og overflatetrusler. Med andre ord, hvis en kunne reduserte overflateeksponeringen ved kortere ladetid, ville dette vært gunstig for ubåtene.

For det tredje, hvis en kan utnytte mer av energien kan drivstofforbruket reduseres, noe som vil legge til rette for økt rekkevidde og reduksjon av kostnader. Derfor skal denne oppgaven utrede om en termoelektrisk-generator kan gjøre ubåtene mer slagkraftige gjennom kortere eksponeringstid ved havoverflaten, øke utholdenheten og gjøre dem mer kostnadseffektive, som resulterer i å styrke den strategiske kapasiteten.

## 1.2 Mål

*«Bacheloroppgaven skal gi offiserene anledning til å anvende kunnskaper og ferdigheter de har tilegnet seg ved bransjeutdanningen ved Sjøkrigsskolen. Oppgaven skal gi erfaring i å arbeide med en problemorientert oppgave. Den skal gi øvelse i å gjennomføre et større arbeid alene eller i gruppe. Den skal gi offiseren tid til fordypning og trening i å løse teoretiske, eksperimentelle eller praktiske problemstillinger (emneplan for bacheloroppgave 2013, 1)».*

Vi har for denne oppgaven satt oss tre del-mål:

- 1) At ved innlevering av oppgaven skal vi sitte igjen med en god faglig forståelse for termoelektrisitet og de aspekter rundt det.
- 2) Studien skal være relevant for ubåtvåpenet.
- 3) At gjennom oppgaven vil vi lære om prosjektarbeid som inkluderer samarbeid i form av en gruppe, i tillegg til oppgaveskriving.

## 1.3 Begrensninger

Dette er i hovedsak en teoretisk oppgave. Den vil ikke ta for seg bygging av prototype og vil kun gjøre en kort utredning angående teknisk installasjon. Teori, målinger og verdier vil bli hentet fra forskningsartikler og annen relevant litteratur, tilgjengelige termoelektriske materialer som kan kjøpes kommersielt samt egne målinger gjennom forsøk og oppgitte verdier fra ubåtvåpenet, i tillegg til informasjon fra møter med næringslivet. Et forsøk er gjennomført under oppkjøring av en dieselmotor i den hensikt å få målt flere verdier og hyppigere enn normalt. Til litteratursøket er hovedsakelig den vitenskapelige portalen ScienceDirect benyttet.

## 1.4 Struktur

Oppgaven starter med bakgrunnsinformasjon om norske ubåter og operasjonsmønster, for deretter å forklare grunnleggende hva fenomenet termoelektrisitet er. Metodedelen er oppfølgeren som forteller hvordan oppgaven er blitt løst. Med det overnevnte som en grunnmur vil oppgaven fremlegge resultatene av informasjonsinnhenting og beregningene som er blitt gjennomført. Til slutt vil oppgaven svare på problemstillingen gjennom å vurdere de to aspektene strategisk kapasitet og kostnad, mot en optimal løsning for en installasjon.



## 2. Redegjørelse om Ubåtvåpenet og termoelektrisitet

I dette kapitlet presenteres basisinformasjon om ubåten sin militærstrategiske betydning og grunnleggende teori om hvordan termoelektrisk energikonvertering fungerer. Vi begynner med å vise hvorfor en slik installasjon kan være av betydning for ubåtene i lys av operasjonsmønstre og strategisk kapasitet. Deretter en grunnleggende innføring om termoelektrisitet, og en teknisk forståelse av funksjon og beregning.

### 2.1 Norske ubåter og operasjonsmønstre

Potensialet av en TEG installasjon hos de norske ubåtene vil reflekteres gjennom hvordan en slik installasjon kan påvirke nåværende operasjonsmønstre.

Derfor skal dette delkapitlet gi et kort innblikk i hva Forsvaret sine oppgaver. For å forklare dette tar det for seg: den militære doktrine, relevansen av å ha en ubåtflåte i Norge og dens karakteristikk, samt operasjonsmønstre.

#### 2.1.1 Forsvarets oppgaver og fellesoperative doktriner (FFOD).

Forsvaret sin oppgave varierer ut i fra situasjonens tilstand - fred, krise eller væpnet konflikt – og igjen ut i fra hvilke voldsnivå, intensitet og omfang det er i situasjonene som oppstår og som krever forsvarets innsats. I langtidsplanen for Forsvaret beskrives en rekke oppgaver, og særskilt to av disse mener vi er relevante for oppgaven.

Oppgave 1: Utgjøre en krigsforebyggende terskel med basis i NATO-medlemskap. Hensikten er å avskrekke aktører fra å bruke militærmakt mot Norge.

Oppgave 2: Hevde norsk suverenitet og suverene rettigheter. Dette gjelder i norsk økonomisk sone. (FFOD 2014, 35).

Forsvaret bruker en såkalt fellesoperativ doktrine til å løse sine oppgaver. Formålet med doktrinen er å øke Forsvarets operative effektivitet i alle forsvarsgrener og på alle kommandonivåer. Doktrinen legger vekt på planlegging, gjennomføring og ledelse av fellesoperasjoner. Doktrinen beskriver også samhandling mellom politikk og sammenhengen mellom militære operasjoner og kommandonivå (FFOD 2014, 4). Sjødimensjonen utgjør operasjonsområdet for maritime styrker og spenner seg fra dypt vann og åpne hav til mer

avgrensede områder og kystnære områder, elver og strender. Sjødimensjonen er tredimensjonalt, den består av under vann, over vann og i luften. Sjødimensjonen karakteriseres av dens betydning som dominerende transportrute med tilstedeværelse av mange sivile aktører, og ressurstilgang. Internasjonalt farvann er å betrakte som allemannseie til store deler av jordkloden, og havbunnen benyttes også til strategisk viktig infrastruktur for energi og kommunikasjon (FFOD 2014, 20).

### 2.1.2 Relevans og karakteristik til ubåtvåpenet

Norge er en maritim og arktisk nasjon med globale og maritime interesser. Vårt velferdsgrunnlag og vår nasjonaløkonomi er stor grad knyttet til de maritime næringene. Som kyststat har Norge særlige rettigheter i og ansvar for store havområder. Opprettholdelse av regler for utøvelse av virksomhet knyttet til havet og havbunnen er viktig for Norge. Det er i nasjonens interesse å opprettholde og bidra til havenes frihet, og tilgang til havet som en transportvei (FDMO 2015, 3). Relevansen til en ubåt er at den kan operere skjult under vann over en lang tidsperiode og binder opp store ressurser hos en motstander for å søke etter dem. Norge har som andre kyststater innført økonomiske soner på 200 nautiske mil, i henhold til Havrettstraktaten fra 1982, som gir staten suveren rett til å utnytte ressursene i havet og på havbunnen.

I dag råder den norske stat over seks konvensjonelle (ikke atomdrevne) ubåter av Ula-klassen. En tradisjonell konvensjonell undervannsbåt sin fremdrift foregår med elektromotorer som blir drevet av blybatterier. Ubåten trenger dieselgeneratorer til å lade batteriene. Generatorene suger luft ned via luftrør/snorkelmast. Eksosen går ut under vann, for å unngå at ubåten blir oppdaget fra overflaten.

Undervannsbåter er sårbare på overflaten, og er mer eksponert når snorklemasten er over vann. Fly og helikoptre med radar kan oppdage slike master på lange avstander og utgjør den største trusselen mot en ubåt, selv om mastene er over vannflaten bare en kort stund. En konvensjonell ubåt har imidlertid begrenset tid til manøvrering under vann før den må lade batteriene. Batterienes kapasitet begrenser altså tid og fart under vann, dette fordi batteriene driver hoved elektromotoren om bord, som igjen driver propellen til ubåten (Lørdøen FFI, 6).

### 2.1.3 Ubåtoperasjoner:

Undervannsbåtens unike egenskap og styrke er at den kombinerer en meget potent antioverflatekapasitet med evnen til å operere skjult over lange avstander og i lengre perioder. Mot en overflatestyrke vil ubåten kunne utnytte fordelene av sensorer som gir vesentlig høyere deteksjonssannsynlighet (sannsynligheten for å oppdage/finne) og lengre deteksjonsavstander enn sin motstander. Dette er egenskaper som gjør at et lands operative, troverdige ubåtkapasitet – selv i et begrenset volum – gir en betydelig avskrekkende effekt, også overfor stater som i utgangspunktet har en overlegen maritim styrke. Ubåter gir oss på denne måten en reell og troverdig sjønektelseskapasitet<sup>1</sup> i hele vårt maritime interesseområde. De bidrar dermed også substansielt til at vi nasjonalt alene er i stand til å etablere en terskel mot en anvendelse av militærtvang – eller voldsmakt fra havet. Ubåtens kapasiteter kan også utnyttes til effektivt skjult informasjonsinnhenting, og til støtte for gjennomføring av spesialoperasjoner og representerer en unik militærstrategis ressurs - dog primært innrettet for nasjonal krisehåndtering i den del av konfliktskalaen som innbefatter statsaggresjon (FODM 2015, 174). De norske ubåtene av Ula-klassen har jevnlig blitt oppgradert de siste årene, og fremstår i dag fortsatt som potente, konvensjonelle undervannsbåter med god og demonstrert evne til å operere effektivt både til havs og langs kysten i norske og internasjonale farvann.

### 2.1.4 Mulige fordeler fra en installasjon av en termoelektriske generator.

Forsvaret bør alltid lete etter nye løsninger for å utvikle seg og øke slagkraften. For ubåtene er det to aspekter som en installasjon av en TEG muligens kan forbedre. Det første er kortere eksponeringstid og lengre tid under vann. En ubåt ønsker å minimere eksponeringstiden med master til et minimum. En måte å gjøre dette på er å gjøre snorkletiden (dieselkjøring ved ladning av batterier) så kortvarige og effektive som mulig. Det å kunne holde seg skjult fra fienden i en stridssituasjon vil være helt avgjørende for en ubåt. For det andre vil drivstoff være en faktor. For en undervannsbåt som opererer alene, ofte over lengre perioder, bak fiendens linjer, vil det være vanskelig å skaffe etterforsyninger. Med tanke på drivstoff, vil en operere så kostnadseffektivt som mulig for å kunne øke sin tilstedeværelse i et område. En undervannsbåt ønsker så lang utholdenhet som mulig og det å kunne operere skjult uten å etterfylle drivstoff. Da krig er kompleks, ønsker en også å være uavhengig av andre, hvis eksempelvis et logistikkskip skulle blitt senket av fienden.

---

<sup>1</sup> Sjønektelseskapasitet er å nekte noen tilgang/bruk av et havområde.

## 2.2 Termoelektrisitet

Termoelektrisitet har ikke blitt undervist i på Sjøkrigsskolen, og derfor har vi brukt mye tid på å sette oss inn i fenomenet. Omfanget av hva som blir utredet er større enn det som kreves for å besvare problemstillingen, dog er det et ukjent fenomen og derfor relevant å gi en grundig utredelse til leseren. Dette kapitlet er konstruert slik at en først skal forstå det grunnleggende om hvordan termoelektrisitet fungerer og hvordan en termoelektrisk generator er satt sammen.

### 2.2.1 Termoelektriske egenskaper

Termoelektrisk effekt er fenomenet som omhandler direkte omvandling fra varmeenergi til elektrisk energi uten bevegelige deler eller fluider, og omvendt. Man kan dele oppdagelsen bak fenomenet termoelektrisitet i tre: Peltier-, Thomson og Seebeckeffekten (Grøn 2009). For å forstå funksjonen til en termoelektrisk generator må man ha alle oppdagelsene i bagasjen.

#### 2.2.1.1 Seebeck-koeffisienten

Seebeck-koeffisienten omhandler fenomenet som oppstår når det oppstår en spenningsforskjell når et eller flere materialer kobles sammen og det er en temperaturforskjell mellom kontaktpunktene. Dette skjer fordi det danner seg en konsentrasjon av elektroner og dermed skapes det en potensialforskjell mellom et varmt og et kaldt punkt – potensialforskjell av elektroner er det samme som spenning (Grøn, 2009). Kjenner man temperaturforskjellen ( $dT$ ) og spenningsforskjellen ( $dV$ ) kan man regne ut Seebeck-koeffisienten ved formelen 2.1 (Skomedal 2016, 11):

$$\alpha = \frac{dV}{dT}$$

*Formel 2.1 Seebeck-koeffisienten*

#### 2.2.1.2 Peltiereffekten

Peltiereffekten omhandler fenomenet som oppstår ved å påføre elektrisk strøm i en lukket sløyfe med to forskjellige metaller eller halvledere. Da vil kontaktpunktet enten ta opp eller avgi energi, det vil si at punktet enten vil ta opp varme (kjøle) eller gi fra seg varme. Peltiereffekten kan derfor brukes ved kjøleelement. Dette skjer fordi ladningsbærerene - altså strømmen - som enten er ladet med et overskudd eller et underskudd av elektroner, går gjennom et potentialsprang. Et potentialsprang vil si en endring i ladningsbæreren sin sammensetning, og dermed må ladningen enten motta eller avgi elektroner som vil være det samme som å motta eller avgi energi – dess større sprang, dess større energi frigjørelse eller opptagelse. Skifter en strømrøtning vil punktet som tidligere ble kaldt bli varmt, og omvendt.

Det er viktig å merke seg at Peltiereffekten alltid vil bli etterfulgt av Joule varme - varme generert grunnet strømmen og resistansen i kretsen (Goldsmid 2016, 1).

Kjenner en varmestrømmen ( $\dot{Q}$ ) og den elektriske strømmen (I) kan en beregne Peltierkoeffisienten (Skomedal 2016, 11):

$$\Pi = \frac{\dot{Q}}{I}$$

*Formel 2.2 Peltierkoeffisienten.*

### 2.2.1.3 Thomsonkoeffisienten

Thomsonkoeffisienten omhandler fenomenet som oppstår når elektrisk strøm og varmestrøm beveger seg i samme retning. Da blir lederen varmere enn hvis de beveger seg motsatt retning. Dette skjer fordi strøm beveger seg fra en større konsentrasjon av elektroner til en lavere konsentrasjon av elektroner, og det samme gjør varmen. Derfor vil plassen med en lavere konsentrasjon av elektroner stjele flere elektroner, noe som resulterer i lavere temperatur og omvendt (Grøn 2009). Kjenner en temperaturforskjellen ( $dT$ ), spesifikk varmestrøm ( $\dot{q}$ ) og strømtetthet (J) kan man regne ut Thomsonkoeffisienten (Skomedal 2016, 11):

$$K_t = \frac{\dot{q}}{J * dT}$$

*Formel 2.3 Thomsonkoeffisienten.*

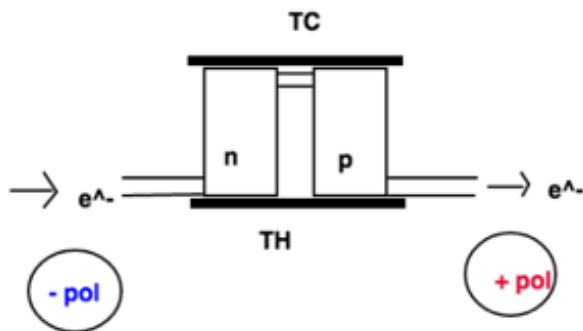
$$J: \text{strømtetthet} = \frac{\text{strømstyrken}}{\text{tversnittsarealet}} = \frac{I}{A}$$

### 2.2.2 Termoelektrisk generator:

For å forstå virkningen til en termoelektrisk generator kan en se for seg en enkel modell.

Modellen er og består av en n- og p-dopede halvleder koblet sammen elektrisk i serie og termisk i parallell som vist under på figur 1 - dette omtales ofte som et termoelektrisk par.

Ved temperaturdifferanse mellom varmside (TH) og kaldside (TC) oppstår det en spenning på grunn av Seebeck-effekten – slutter en kretsen vil det gå en elektrisk strøm (Grøn, 2009).

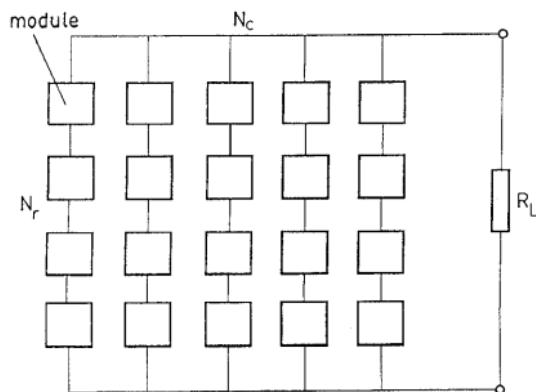


Figur 1 Illustrasjon av en enkel termoelektrisk generator

I prinsippet kunne et enkelt termoelektrisk par ha fremskaffet den effekten en ville ved å variere lengden på kryssarealet, men dette ville være upraktisk av flere årsaker. For det første fordi strømmen hadde blitt veldig stor og spenningen veldig lav (Goldsmid 2016, 197). For det andre grunnet materialtekniske forutsetninger – dette ser vi mer på ved fremstilling av termoelektrisk materiale del kapittelet 4.3.2. Derfor kobler en mange termoelektriske par i serie og parallell – et slikt arrangement kalles en termoelektrisk modul, og vi vil senere komme tilbake til oppbygningen av en termoelektrisk modul (Goldsmid 2016, 197).

### 2.2.3 Sammensetning og konstruksjon en termoelektrisk generator (TEG)

Ved bygging av en termoelektrisk generator setter en sammen termoelektriske moduler i serie og i parallell. Dette er kostnadmessig gunstig, fordi en kan produsere mange (Rowe; Min 1996, 353), og gunstig i forhold til vedlikehold og systemets redundans. Av den grunn bruker en mange moduler når en skal konstruere et stort system i serie og parallell. (Rowe; Min 1996, 353). Denne organiseringen er illustrert fra figur 2 (Rowe; Min 1996, 354).



Figur 2 Serie og parallell kobling av flere termoelektriske moduler (Rowe; Min 1996, 354).

For å gjøre beregninger på en termoelektrisk generator kan man tenke seg at den oppfører seg omtrent som en ideell spenningskilde med indre elektrisk resistans på grunn av materialet den består av. Spenningen over lasten kan derfor finnes ved den åpne kretsen ved ohms lov:

$$V = R * I$$

*Formel 2.4 Ohms lov*

En kan parallell og serie koble modulene etter eget ønske. I dette tilfelle vil følgende formler gjelde:

$$V_s = N_r V_m$$

*Formel 2.5 Total spenning*

$$I_s = N_c I_m$$

*Formel 2.6 Total strøm*

$$P_s = N_r N_s P$$

*Formel 2.7 Total effekt ut*

$$R_L = \frac{N_r}{N_c} R_m$$

*Formel 2.8 Last resistans gitt likhet*

$N_r/N_c$ : Antall rader/antall kolonner

$R_m$ : Middel modul resistans

$V_m$ : middel modul spenning

$I_m$ : middel modul elektrisk strøm

$P_s$ : total effekt ut

$n$ : Antall termoelektriske par

$A$ : Kryssningsareal/areal perpendikulært på varmestrøm

### *2.2.3.1 Maksimal effektoppnåelse:*

For å oppnå maksimal effekt av en krets bør det være likhet mellom kretsresistans ( $R_i$ ) og lastresistans ( $R_L$ ) – dette kan gjøres ved impedanstilpasning (Thermoelectrics, 13.04.2017). Impedanstilpasning er tilpasning mellom to elektriske magnetisk- eller akustiske medier fordi når en elektromagnetisk- eller akustiskbølge treffer en grenseflate med annen impedans vil deler av bølgen reflektere. Derfor vil en impedanstilpasning minimere slik refleksjoner og dermed minimere tap og gi størst effekt. En impedanstilpasning kan gjøres ved en impedans transformator (Grøn/Høgskolen i Oslo og Akershus, 2015). Hvor mange elementer en skal

bruke, hvor stort areal de skal dekke, hvor mange kolonner og hvor mange det skal være i serie kan velges ut i fra gjennomførbarhet og bekvemmelighet (Rowe; Min 1996, 354).



### 3. Metode

Dette kapitlet redegjør for hva vi har gjort og hvorfor vi har gjort det. Det vi ser på er informasjonsinnhenting, datainnsamling og evaluering av metodene. I forkant av oppgaven har vi ikke hatt undervisning i faget metodologi. Valg av metode er derfor basert på hva vi mener er naturlig for oppgaven, innspill fra veileder og læreboken *Research Methods for Business Students*.

Det eksisterer i hovedsak tre tilnærminger til utvikling av teori; deduktiv, induktiv og abduksjon (Saunders et. al 2016, 145). Etter gruppen sin bekjentskap finnes det ikke andre studier som ser på mulig utnyttelse av spillvarme i en sylinderformet varmeveksler ved hjelp av en termoelektrisk generator. Oppgaven baserer seg derfor på en litteraturstudie hvor vi må kombinerer ulike eksisterende teorier for å utvikle en ny modifisert teori. For å besvare problemstillingen mener vi det ikke er hensiktsmessig å basere seg bare på å gå fra teori til data (deduktiv), eller bra på å gå fra data til teori (induktiv), men snarere en kombinasjon av dette - altså abduksjon, der en kan bevege seg frem og tilbake mellom induktiv og deduktiv tilnærming (Saunders et. al 2016, 145, 148).

Med bakgrunn i en abduksjons tilnærming til teori og opparbeidet kunnskap om metodologi, er det for denne oppgaven valgt ut to metoder for informasjonsinnhenting: Litteratursøk og intervju, og to metoder for datainnsamling: forsøk om bord på ULA-klassen ubåt og tegneprogrammet Solidworks. Informasjonsinnhenting og datainnsamling gir grunnlag for beregningene som er gjort i denne oppgaven.

Oppgaven er avhengig av å finne relevant sekundærdata fra vitenskapelige artikler og bøker gjennom litteratursøk, ettersom vi ikke har mulighet til å samle inn primærdata gjennom testing av prototype.

Intervju er en effektiv metode for å samle inn presis og eksakt data på bakgrunn av spesifikke spørsmål. Dette har vi gjort med intervju av teknisk personell hos ubåtvåpenet og personell til bedriften TEGma i Oslo, som utvikler og designer termoelektriske materialer og moduler.

Vi gjennomførte et forsøk om bord på ULA-klassen under ladning av batteriene i den hensikt å kartlegge temperaturforløpet i lydtemperen.

Tegneprogrammet Solidworks er nyttet for å undersøke om det er fysisk mulig å installere en termoelektrisk generator, samtidig som det kan gi gode illustrasjonsbilder for en mulig installasjon.

### 3.1 Informasjonsinnhenting

#### 3.1.1 Litteratursøk

Vi fikk tips fra vår veileder som forespeilet fire databaser som er gode for litteratursøk:

*Scencedirect, Google Scholar, freepantens.com og Sciencevillage.*

Scencedirect ble besluttet som primærdatabasen som vi skulle bruke. Den inneholder millioner av vitenskapelige publiserte artikler med høy kvalitet, og- hele 38 784 artikler ble funnet som har en form for relevans til termoelektrisitet.

Det ble rådført med faglærere, veileder og bibliotekar om bøker og andre artikler som kunne være av relevans for oppgaven. Etterhvert hadde vi opparbeidet oss en forståelse for fenomenet termoelektrisitet. Etter perioden med generelle søk i den hensikt å skape en forståelse for hva termoelektrisitet er, ble det laget en søkestrategi for å finne relevant informasjon for denne oppgaven. Denne strategien er basert på å begrense søkeresultatene gjennom å bruke presis fagterminologi i artikkelens navn eller sammendrag. Måten det ble begrenset på var å lete etter artikler ved å bruke søkeordene på engelsk og i tittel, keywords og abstract i databasen ScienceDirect. På denne måten reduseres antall treff og øker relevansen for treffene. Søkehistorikken for dette arbeidet er presentert i tabell 3-1.

Tabell 3-1 Spesifikt litteratursøk

Tittel	Database	Kewwords	Antall treff	Kriteriet for valg	Funn
Thermoelectric	Scencedirect	-	38 911	Illustrasjon over artikler som har en form for relevans til termoelektrisitet	-

Thermoelectric materials	Sciencedirect	Begrenset til publisert i 2016.	2233	Denne inneholdt beskrivelse av geometriske begrensinger, hvordan en produserer termoelektriske element	Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices
Funnet i kildelisten til doktorgraden til Skomedal fordi den er brukt som referanse i kap 2.3.2.	Sciencedirect	-	-	Oppgaven trengte en grundigere beskrivelse på design teorien av termoelektriske moduler enn det doktorgraden beskrev, og den ble sett på som relevant for oppgaven etter nærmere undersøkelse	Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation
Thermoelectric	Sciencedirect	Introduction general properties	75	Funnene ble ansett som for abstrakt og avansert for etter det vi var ute etter.	
Introduction to Thermoelectricity	<a href="http://www.google.no">www.google.no</a>		77500	Siden litteraturen som vi fant på Sciencedirect og i relevante artikler var på labratoriestedet trengte vi en bok som gav en mer fundamental og grunnleggende forståelse for termoelektrisitet.	“Introduction to Thermoelectricity” av J. H. Goldsmid”.

Thermoelectric	Sciencedirect	Titel: “Waste heat recovery on submarine”	0	Det er altså ingen tilsvarende studie å finne på Sciencedirect	
Thermoelectric Shape	Google.com	Shape	4 360 000	Spennende artikkel om nyskapende teknologi innenfor termoelektrisitet.	High- performance shape- engineerable thermoelectric painting

### 3.1.2 Intervju og samtaler

I løpet av perioden vi har arbeidet med dette, har vi vært i kontakt med og gjennomført intervjuer med teknisk personell i ubåtvåpenet, bedriften TEGma, Størksen Rustfri Industri og faglærere på Sjøkrigsskolen. Dette gjorde vi for å finne dokumentasjoner, verdier eller lignende som er av relevans for oppgaven.

Den tekniske avdelingen til ubåt-våpenet er plassert i ubåtbunkeren på Laksevåg utenfor Bergen, hvor de norske ubåtene har sine vedlikeholdsperioder. På denne arbeidsplassen har vi hatt kontakt med Espen Engebretsen. Vi har hatt løpende kontakt med personell i ubåtbunkeren, både de i ledelsen og på verkstedet har gitt oss nødvendig dokumentasjon som tegninger og testmålinger som vi har brukt oppgaven. I tillegg har de alltid vært behjelpelige og i imøtekommende.

Vi ble introdusert av vår veileder til Torleif T. Tollefsen som har PhD i Applied Micro- and Nano system og er visepresident i teknologi hos TEGma. Denne bedriften driver med utvikling og design av termoelektrisk generatorer. Kommunikasjonen med Tollefsen har vært gjennom epost og et møte i Oslo 21 april 2017. Gjennom mailkontakten har det vært mulig å stille konkrete og spesifikke spørsmål som det har vært problematisk å finne svaret på gjennom litteratursøk. I forkant av møtet i Oslo sendte vi oppgaven til Tollefsen slik at han kunne forberede seg, og vi forberedte spørsmål på til intervjuet.

Vi har også vært i kontakt med Størksen Rustfritt Industri i Bergen og vår faglærer Gisle Strand har alltid stilt opp når vi har hatt spørsmål eller behov for veiledning.

### 3.1.3 utfordringer med informasjonsinnhenting.

I denne oppgaven har en utfordring for gruppen vært behandling av gradert materiale og informasjon. Det har hele tiden vært en avveining mellom ønsket å holde oppgaven åpen for alle (som kan gå på bekostning av relevant og viktig data) versus å få tilgang på og redegjøre for gradert materiale, samt spesifikasjoner på systemer som er gradert. Dette er da noe som naturligvis har styrt oppgaven og satt noen begrensinger. Likevel gjennom en god dialog med ubåtbunkeren, samt bruk av skjønn ved vurdering om det er gradert eller ikke gradert informasjon.

## 3.2 Datainnsamling

### 3.2.1 Forsøk om bord på ULA-klassen

Det var tre grunner til at vi gjennomførte dette forsøket:

1. For det første ville vi utforske og bli kjent med eksosanlegget; virkemåte og funksjonsprinsipper. Dette slik at vi kunne gjennomføre gode beregninger og fant ut hvor det var mulig å plassere en TEG.
2. For det andre ville vi undersøke temperatursløyfen til eksos og saltvann i og rundt dieselmotoren på Ula-klassen. Dette for å kunne gi et godt grunnlag for hvilke materialtyper vi skal velge, hvor mye potensiell energi som kan hentes ut. Samt undersøke om dette vil ha innvirkning på den termiskesignaturen – utgangstemperaturen til eksos på ubåten.
3. For det tredje ville vi prøve å kartlegge temperaturfordelingen inne og rundt lyddemperen ved hjelp av et IR-kamera Fluke.

Metoden for forsøket er i henhold til Sjøkrigsskolen sin laboratoriemal for forsøk.

Forsøket ble gjennomført i samråd med 1. elektriker om bord. Oppstart av BB-diesel ble utført etter normal oppstarts prosedyre og igangsetting av ladning med generator om bord.

Forsøket ble utført med Fluke, der vi så etter de ulike overflatetemperaturene.

Hvert 5 minutt ble det tatt et skjermbilde av verdiene på eksossystemet som vises i maskinkontroll. Verdiene og illustrasjon som vises er presentert i figur 24, 25 og 26 og

tabeller 4-3, 4-4, 4-5, og 4-6, er en redigert tegning av oss for å ikke bruke begrenset informasjon.

### 3.2.2 Solidworks

Våren 2014 og høsten 2016 har maskinklassen ved Sjøkrigsskole hatt i oppgave å konstruere en aksling og en kran i tegneprogrammet Solidworks. Siden vi hadde litt kjennskap til programmet, er Solidworks brukt som en metode i denne oppgaven. Primærhensikten med programmet var å undersøke om det var fysisk mulig å installere en termoelektrisk generator på eksisterende lyddemper ved å bruke målene fra dokumentasjon og tegninger gitt av ubåtvåpenet. Sekundærhensikten var å illustrere hvordan en mulig installasjon kunne vært konstruert. I arbeidet har vi fått gode råd og veiledning av faglærer Frode Wikne på Sjøkrigsskolen.

### 3.2.3 Beregninger:

Vi har i denne oppgaven gjort beregninger ved fire forskjellige tilfeller: Potensiale til lyddemperen, Utredning og mulig installasjon på eksisterende lyddemper, Utredning om alternativ varmeveksler konfigurasjon, og Operativ betydning og kostnadsbesparelse. Hvordan vi har tenkt og hva vi har gjort er litt forskjellig hos de respektive delene, så derfor kategoriseres vi de som nevnt.

#### 3.2.3.1 Potensiale til lyddemperen:

For å kunne gjøre gode beregninger på en systematisk måte brukte vi boken *Fundamentals of Mass and Heat Transfer*. Den lærte oss hvilke viktige faktorer som det er viktig å huske på, og i hvilke rekkefølge ting skulle gjøres.

Det første som måtte gjøres, var å finne ut av hvordan lyddemperen fungerte og hvilke dimensjoner denne hadde. Dette ble gjort ved hjelp av tekniske tegninger og diskusjon med teknisk personell i Ubåtvåpenet. Deretter brukte vi målingene gjort under forsøket på ubåten til å beregne hvor mye varme som faktisk ble overført fra gjennom lyddemperen. Dette gjorde vi ved å bruke varmekapasiteten, massestrømmen og temperaturdifferansen mellom utgang og inngang.

Deretter brukte vi varmen ført bort fra eksosen ( $\dot{Q}_{eksos}$ ) sammen med logaritmisk middeltemperatur for en medstrømsvarmeveksler til å beregne samlet varmeoverføringsevnen (UA) til lyddemperen. Hensikten med denne beregningen var å skape en "fasit" over hvor

mye varme lyddemperen overførte slik at dette kunne sammenlignes med de teoretiske beregningene våre av lyddemperen.

Det andre som ble gjort var å beregne den teoretisk samlede varmeoverføringskoeffisienten ( $U$ ) og samlet varmeoverføringsevnen ( $UA$ ) for ytre og indre eksoskammer. Beregningen ble gjort ut ifra eksempler og beskrivelser fra boken *Fundamentals of Mass and Heat Transfer*. Her vil vi presisere at ved utregningen av nusselnummeret ( $Nu$ ) har vi ikke skillett mellom inngangsseksjon og resten av eksosrøret. Denne forenklingen er gjort av to grunner. For det første fordi vi ikke hadde gode observasjoner eller grunnlag for å beskrive inngangsforhold. For det andre fordi den turbulente strømmingen er ganske stor og derfor vil forskjellen mellom inngangsseksjon og resten av røret ikke være så stor.

Data til beregningene ble hentet ut fra forsøket, maskindagbøker, intervju av teknisk personell og generelle data om dieselmotorer. Hensikten med dette var å danne et teoretisk grunnlag for beregning av den samlede varmeoverføringsevnen til ytre eksoskammer, slik at vi kunne spore endring mellom før og etter kledning med TEG-moduler.

Det tredje som ble gjort var å beregne temperaturfordelingen fra senter av eksos-strømmen og gjennom ytre eksosvegg. Dette for å utrede om endring av temperatur mellom senter av eksos-strømmen til hvor en mulig installasjon av termoelektriske moduler kunne plasseres. Det er her viktig å presisere at vi har brukt varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ) med et tillegg på 25% for saltvann - ellers ville vi fått et negativt svar. Dette mener vi er en grei tilnærming fordi vi jobber med mange usikkerheter, for å nevne to; faktisk temperatur ut av lyddemperen er usikker og faktisk masse strøm.

Det fjerde som ble gjort var å sammenligne samlet varmeoverføringskoeffisient ( $U$ ) som vi teoretisk beregnet mellom eksos og saltvann, med tilsvarende samlede varmeoverføringskoeffisienter funnet på internett og i boken (*Fundamentals of Mass and Heat Transfer*). Dette synliggjør en kvaliteten i de funn vi gjorde, og for å vite at vi ikke var helt på jordet.

### 3.2.3.2 Utredning og mulig installasjon på eksisterende lyddemper:

Vi har under dette delkapittelet sett på to faktorer: hvor mye effekt er det mulig å produsere av en installasjon av TEG-moduler på lyddemperen og hvordan påvirker dette utgangstemperaturen til lyddemperen.

For at det i det hele tatt skulle være noe poeng å gjøre beregninger på lyddemperen med integrasjon av TEG, måtte vi først stadfeste om det var plass til moduler på den. Dette ble gjort ved hjelp av tegneprogrammet *Solidworks*, og er behandlet i 4.7.3.

Det ble da også tatt en avgjørelse ut i fra gitte forutsetninger at det best egnede stedet å installere en TEG var å legge dem som en kappe rundt eksos sylindren. For da å kunne gjøre beregninger på varmeoverføringsevnen gjorde vi følgende: Først valgte vi at TEG-modulene med en tykkelse på 8 mm dekket hele sylindren, og dermed at konduktiviteten til hele dette laget hadde konduktiviteten til TEG-modulen. Dette mener vi er en god løsning av to grunner. For det er den første fordi en faktisk installasjon av TEG-moduler på varmeveksleren ville hatt en lavere resistans. Dette fordi vi ikke greier å dekke hele sylindren med moduler. For det andre vil bidraget fra Peltiereffekten være med på å øke varmeoverføringsevnen, noe som ikke er tatt hensyn til ved beregning av ny varmeoverføringsevne. Derfor tror vi beregningen vil gi en høyere resistans enn den faktiske. Det skal også presiseres at det er viktig å overestimere resistansen fordi vi ikke har tatt hensyn til kontakt resistansen i våre beregninger. Derfor konkluderer vi med at dette er en god løsning.

Deretter så vi på differansen i varmeoverføringsevne med og uten dekning av TEG. Denne differansen trakk vi deretter fra total varmeoverføringsevne som vi beregnet ut fra *Potensialet til lyddemperen*. Vi så dette som en hensiktsmessig måte å beregne endring på, fordi vi da kunne beregne endring rundt sylindren spesifikt, som faktisk var det eneste stedet vi gjorde en endring. Vi brukte deretter NTU-metoden for å beregne ny temperatur ut av lyddemperen og ny varme ledet vekk. Den er avhengig av varmekapasiteten og massestrømmen til fluidet sammen med varmeoverføringsevnen. Her er det viktig å påpeke at vi brukte samme varmekapasitet som tidligere for eksosen, selv om temperaturen endrer seg. Men vi tror ikke dette er vesentlig fordi endringen i varmekapasitet er liten, og forskjellen mellom varmekapasiteten og massestrømmen til saltvann og eksos er såpass stor at Cr fortsatt er tilnærmet lik null. Dette var derimot essensielt av to grunner. For det første for å vite hvilken middeltemperatur eksos strømmen hadde gjennom lyddemperen slik at vi kunne beregne



korrekt kontakttemperatur på TEG-modulen. For det andre for å se TEG-moduler sin påvirkning av eksos signaturen til fartøyet.

Når ny varme var ny varme og middeltemperatur for lyddemperen var stadfestet, kunne vi bruke disse parameterne til å beregne kontakttemperaturen. Vi tok i tillegg hensyn til varmen ført vekk gjennom indre eksoskammer, som beregnet i 4.6. Ut ifra dette beregnet vi kontakttemperaturen modulen ville oppleve ved middel og maks eksostemperatur (Vi satt makstemperatur på eksosen til samme makstemperatur som lyddemperen skal tåle i henhold til teknisktegning 3 vedlegg A).

Kontakttemperaturen ved middel eksostemperatur var viktig for valg i forhold til best mulig effekt, og maks temperatur var viktig i forhold til smeltepunkt og begrensning ved valg av modul. Det er her viktig å presisere to faktorer. For det første at det ikke er tatt hensyn til kontaktresistansen mellom modul og ytre eksoskammer men at det er behandlet som om det ikke er kontaktresistans. Det andre er at vi har brukt varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ) med et tillegg på 25% for saltvann, som vi utredet om i 4.6 *Potensialet til lyddemperen*.

Middel middeleksos-kontakttemperaturen og middelsaltvannstemperatur resulterte i en temperaturdifferanse. Denne temperaturdifferansen brukte vi til avlesning av grafer til leverandør av moduler. Vi leste av effekt, spenning, elektrisk strøm og resistans på en enkel modul. Avlesningen var for impedanslikhet mellom krets og last, noe som er viktig for høy virkningsgrad ved installasjon av TEG - det gjøres med en transformator. Det er ikke utredet noe om dette i denne oppgaven. Når avlesningen var gjort, beregnet vi total effekt, total strøm og total spenning til systemet ut i fra *Design theory for Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation* (Denne artikkelen ble valgt ut fra kildelisten til doktoravhandlingen til Skomedal). Vi valgte her å plassere modulene i serie rundt omkretsen og i parallell langs ved sylindren. Dette ble gjort fordi det virket naturlig og pga. redundans ved å ha mange serier i parallell. Ut ifra strømmen gjennom modulene, resistansen og Seebeckkoeffisient beregnet vi også generert varme fra termisk resistans og ekstra varmeoverføring på grunn av peltiereffekten. Det er her viktig å presisere at Seebeckkoeffisient til modulen er beregnet ut ifra spenning og temperaturdifferansen over modulen som vi har lest av fordi vi ikke har fått oppgitt Seebeckkoeffisient fra leverandøren selv etter gjentatte mailforsøk. Det er noen feilkilder som menneskelige avlesningsfeil og ukjente parameterne for hvordan leverandør har

beregnet spenning opp mot temperaturdifferanse. Derfor har vi ikke brukt peltiereffekt for beregning av utgangstemperatur.

#### 3.2.3.3 *Utredning om alternativ varmeveksler konfigurasjon:*

Hensikten med dette delkapittelet er at vi har oppdaget at varmeveksleren ikke er gunstig som varmeveksler i forhold til volumet den opptar, ei heller at det er mulig å ta ut mye effekt fra eksos strømmen på grunn av mulig dekningsarealet. Dette så vi ut fra beregningene under *Utredning og mulig installasjon på eksisterende lyddemper* og varmeveksler teori. Vi ønsket å se på potensialet til en alternativ konfigurasjon med samme volum kan:

- 1) Fjerne mer varme
- 2) Leverer mer effekt.

Med bakgrunn volumbegrensningen designet vi en varmeveksler som var kvadratisk på kortsiden og rektangulær på langsiden. Saltvannet skulle strømme i rør på innsiden og eksos rundt rørene, enten i kryss-strømning eller parallelt. Rørene på innsiden skulle ha bredde og høyde slik at vi lett kunne plassere TEG-moduler på alle sider. På beregningen av varmeoverføringsevnen og temperatur ut brukte vi igjen *Fundamentals of Mass and Heat Transfer*.

Ved beregning av den mulige effekten å hente fra en slik installasjon, brukte vi de samme parameterne som ved beregning under *Integrasjon av TEG på lyddemper*. Det eneste vi endret var mulig areal å kle TEG-moduler på. Vi gjorde dette valget fordi hovedpoenget var å vise at det var mulig å dekke et større areal med TEG ved det samme volumet og dermed produsere mer effekt. Vi tror dette er en god løsning fordi det er for mange ukjente faktorer som vi ikke har tatt hensyn til ved den nye varmevekslerkonfigurasjonen.

#### 3.2.3.4 *Operativ betydning og kostnadsbesparelse:*

Hensikten med dette delkapittelet er å vise innvirkningen effektutnyttelsen TEG kan ha for Ubåtvåpenet, uten å bruke gradert informasjon. Måten vi har løst det på er å finne informasjon med en tilsvarende MTU-diesel-generator på det sivile markedet. Vi har da sett på effekt fra generator og drivstofforbruk. Deretter har vi laget noen fiktive tall for taktisksnorkling, størrelse på drivstofftank, marsjfart og antall timer til ladning. Vi har deretter brukt forhåndstallet til å beregne hvor mye motoren sparer i drivstoff i løpet av et år, og hvor mye den kan spare i snorkletid. Dette er en enkel løsning, med mange forbehold som ikke nødvendigvis er korrekt, men illustrerer poenget.

### 3.3 Evaluering av oppgaven

Dette delkapittelet skal evaluere litteratursøket, intervjuene, forsøket og beregningene. Ved å evaluere de nevnte aspektene vil det også fremkomme generelle betraktninger om styrkene og svakhetene til oppgaven reflektert gjennom resultatene.

#### 3.3.1 Litteratursøk

En svakhet med litteratursøket er den menneskelige faktoren. Vi hadde et mangelfullt grunnlag for å vurdere hvilke artikler og informasjon som var korrekt og riktige. Dette ble løst ved å bruke de allerede nevnte anerkjente databasene slik at kildekritikken ble god. Selv om disse publiserte vitenskapelige artiklene blir ansett som å være både av høy kvalitet og troverdige, var vi kildekritiske i evalueringen av forskningen.

Som i en litteraturstudie så har mesteparten av datainnsamlingen vært fra vitenskapelige artikler og bøker - med andre ord sekundærdata. Grunnen til det er fordelaktig med sekundærdata, er at all data finnes allerede og en må bare finne dem, istedenfor å samle de inn selv som kan være veldig tidkrevende og omfattende (primærdata).

På en annen side så er ikke sekundærdata som finnes i vitenskapelige artikler og bøker spesifikt for denne oppgaven, noe som gjør det utfordrende å tolke informasjon og finne data som er relevant (Saunders et.al 2016, 335). For kvalitetssikring til denne tilnærmingen til teorien og datainnsamlingen ble det løst ved å bruke følgende metode: Lete etter artikler eller bøker som hadde like resultater og metoder som oss.

#### 3.3.2 Intervju

Intervjuene og samtalene gjennomført med faglærerne våre, teknisk personell i ubåtvåpenet og TEGma er brukt siden det var de vi hadde kjennskap og tilknytning til. Intervjuet er ikke gjennomført ved å bruke en intervjuguide, skrevet ordrett eller tatt på bånd. Det ble skrevet et referat fra møtene. I etterkant av møtene ble den innhentete informasjonen og referatet diskutert innad i gruppen for å oppnå en felles forståelse for informasjonsinnhenting.

Formålet med intervjuene har vært å innhente spesifikk nøkkelinformasjon som har vært utfordrende å finne andre steder. Nøkkelinformasjon har vært tegninger, datablad og dokumenter fra ubåtvåpenet og spørsmål om termoelektrisitet hos TEGma. Det er i hovedsak innhentet faktainformasjon, men det er også gitt innspill fra intervjuobjektet om andre aspekter som kunne undersøkes. Selv om det ikke ble brukt en intervjuguide, mener vi at det

ikke går på bekostning av kvaliteten av den innhentende informasjon siden vi fikk det oppgaven krevde. Ressursene og intervjuobjektene antas å være troverdige på grunn av bakgrunnen sin. Teknisk personell i ubåtvåpenet har ofte seilt ubåt for deretter å drive vedlikehold på dem og innehar på den måten mye erfaring og kunnskap. Tollefsen har PhD i Applied Micro- and Nano system og er visepresident i teknologi hos TEGma. Dokumentasjon, tegninger og verdier levert av teknisk personell hos ubåtvåpenet betegnes som meget troverdig på grunn de er originale.

### 3.3.3 Forsøk

For å beregne varmeoverføring til lyddemperen var det nødvendig å gjennomføre et forsøk på ubåten i den hensikt å kartlegge temperaturforløpet over lyddemperen.

For oppgaven var det nødvendig å oppnå en god forståelse av dieselmotoranlegget og fremskaffe gode målinger og verdier tilhørende lyddemperen. I samråd med 1.elektriker ombord fikk vi loggført det vi ønsket, og verifisert de med tidligere målinger som besetningen hadde notert i maskindagboken. På denne måten oppnådde vi pålitelige verdier som kunne brukes i videre beregninger.

Det er imidlertid to faktorer som henholdsvis svekker og styrker kvaliteten til målingene i forsøket.

To IR-målingene med Fluke instrumentet svekker validiteten, på grunn av to faktorer. Det første er at kalibreringen til Fluke ble utført i 2008. For det andre kan det være målefeil, fordi vi korrigerer ikke for emissiviteten til lyddemperen på IR-kameraet.

Det som styrker forsøket og de resultatene vi har brukt er målingene fra ubåten sitt dieselmotor-kontrollsystem på maskinkontrollpult. De ulike sensorene blir ved faste intervaller eller avvik kontrollert og kalibret. Det er dette systemet besetningen bruker i vanlig drift og antas derfor å være troverdige.

### 3.3.4 Beregninger

Beregningene for varmeoverføring er gjort etter anerkjente og etablerte metoder (ref. Gisle Strand). Det er ikke funnet noen studier på endring i eksostemperatur ut med en installasjon av en termoelektrisk generator, fordi dette er bare er en problemstilling for ubåter og ikke det sivile markedet.

#### *3.3.4.1 Faktorer som styrker beregningene*

Det som styrker beregningene våre er tre faktorer; den totale varmeoverføringskoeffisienten ligger innenfor det som virker normalt for gass-væske varmeveksling, at varmeoverføringskoeffisienten beregnet med to forskjellige metoder er relativt lik og beregning av effekt og termisk resistans er ikke komplisert.

For det første så finner vi at den totale varmeoverføringskoeffisienten som er beregnet ligger innenfor det som er normalt og en god indikasjon på at beregningene er korrekt. Dette spennet er riktignok ganske stort, men konklusjonen er at de generelle dataene ikke er så verst.

For det andre viser beregningene gjort med to forskjellige metoder at svarene er tilsvarende like, og det gir en indikasjon på at beregningene er korrekte.

For det tredje så er beregning av effekt og termisk resistans gjennom en termoelektrisk modul er ikke komplisert. Det gjør at så lenge korrekt temperatur er målt og termisk resistans er oppgitt virker det plausibelt.

#### *3.3.4.2 Faktorer som svekker beregningene*

Det er primært fem faktorer som svekker kvaliteten til resultatene våre; målte data og systemkunnskap, generelle data fra litteratursøk og beregningsusikkerhet, det er ikke bygget en prototype for testing og det er en 25% usikkerhet på hver av de beregnede varmeoverføringskoeffisientene.

For det første har den målte temperaturen over varmeveksleren fra forsøket ikke vært presis, men gjort med antakelse fordi det ikke har vært mulig å måle inn og utgangstemperatur for eksos og saltvann over lyddemperen. I tillegg har vi ikke kunnet måle størrelsen eller farten på massestrømmen til saltvannet og eksosen. Dette har ikke vært mulig fordi systemet har vært i drift. Derfor har vi måtte gjøre generelle antakelser basert på litteratur og fagpersonell sine anbefalinger. Det har vært vanskelig å finne informasjon om funksjon til systemet på ubtåene fordi mye av kunnskapen er forsvunnet ettersom anlegget er så gammelt. Alle disse parameterne er avgjørende i en varmeanalyse, og vi må derfor si at vi har arbeidet med ganske stor usikkerhet.

For det andre så har de generelle antakelsene og innhenting av data via litteratursøk for eksosgass og saltvann vært ufullstendige. Dette fordi temperaturene fra forsøket er usikre, fordi vi har beregnet med luft i stedet for eksos, og fordi saltvannsmålingene er hentet fra forskjellige kilder på nettet. Dette er også et usikkerhetsmoment som kunne blitt neglisjert med mer presise målinger slik at vi ikke trengte å hente usikre data, men hadde våre egne.

For det tredje ligger det en usikkerhet i beregningsmetoden vi bruker. Hver av varmeoverføringskoeffisientene har en 25% usikkerhet, noe som gir ganske store utslag når de legges sammen for å beregne den totale varmeoverføringskoeffisienten.

For det fjerde er det ikke funnet noen tilsvarende oppgaver eller studier som tar for seg endring i temperatur ved tillegg av termoelektrisk-moduler. Det gjør at vi ikke har noen gode holdepunkter for å kunne anta at varmeproduksjonen til en TEG er neglisjerbar.

For det femte har vi ikke kunnet gjøre et forsøk hvor vi faktisk har montert på termoelektrisk-moduler utenpå et eksosrør og sett virkningen. Dette ville styrket oppgaven vår betraktelig, og gitt oss en validering eller falsifisering av beregningsmetoden vår.

### 3.3.5 Konklusjon

Oppsummert så har kvaliteten til den innsamlede data påvirket usikkerhetene til resultatene.

Likevel gir beregningene og resultatene en indikasjon på hvordan varmeveksleren på lyddemperen fungerer og hvordan den blir påvirket ved en installasjon av en termoelektrisk generator. Det vil si at verdiene til resultatene kan anses som usikre, men indikasjonen de gir skaper en troverdighet og validitet til beregningene.

## 4. Resultater

Hensikten med dette kapitlet er tredelt. For det første skal det gi leseren en forståelse av hva måtte undersøke for å løse oppgaven og svare på problemstillingen. For det andre skal det forklare og utdype teori slik at leseren forstår hva vi har gjort. For det tredje skal det presentere resultatene som er gjort gjennom forsøk og beregninger.

Teori for å kunne besvare problemstillingen:

Med det som bakgrunn starter kapitlet med en grunnleggende gjennomgang av eksosanlegget om bord i ubåten. Dette for å utrede rundt systemet som en TEG skal installeres på, og hvordan systemet blir påvirket av en slik installasjon.

Deretter, fordi vi skriver en oppgave om energikonvertering fra varme til elektriske energi kommer det grunnleggende teoridel om varme, og hvordan en skal løse varmeoverføringproblemer. Det tredje delkapitlet vil omhandle termoelektrisk materiale: hva som definerer et godt termoelektrisk materiale, alternativer for termoelektriske, oppbyggingen av en termoelektrisk modul og ulike hensyn som må ta ved valg av termoelektrisk modul.

Beregninger og resultater for å kunne besvare problemstillingen:

Først presenteres forsøk gjennomført på ubåt, deretter en integrert TEG-løsning på det eksisterende systemet. Dette fordi en integrasjon på et allerede eksisterende og utprøvd system ofte er billigere og lettere å gjennomføre.

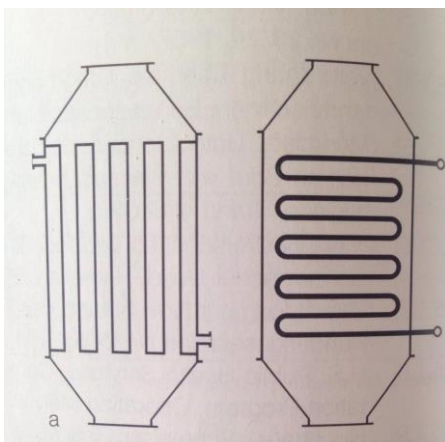
Deretter er det en utredelse på en mulig alternativ konfigurasjoner av en varmeveksler, fordi vi oppdaget at eksisterende lyddemper ikke var effektiv i forhold til varmeoverføring. I tillegg så vi lite effektpotensiale generert av TEG på eksisterende lyddemper. Til slutt vil vi presentere resultatene gjennom i lys av operativ betydning og kostnadsbesparelse.

## 4.1 Eksossystem

Hovedoppgaven til eksossystemet er å transportere eksos ut av fartøyet. Hvordan systemet ser ut er avhengig av hvilke oppgaver det skal utføre og hvilken type eksosgass det skal håndtere (Meier-Peter et.al 2009, 668). På ULA-klassen er det montert to diesel-generatorer med tilhørende eksosystem. Eksosgass fra en dieselmotor har en temperatur på rundt 380-400 °C, og at den kommer ut med en hastighet rundt 30 til 40 [m/s] (Meier-Peter et.al 2009, 668) og en relativ frekvens mellom 63 og 2300 [Hz] med nivåer mellom 100 og 125 dB (Meier-Peter et.al 2009, 670). Eksosystemet på ULA-klassen har primært to oppgaver, det skal redusere temperatur og lyd. Derfor skal vi først ta for oss generelt om varmevekslerer og typiske varmevekslerer på et eksosystem. Deretter vil vi ta for oss eksoslyddempere.

### 4.1.1 Varmeveksling:

En varmeveksler er en innretning som har til hensikt å overføre varme mellom fluider – fluidene kan enten gå i egne rør eller blandes. For at varmeoverføringen skal være god, bør væsken helst gå så raskt som mulig slik at det oppstår turbulent strømming (Pedersen 2009). Varmeveksler klassifiseres etter strømningsarrangement og type konstruksjon, og de finnes i alle mulige former og fasonger i forhold til hva som er hensiktsmessig (Incropera; DeWitt 2002, 642). Varmeveksleren som er montert på eksosystemet til ULA-klassen skal kjøle eksosgassen for å redusere termisksignatur. I det sivile markedet er det ikke vanlig å kjøle eksosgassen for å oppnå lavere signatur, men for å varme et annet fluid for å hente ut energi. Vi har rådført oss med fagpersonell sivilt og det er ikke normalt at skip kjøler ned eksosen, derfor er det ikke funnet tilsvarende varmeveksler som har til hensikt å kjøle eksosen, men prinsippet blir det likt. I boken *Marine Engineering* nevnes det to grunnleggende design alternativer av varmeveksler for å gjenvinne energi fra eksosgass: *smoke-tube boiler* (venstre) og *water-tube boiler* (høyre) som vist i figur 3.



Figur 3 Smoke- Tube boiler og Water-tube boiler (Meier-Peter et.al 2009, 669).

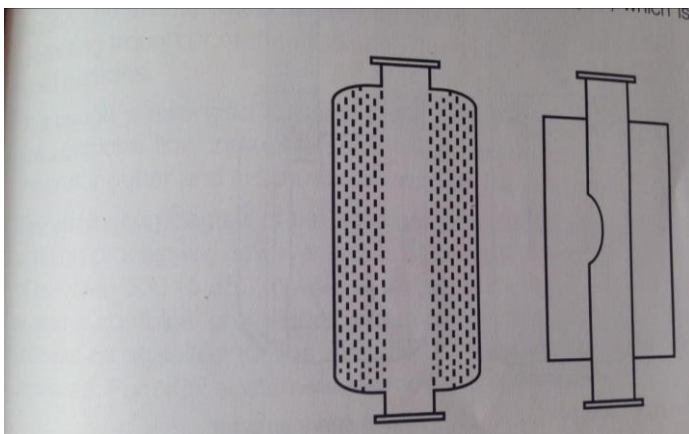


Ved en *smoke-tube boiler* beveger kjølemedier seg i rør som er vertikalt arrangert med kjølemediet eller energi-opphentingsmediet seg rundt rørene medstrøms. Fordelene med denne type design er at kjølemediet ikke trenger å være rent. Ulemper er at den veier mye - fordi den må ha et skall rundt seg som tåler høyt trykk, er vanskelig å justere og rengjøre. Denne er å foretrekke ved ukontrollert termisk oljeproduksjon med konstant strømning, det vil si *water-tube boiler* kjølemediet eller energi-opphentingsmediet i rør, mens eksosen strømmen rundt. Fordelene med dette designet er at vekten er lav, og det er muligheter for å kontrollere strømningen og variere varmeoverføringsoverflaten. Ulempene er at det kreves høy kvalitet på kjølemediet og at det skapes virvler. Virvlingene kommer av sirkulasjoner rundt rørene som igjen fører til svingninger. Disse svingningene gjør at andre objekter som er tilbøyelig til å svinge, svinger mer. Frekvensen til svingningene er proporsjonal med farten til strømningen og invers proporsjonal med rørene sin ytre diameter. Det er viktig at resonanssvingninger ikke opererer i hele spekteret fra lavest til høyeste strømningshastighet. Denne type varmeveksler er å foretrekke ved gassturbiner og dampturbiner (Meier-Peter et.al 2009, 669).

#### 4.1.2 Lyddemping:

Virkningsgraden til en lyddemper er avhengig av at der tilpasser frekvensen til eksoslyden.

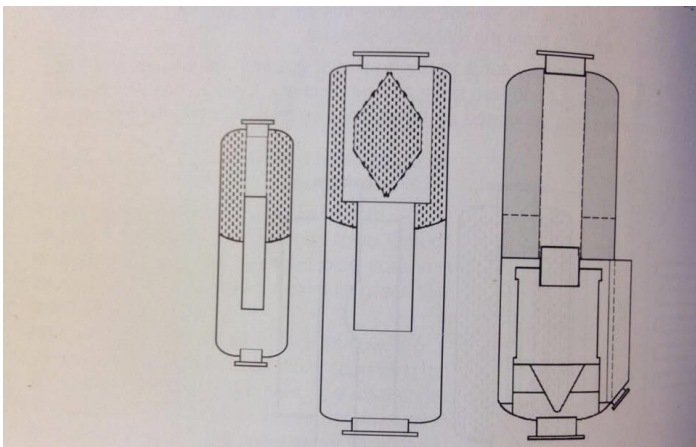
Det finnes to grunnleggende lyddempere til å dempe støyen til eksosgass; *absorption silencer* og *sound-absorbing reflector* som vist i figur 4.



Figur 4 *Absorption silencer* og *Sound absorbing reflector* (Meier-Peter et.al 2009, 669).

Den første, *absorption silencer* består av en lyd-absorberende jakke rundt strømningsrøret til eksosen og rundt den igjen er den dekket med et lydisolerende materiale. Fordelene med denne typen er at de er kosteffektive, og forholdsvis enkle å konstruere, har et vidt frekvensspekter og eksosen mister ikke mye trykk. Ulempene er at den har dårlig

lydabsorberingsevne i frekvens rekkevidden 63 til 250 Hz. Den andre typen, *sound-absorbing reflector* består av et akustisk kammer forbundet med en åpning i eksosrøret. Det er viktig at dimensjonene er presist oppretthold slik at de lydabsorberende reflektorene opprettholdes. Dette gjør at de er dyrere å produsere, absorberer lyd i et mindre spekter, og opplever et høyere trykkfall. Fordelen er at de er gode til å absorbere lyd i spekteret 63 til 250 Hz (Meier-Peter; Bernhardt; Ackermann 2009, 670). Ved å kombinere de to typene er det mulig å oppnå en reduksjon i støy ned til 55 dB. På figur 5 ser vi en kombinasjon av først en *absorption silencer* og deretter en *sound-absorbing reflector*. Ved store dimensjoner kan det legges en absorberende indre kjegle som vist på figur 5 (Meier-Peter; Bernhardt; Ackermann 2009, 670).



Figur 5 Kombinasjonslyddempere (Meier-Peter et.al 2009, 670).

## 4.2 Varme

Dette delkapittelet skal utrede om energiformen varme, i den hensikt å skape en grunnleggende forståelse av varmens natur. Dette av to årsaker; for det første fordi temperaturdifferansen over en termoelektrisk generator er den viktigste faktoren for å få ut effekt. For det andre fordi en endring av temperaturen ut av ubåten vil være essensielt for beslutningen om en integrasjon av en termoelektrisk generator.

Det vil være beskrevet formler og beregningsmetoder som brukes i oppgaven i dette delkapittelet, i tillegg vil resterende formler og beregningsmetoder gjøres rede for i selve beregningsanalysen.

### 4.2.1 Temperatur:

Temperatur er et uttrykk for hvor raskt molekyler i et materiale beveger seg, dess høyere temperatur, dess raskere bevegelse. Derfor er temperaturen til et materiale et mål på den indre kinetiske energien til molekylene – dess høyere temperatur, dess større kinetisk energi (Lundby; Æsøy 2010, 6).

Varme oppstår kun når det er differanse i temperatur mellom et system og systemets omgivelser - og varme beveger seg alltid fra et sted med høyere temperatur til et sted med lavere temperatur. Varme er ikke en tilstand, men en prosess og er derfor gitt over et tidsintervall. Varme bruker symbolet  $Q$ , SI-enheten [ $J$ ] og uttrykkes ved formel 4.1:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

*Formel 4.1 Energioverføring ved varme*

$Q > 0$  betegnes som varme til systemet, mens  $Q < 0$  betegnes som varme fra systemet.

Symbolet  $\dot{Q}$  står for netto varme per tid fra eller til systemet, og har dimensjonen [ $J/S$ ] evt. [ $W$ ].

Varme skjer enten ved direkte kontakt eller ved stråling (Lundby; Æsøy 2010, 4). En skiller typisk mellom tre forskjellige mekanismer: varmeledning og konveksjon som er former for fysisk kontakt, og stråling.

Hver av de tre mekanismene har forskjellige formler for utregning av energioverføring pr. tid ( $\dot{Q}$ ) (Moran et. al, 2012, 48-50). Oppgaven vil utrede og vise beregningsmetoder for

varmelednings og konveksjon, men nevner bare kort om strålingsvarme. Dette fordi det er en avgrensning på beregningene våre.

#### 4.2.2 Varmedledning:

Varmedledning er varme gjennom et fast materiale og væske eller gass som er i ro (Incropera; DeWitt 2002, 2). I faste stoffer skjer varme vanligvis ved varmedledning - fordi de fleste faste stoffer er ugjennomtrengelig for varmestråling (Lund 2012, 113). En kan forestille seg at energioverføringen skjer ved at partikler med mye kinetisk energi interagerer med nabopartikler med lavere kinetisk energi og dermed overfører energien sin videre. Dette betegnes som "Fourier's Law", som sier at energioverføring ved varme er avhengig av det perpendikulære vegg-areale til varmestrømmen, temperaturgradienten ( $\frac{dT}{dx}$ ) og materialets termiske konduktivitet<sup>2</sup> (Moran et. al, 2012, 49-50).

I denne oppgaven er det vesentlig å se på to varmedledningskonfigurasjoner; varmedledning gjennom en plan vegg og varmedledning gjennom en sylinder. Dette fordi termoelektriske moduler er plane og røret på varmeveksleren er sylinderformet.

##### 4.2.2.1 Varmedledning gjennom en plan vegg:

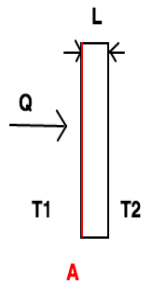
Formel 10 er for varmedledning gjennom plan vegg:

$$\dot{Q}_x = -\kappa * A * \left( \frac{T_2 - T_1}{L} \right)$$

*Formel 4.2 Varmedledning gjennom en vegg eller flate*

---

<sup>2</sup> Termisk konduktivitet er et mål på stoffets evne til å lede varme. Termisk konduktivitet bruker symbolet  $\kappa$  og SI-enheten W/(m\*K). Generelt leder stoffer i fast fase bedre varme enn flytende og gassform, dette kommer av at mellomrommet mellom molekylene er mindre i faste fase, enn i væske- og gassfasen (Incropera; DeWitt, 2002, 53-55).



(-): fordi varme alltid beveger seg fra høy temperatur til lavere temperatur  
 $\kappa$ : termisk konduktivitet [W/(m\*K)]  
 L: tykkelse på plate [m]  
 A: areal av plate [m<sup>2</sup>]

Figur 6 Varmedledning gjennom en vegg eller flate

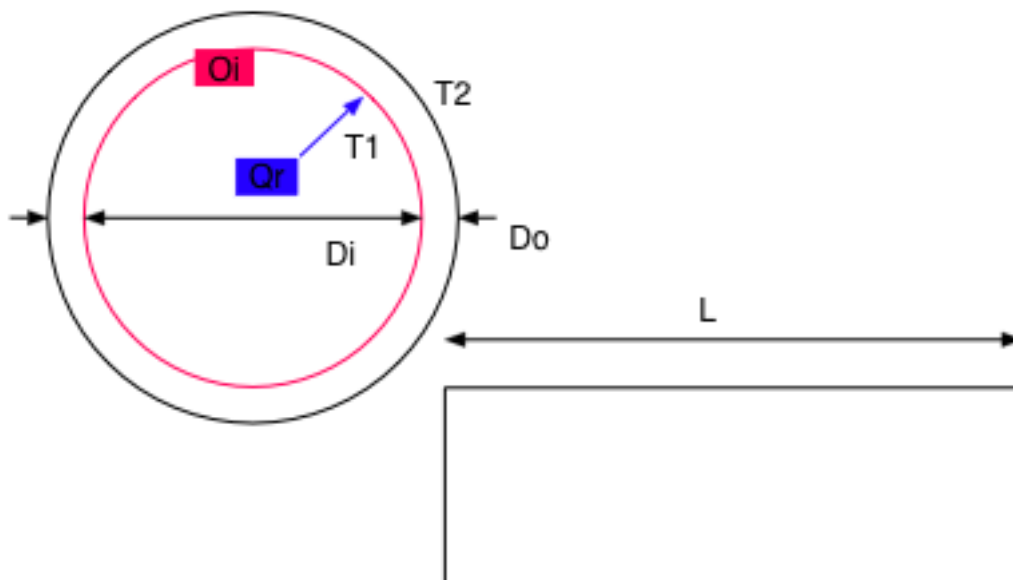
#### 4.2.2.1.1 Varmedledning gjennom en sylinder:

Temperaturfordeling gjennom en sylindervegg er ikke lineær som hos ved

temperaturfordeling gjennom en plan vegg, men naturlig logaritmisk som formel 11 viser:

$$\dot{Q}_r = - \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 * \pi * k * L} * (T_2 - T_1)$$

Formel 4.3 Varmedledning gjennom en sylinder



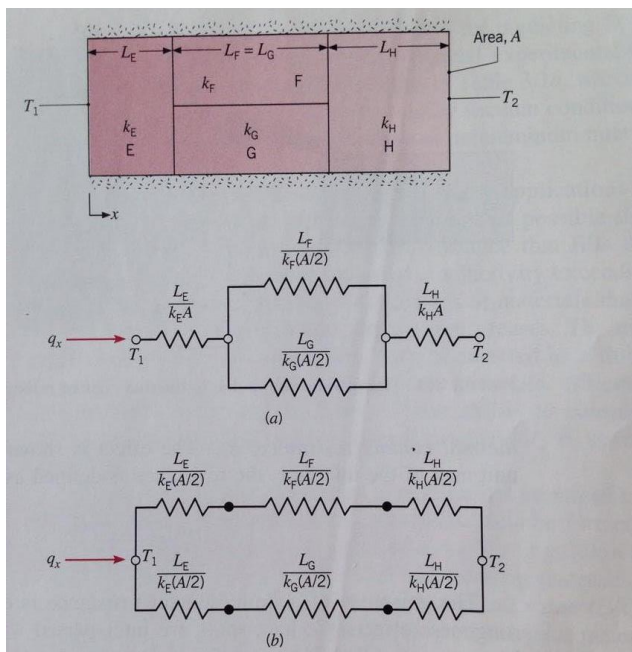
Figur 7 Varmedledning gjennom en sylindervegg

#### 4.2.2.3 Varmeledning gjennom flere materialer og et sammensatt system:

I denne oppgaven vil det være naturlig å se på varmeledning gjennom mer enn ett materiale fordi moduler må på en eller annet måte blir plassert oppå et annet materiale og derfor vil det være relevant.

For å beskrive et sammensatt system kan en bruke samme analogi for varmestrøm som en bruker for elektriskstrøm, og dermed behandle termisk motstand som elektrisk motstand (Incropera: DeWitt 2002, 90). Denne analogien kan brukes som et verktøy til å lettere forstå og beskrive sammensatte og mer komplekse kombinasjoner av veggsammensetninger.

Som vist på Figur 8 kan en se ulike måter en plan vegg er satt sammen på, og dermed kan man gjøre forenklinger til serie- eller parallellkobling.



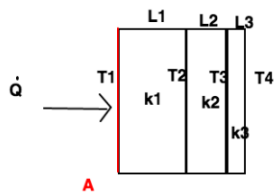
Figur 8 Sammensatte vegger i serie og parallell (Incropera; DeWitt 2002, 93).

#### 4.2.2.4 Varmeledning gjennom en plan vegg av flere materialer i serie:

Ved varmeledning gjennom en plan vegg med materialene lagt etter hverandre kan behandles som en seriekobling. Formelen blir da (Lund 2012, 115):

$$\dot{Q}_x = \frac{-A}{\left(\frac{L_1}{\kappa_1} + \frac{L_2}{\kappa_2} + \frac{L_3}{\kappa_3}\right)} \cdot (T_4 - T_1)$$

Formel 4.4 Varmeledning gjennom en vegg av flere overflater



Figur 9 Varmedledning gjennom en vegg av flere flater

Varmedledning gjennom sylindere med flere materialer lagt etter hverandre vil bli beskrevet i avsnittet om *samlet varmeoverføringskoeffisient og varmeoverføringsevne*.

#### 4.2.2.5 Varmedledning gjennom et termoelektrisk-modul:

Fordi eksostemperaturen ut av lydtemperen skal være lavest mulig er det interessant å se på hvilke varmedledningsegenskaper et termoelektrisk modul har. Vi kan derfor se på varmen trukket fra varmekilden (eksosen) som vi ville gjort for et termoelektrisk kjølelement. Dette fordi strømmen bevege seg i samme retning og resulterer i formel 13:

$$\dot{Q} = K\Delta T + \alpha * I * TH - \frac{1}{2} I^2 R$$

Formel 4.5 Varmedledning gjennom et termoelektrisk-modul

TH: temperatur varm side

K: total termisk konduktivitet for modulen

$\alpha$ : total Seebeckkoeffisient

R: samlet resistans i modulen

(Goldsmid 2016, 11).

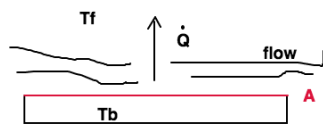
Konduktiviteten gjennom en modul må bli sett på som et sammensatt system hvor lagene er i serie og parallell – vi kommer mer inn på oppbygningen til en modul i delkapittel 4.3.2. Ut i fra formelen og tidligere nevnt under Peltier effekten ser vi at vi ikke bare må ta hensyn til konduktiviteten, men Peltiereffekten og Joule varme. Den elektriske strømmen gjennom modulen fører til peltiereffekten, og resistansen i materialet til Joule varme. Joulevarmen er halvert fordi går halvparten leveres til kilden (eksosen) og halvparten til (sluket) (Goldsmid 2016, 11).

#### 4.2.3 Konveksjon:

Konveksjon er varme mellom en materialoverflate, og gass eller væske i bevegelse (Incropera; DeWitt 2002, 2). Overføring av varme skjer ved to mekanismer: tilfeldig molekylærbevegelse (diffusjon) og bevegelse til fluidet. Hvis en ser på strømningsbilde til en overflate vil bevegelsen akkurat ved overflaten alltid være null for deretter å øke – hvordan strømningsbildet ser ut lengre over overflaten er avhengig av forholdene. Men i forhold til overføringsmekanismer vil diffusjon være dominerende nær overflaten og akkurat i overflaten vil den være enerådende, men ved større avstand fra overflaten vil bevegelsen til fluidet overta som overføringsmekanisme (Incropera; DeWitt 2002, 6-7). Det er vanlig å skille mellom fri og tvungen konveksjon. Tvungen konveksjon vil være strømming som skjer ved hjelp av en ekstern kraft, for eksempel av en vifte eller en pumpe, men fri konveksjon vil være en naturlig bevegelse som ved en temperaturdifferanse. Ved fri konveksjon vil en lokal endring i temperatur nær overflaten endre tettheten på partiklene dette fører til at varme partikler stiger og skaper en naturlig bevegelse, og sprer varmen (Incropera; DeWitt 2002, 7). Kjenner en arealet, varmen på overflaten og i fluidet, og varmeoverføringskoeffisienten  $h$  kan en regne ut energioverføring per tid er beskrevet med det empiriske uttrykket kjent som *Newton's law of cooling* (Moran et. al, 2012, 50-51):

$$\dot{Q}_c = h * A * (T_b - T_f)$$

Formel 4.6 Energioverføring per tid



Figur 10 Illustrasjon over konveksjon

A: overflatearealet til det faste materialet

$h$ : varmeoverførings koeffisient

$T_f$ : temperatur til fluid



$T_b$ : temperatur på overflate av det faste materiale

#### 4.2.3.1 Varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ):

Varmeoverføringskoeffisienten er en empirisk parameter som er avhengig av geometrien til grensen og naturen til fluidets bevegelse (Incropera; DeWitt 2002, 8)

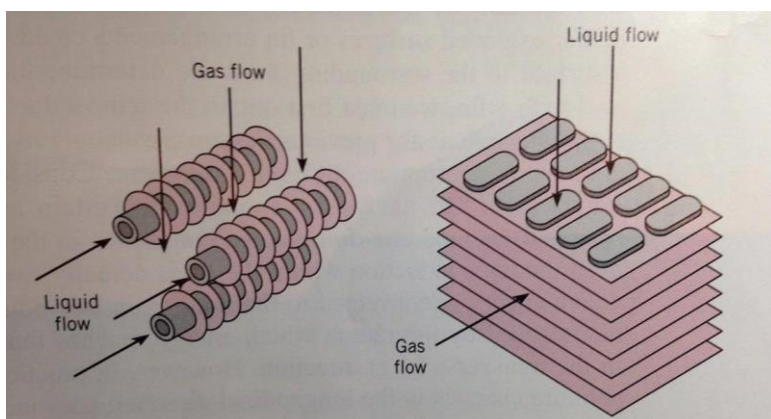
For å kunne beregne varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ) må vi følge en utregning metodologi beskrevet i *Fundamentals of heat and mass transfer*, og spørre oss:

- Hva er strømningsgeometrien?
- Hva er temperaturene derav fluid parameter?
- Hvilke strømningsforhold er det? - Finne reynoldstallet, og deretter bestemme om det er laminær eller turbulent strømning
- Fastsette en lokal- eller overflatekoeffisient
- Og deretter velg korrekt korrelasjons

(Incropera; DeWitt 2002, 399-400)

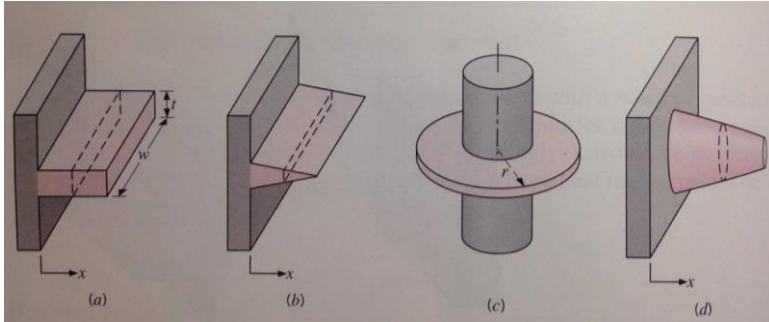
##### 4.2.3.1.1 Hvordan øke varmeoverføringskoeffisienten?

Det er primært tre metoder for å øke varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ). Det første en kan gjøre er å kjøle kjølefluidet, men dette er i praksis vanskelig fordi en gjerne vil benytte seg av den naturlige kjølingen som finnes – i vårt tilfelle havtemperaturen. Det andre en kan gjøre er å øke farten til kjølefluidet som fører til mer av varmen blir transportert vekk/til og mer turbulens oppstår, ved da en installasjon av en større pump – dette er ofte lite kostnadseffektivt. Det tredje og kanskje beste alternativet da er å øke varmeoverføringsarealet og strømningsgeometrien. Det tredje alternativet kan gjøres ved å ha et større areal eller å installere finner på eksisterende areal som vist på Figur 11 (Incropera; DeWitt 2002, 127).



Figur 11 Typiske installerte finner (Incropera; DeWitt 2002, 127)

Finner kommer i alle mulige størrelser og formen som vist på Figur 12. For å bestemme hvilke finner en som bør er optimalt vurderes det etter bør velge kommer an på plass, vekt, produksjonsmuligheter og kostander. Det er i tillegg viktig å få frem at finner kan til en viss grad kan redusere overflatekonveksjonen, og øke mottrykket i varmeveksleren (Incropera; DeWitt 2002, 128).



Figur 12 Ulike type finner (Incropera; DeWitt 2002, 128).

#### 4.2.5 Stråling:

Termisk stråling transporteres ved elektromagnetiske bølger og er den eneste varmetransporten som ikke krever et transportmateriale - her kan energien også bevege seg i vakuum. Materiale i solid-, flytende- og gassform avgir alle en form for termisk stråling i større eller mindre grad, denne energioverføringen per tid kan en finnes ved *Stefan-Boltzmann law* (Moran et. al, 2012, 50). Denne formelen har vi ikke tatt med her, fordi vi ikke ser den relevant for oppgaven.

#### 4.2.6 Bevaring av energi

Termodynamikkens første lov omhandler bevaring av energi, og for å benytte seg av denne loven kreves det et definert kontrollvolum. For vårt formål vil kontrollvolumet være varmeveksleren. Masse og energi passerer gjennom kontrollvolumet, og vi må definere om dette er enten «i øyeblikket [W]» eller «over et tidsintervall [J]» (Incropera; DeWitt 2002, 13).

Termodynamikkens første lov lyder som følger:

*“The rate at which thermal and mechanical energy enters a control volume, plus the rate at which thermal energy is generated within the control volume, minus the rate at which thermal and mechanical energy leaves the control volume must equal the rate of increase of energy stored within the control volume.”*

(Incropera; DeWitt 2002, 13).

Øversettelse fra termodynamikkens første lov sier at mekanisk og termisk energi som entrer kontrollvolumet i tillegg til den termiske energien som produseres inne i kontrollvolumet, minus den termiske og mekaniske energien som forlater kontrollvolumet må tilsvare energien som blir lagret i kontrollvolum – blir ingen energi lagret, men like mye energi som entrer/genereres som forlater kontrollvolumet sier vi at vi har stasjonært strømningsforhold (Incropera; DeWitt 2002, 14).

Energibalansen får derved følgende formel:

$$\dot{E}_{inn} + \dot{E}_g - \dot{E}_{ut} = \dot{E}_{st}$$

*Formel 4.7 Energibalansen*

$\dot{E}_{inn}$ : termisk/mechanisk energi inn pr/tid

$\dot{E}_g$ : termisk/mechanisk generert energi inne i kontrollvolumet pr. tid

$\dot{E}_{ut}$ : termisk/mechanisk energi ut

$\dot{E}_{st}$ : termisk/mechanisk energi lagret innenfor kontrollvolumet pr. tid

(Incropera; DeWitt 2002, 14)

Energioverføringen betegnes som inn og ut av kontrollvolumet som et overflatefenomen, og uten en masse som passerer gjennom kontrollvolumet skjer energioverføring ved termisk energi, og den deles inn i varmeledning, konveksjon og stråling. Inkluderer en massestrøm som passerer gjennom kontrollvolumet må vi også ta for oss mekanisk energi overføring og den kategoriseres i indre-, kinetisk- og potensiellenergi. I tillegg vil vi spesielt ta for oss generert energi inne i kontrollvolumet (Incropera; DeWitt 2002, 14).

Kinetisk og potensiell energi kan i de fleste tilfeller ved varmeoverføringsanalyser blir neglisjert fordi en forenkler med å si at i kontrollvolumet er det ingen endring i fart eller høydepotensiale, og står dermed igjen med indre energi. Indre energi består av termisk og latent/skjult energi som gjerne er i form av et faseskifte (Incropera; DeWitt 2002, 15).

Den genererte energien er konvertering fra annen energi til termisk energi, for oss blir det da spesielt konvertering av elektrisk energi til varmeenergi i form av elektrisk strøm som strømmer gjennom en resistans og skaper varme (Incropera; DeWitt 2002, 15).

En skiller gjerne mellom et lukket og et åpent system, for vår del kommer vi bare til å arbeide med åpne systemer og vil derfor bare ta for oss dette. I et åpent system står masse strømmen for indre, kinetisk og potensiell energi inn og ut av systemet.

Innenfor åpne systemer er det vanlig å dele energioverføringen ved arbeid i to kategorier. Den første kategorien er strømningsarbeid som går på trykkrefter som flytter fluidet gjennom systemet – strømningsarbeidet er ekvivalent med produktet av trykket og det spesifikke volumet [pv]. Den andre kategorien er alt annet arbeid som blir gjort på systemet [W]. For et åpent system som jobber under stasjonære forhold gjelder denne formelen for energioverføring:

$$\dot{m} \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{inn} - \dot{m} \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{ut} + \dot{Q} - \dot{W} = 0$$

*Formel 4.8 Energioverføring for et åpent stasjonært system*

$\dot{m}$ : massestrøm

u: indre energi

pv: strømningsarbeid

$\frac{V^2}{2} + gz$ : kinetisk og potensiell energi

(Incropera; DeWitt 2002, 16)

4.2.7 Samlet varmeoverføringskoeffisient (U) og varmeoverføringsevne (UA):

Så langt er det utredet om to varme gjennom kontakt som to separerte mekanismer;

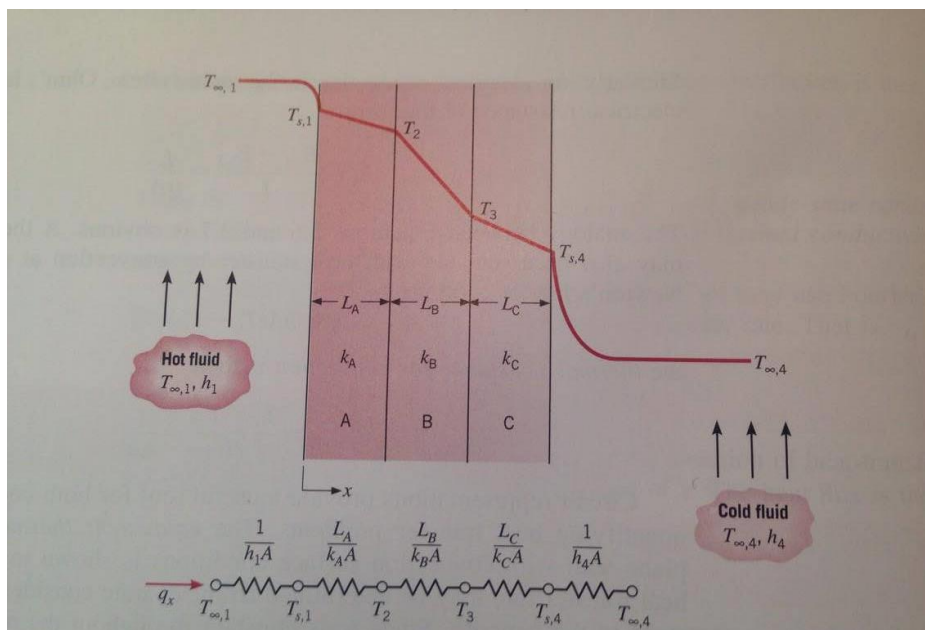
varmeledning og konveksjon, men i praktisk vil vi måtte ta hensyn til begge deler samlet.

Derfor er det hensiktsmessig å innføre en felles benevnning. En platevarmeveksler med fluid strømmende på begge sider, med en sammen satt vegg imellom som vist på figur 13, vil formel 4.9 være for varme:

$$\dot{Q}_c = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{LA}{kA} + \frac{LB}{kB} + \frac{LC}{kC} + \frac{1}{h_2}} = UA\Delta T$$

*Formel 4.9 Varmeoverføringskoeffisient for en sammensatt vegg*

(Incropera; DeWitt 2002, 92)



Figur 13 Termisk resistans i serie gjennom en sammensatt plan vegg (Incropera; DeWitt 2002, 92).

Vi ser at vi kan bryte ned formelen og ta ut varmeoverføringskoeffisientene og konduktiviteten. Det kan være praktisk å se på en samlet varmeoverføringskoeffisient ( $U$ ) (Incropera; DeWitt 2002, 92). Den samlede varmeoverføringskoeffisient benyttes av *Fourier's law* og *Newton's law of cooling* og kombinerer dermed varmeledning og konveksjon (Incropera; DeWitt 2002, 92).

#### 4.2.7.1 For en plan vegg blir den samlede varmeoverføringskoeffisienten:

$$U_{vegg} = \frac{1}{R_{tot} * A} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{1}{h_2}} \left[ \frac{W}{K m^2} \right]$$

Formel 4.10 Varmeoverføringskoeffisienten plan vegg

(Incropera; DeWitt 2002, 92)

Multipliserer en arealet perpendikulært på varmestrømmen får en samlet varmeoverføringsevne. Den samlede varmeoverføringsevnen er omvendt proporsjonal med den samlede termiske resistansen ( $R_{tot}$ ). Den samlede termiske resistansen beskriver motstanden to fluider i en varmeveksler har til å overføre varme. Motsatt så beskriver den samlede varmeoverføringsevnen evnen to fluider i en varmeveksler har til å overføre varme,

hvor større varme overføringsevne, hvor mer varme vil fluidet overføre. Formel 4.11 er for varmeoverføringsevnen:

$$UA_{vegg} = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}}$$

Formel 4.11 Total termisk resistans

(Incropera; DeWitt 2002, 92)

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

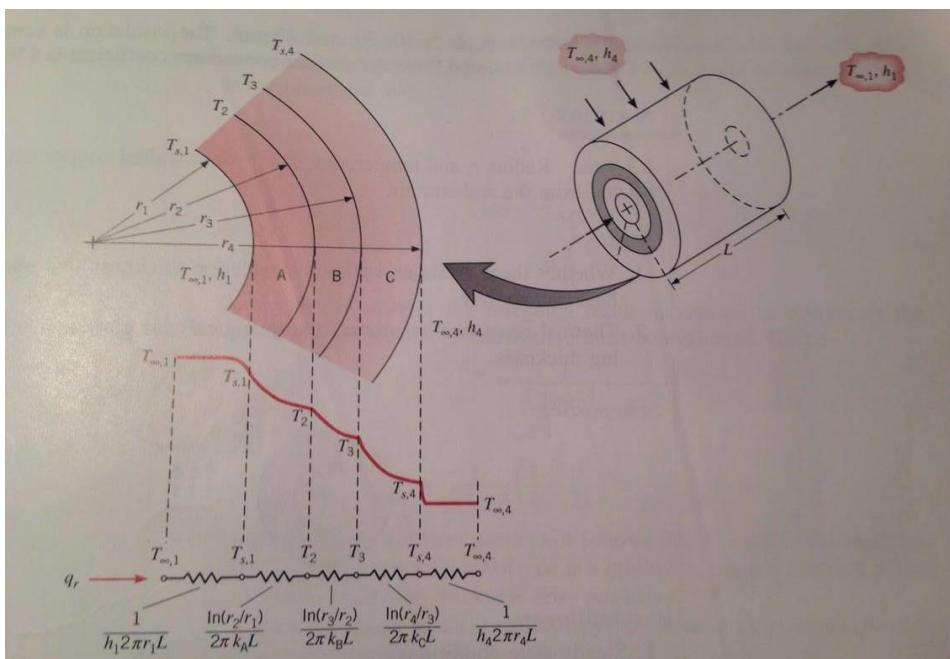
Formel 4.12 Samlet termisk konduktivitet

4.2.7.2 For en sammensatt sylinder er varmeoverføringskoeffisienten:

$$U_{sylinder} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k_A * L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 * \pi * k_B} + \frac{1}{h_2}}$$

Formel 4.13 Varmeoverføringskoeffisient

(Incropera; DeWitt 2002, 106)



Figur 14 Termisk resistans i serie gjennom en sammensatt sylindrisk vegg (Incropera; DeWitt 2002, 106).

Formelen for den samlede varmeoverføringsevnen er til en sylinder er:

$$UA = \frac{1}{\left(\frac{1}{\pi * d_1 * L * h_1}\right) + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2 * \pi * k_A * L} + \frac{\ln(d_3/d_2)}{2 * \pi * k_B * L} + \frac{1}{\pi * d_3 * L * h_2}}$$

Formel 4.14 Samlet varmeoverføringsevne til en sylinder

(Incropera; DeWitt 2002, 106)

Formel 4.14 er den teoretiske varmeoverføringsevnen til sylindren, men det er viktig å påpeke at dette bare gjelder for rene overflater uten utstikkere, eller andre geometriske overflate uregelmessigheter som belegg eller film. For å skape et korrekt bilde må vi legge til noe som kalles fouling factor ( $R_f$ ).

Fouling factor kommer av rust eller urenheter, og det er en film som legger seg utenpå materialet og kan øke den termiske resistansen betraktelig. Verdien til fouling faktoren kommer an på operasjonstemperatur, farten til fluidet og hvor lenge varmeveksleren har vært i drift - det vil jo da si at dette helst skulle vært målt empirisk, og at det blir veldig omtrentlig (Incropera; DeWitt 2002, 645)

Formel 4.15 er for varmeoverføringsevnen (UA) med tillegg av fouling factor for en sylinder blir

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{\pi * k * L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Formel 4.15 Varmeoverføringsevne til en sylinder med fouling factor.

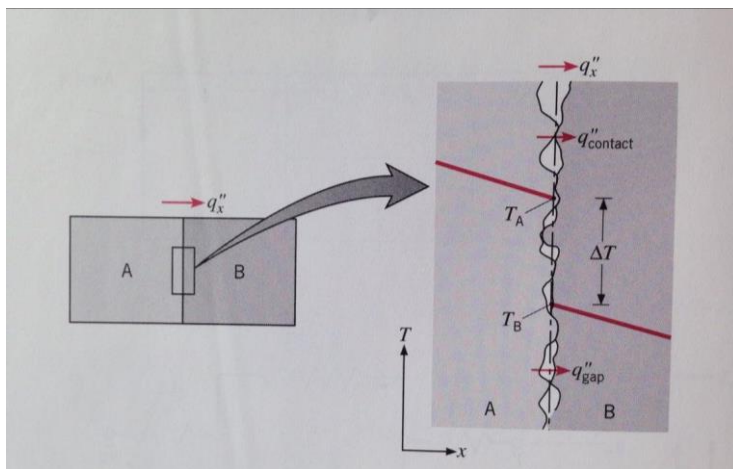
$A_i$ : Indre areal

$A_o$ : Ytre areal

(Incropera; DeWitt 2002, 647)

#### 4.2.7.3 Kontaktresistans:

Til nå har alle beregningene som er presentert vært gjort ved et perfekt sammensatt system, men det er viktig å huske på at temperaturfallet mellom materialer og overflater kan være stort. Dette vil være spesielt viktig ved påleggelse av termoelektriske moduler på overflaten til varmeveksleren. Dette temperaturfallet eller denne ekstra resistansen omtales som termisk kontrakt resistans ( $R_{tc}$ ) og effekten er vist på Figur 15.



Figur 15 Kontakt resistans (Incropera; DeWitt 2002, 94)

Det finnes noen teorier om hvordan en kan regne ut kontaktresistansen ( $R_{tc}$ ), hvor de beste er de eksperimentelle. Vi vil ikke gjøre noen beregninger på kontaktresistansen, men heller presentere noen retningslinjer for valg av materiale og hvordan en kan redusere resistansen (Incropera; DeWitt 2002, 95).

Kontaktarealet kan bli sett på som to parallelle resistanser som vist i Figur 15 – for mellomrommet og for kontaktflatene. Det er i all hovedsak størst resistans ved mellomrommet, enn ved kontaktflaten –grunnet den naturlige forskjellen i konduktivitet mellom gass og solide materialer. Derfor er den enkleste formen for å minske resistansen er å få en større kontaktflate og dermed færre/mindre mellomrom, dette kan gjøres ved:

- øke trykket mellom flatene
- og/eller redusere grovheten til flatene

I tillegg kan en redusere kontaktresistansen ved å legge et fluid mellom grensene med stor termisk konduktivitet (Incropera; DeWitt 2002, 94).

Ved valg av fyllmateriale finnes det mange gode alternativer, men en hovedregel er at så lenge den termiske konduktiviteten er større enn for luft vil den termiske resistansen redusere (Incropera; DeWitt 2002, 94) – for vårt tilfelle vil nok dette gjelde for den konduktiviteten til saltvann. For å trekke frem to klasser av materialer som er spesielt gunstige. Den første klassen er metaller, og da spesielt: indium, bly, tinn og sølv. Metallene blir installert som en tynn folie mellom eller som et tynt lag rundt ett av kontaktmaterialene. Den andre klasse er



silikonbasert termisk fett/gris som er spesielt attraktive fordi det fyller mellomrommet veldig godt, og med mye høyere konduktivitet enn luft for eksempel (Incropera; DeWitt 2002, 95).

Utfordringene med kontaktresistansen og hvordan en løser er også forklart og illustrert i installasjonsguiden til en modul fra Thermonamic i vedlegg C – Figur 70 og 77.

## 4.3 Grunnleggende om termoelektriske egenskaper og modulsammensetning:

Termoelektrisitet har ikke vært undervist på Sjøkrigsskolen, det var derfor et nytt fenomen for oss. Det vil nå presenteres det grunnleggende om fenomenet termoelektrisitet. Omfanget av utredelse kan sies å være større enn nødvendig for å bespare problemstillingen. Likevel er det inkludert i den hensikt å gi leseren en god forståelse av fenomenet i tilfelle det er ukjent fra før, men også vise hvordan vi har arbeidet og utredelsene som vi har gjort.

### 4.3.1 Termoelektrisk egenskaper:

Som tidligere nevnt oppstår det en potensialforskjell i materialer når det er differanse i temperatur. Denne potensialforskjellen varierer mellom materiale og ved hjelp av termisk konduktivitet ( $\kappa$ ), elektrisk konduktivitet ( $\sigma$ ) og Seebeckkoeffisient ( $\alpha$ ) kan vi regne ut termoelektrisk overføringsevne ved formel 4.17 (Skomedal, 2016, 11-12):

$$z = \frac{\sigma * \alpha^2}{\kappa}$$

*Formel 4.16 Termoelektrisk overføringsevne.*

$\sigma$ : elektrisk konduktivitet

$\kappa$ : termisk konduktivitet

Termoelektrisk overføringsevne har dimensjonen [1/kelvin] og derfor multipliseres ofte Z med absolutt temperatur [kelvin] slik at overføringsevnen blir dimensjonsløs, noe som er praktisk vist i formel 4.17

$$zT = \frac{\sigma * \alpha^2 * T}{\kappa}$$

*Formel 4.17 Dimensjonsløs termoelektrisk overføringsevne.*

Formel 4.17 viser at ved høy Seebeckkoeffisient og elektrisk konduktivitet, med lav termisk konduktivitet gir den største termoelektriske overføringsevnen – høy elektrisk konduktivitet gjør at elektronene beveger seg godt og lav termisk konduktivitet gjør at temperaturdifferansen opprettholdes. Et problem som oppstår er at et materiale som leder strøm godt, i de fleste tilfeller leder varme godt (Skomedal 2016, 12).

Oppgaven vil nå gjøre rede for hvordan termoelektriske materiale er avhengig av ladningsbærere, krystallstrukturen, korn orientering og størrelse, og mikrostrukturen.

En blanding av to eller flere metaller kan endre egenskapene til et komplekst materiale system, eller at en variasjon i temperatur og trykk under produksjon kan endre korn orientering. Derfor vil disse faktorene påvirke egenskapene til et termoelektrisk materiale (Gayner; Kar 2016).

#### 4.3.2.1 Ladningsbærere

Antall ladningsbærere bestemmer den elektriske konduktiviteten og termiske konduktiviteten (Gayner; Kar 2016, 335). Dette er fordi den termiske konduktiviteten og elektrisk konduktiviteten er avhengig av ladningsbærere sin tetthet fordi diffusjon av ladningsbærere er hovedtransportmekanismen i metall og halvledere (Skomedal 2016, 15).

For å forstå hvorfor Seebeck effekten og elektrisk konduktivitet er påvirket av ladningsbærere må en se på formlene.

#### 4.3.2.2 Seebeckkoeffisient og ladningsbærere.

Seebeckkoeffisienten er et mål på entropi transportert av bevegelige ladningsbærere delt på ladningene til bærerne som gir oss formel 4.18:

$$\alpha \sim \frac{1}{eT} \langle E - E_f \rangle$$

*Formel 4.18 Seebeck-koeffisient formel nr.2*

hvor i denne formelen  $e$ =elektrisk ladning,  $E_f$ =fermi energi og  $(E-E_f)$  er den gjennomsnittlig energi per bærer overflødig fra Fermi energien<sup>3</sup> (Skomedal 2016, 15). Seebeck effekten er avhengig av sammensetning og ladningsbærere konsentrasjon. (Gayner; Kar 2016, 336).

#### 4.3.2.3 Elektrisk konduktivitet og ladningsbærere

Elektrisk konduktivitet øker med antall ladningsbærere  $[n]$  og kan uttrykkes ved formelen for Drude model for elektrisk konduktivitet formel 4.19.

$$\sigma = n\mu e$$

*Formel 4.19 Elektrisk konduktivitet.*

der  $\mu$  = ladningabærerens mobilitet,  $e$ = elementærladningen (Skomedal 2016,15).

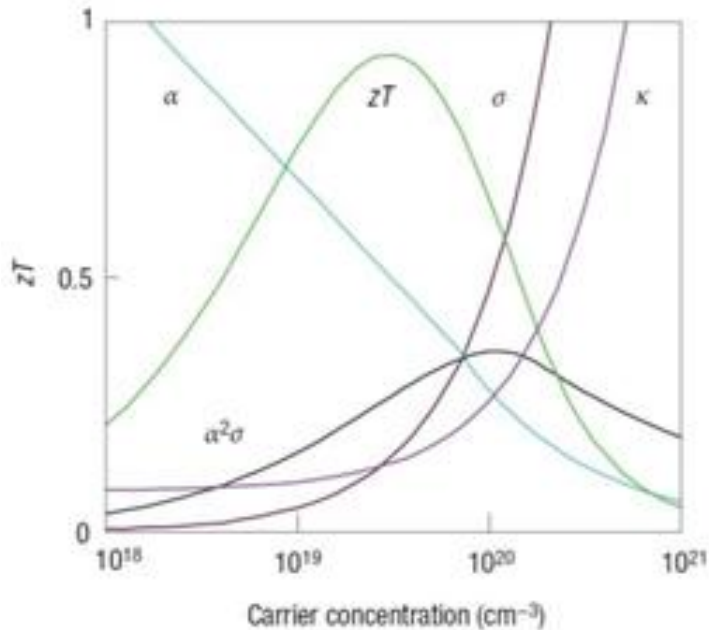
Måten en kan endre ladningsbærere sin mobilitet er ved doping, legering, endring i korngrenser, tilføye urenhet, tetthet, og en sekundær utfasing/forsterknings fase (Gayner; Kar 2016, 336).

---

<sup>3</sup> «Fermienergi beskriver forskjellen i energi mellom fermionene med henholdsvis høyest og lavest energi i et kvantemekanisk system ved null temperatur (Linder 2017)».

#### 4.3.2.4 Optimal ladningsbærer konsentrasjon

Seebeck koeffisienten er omvendt proporsjonal med antall ladningsbærere mens den elektriske konduktiviteten øker med antall ladningsbærere (Skomedal 2016,15). Derfor må en finne den mest gunstige ladningsbærere konsentrasjonen for å maksimere  $zT$ . Figur 16 illustrerer dette grafisk.

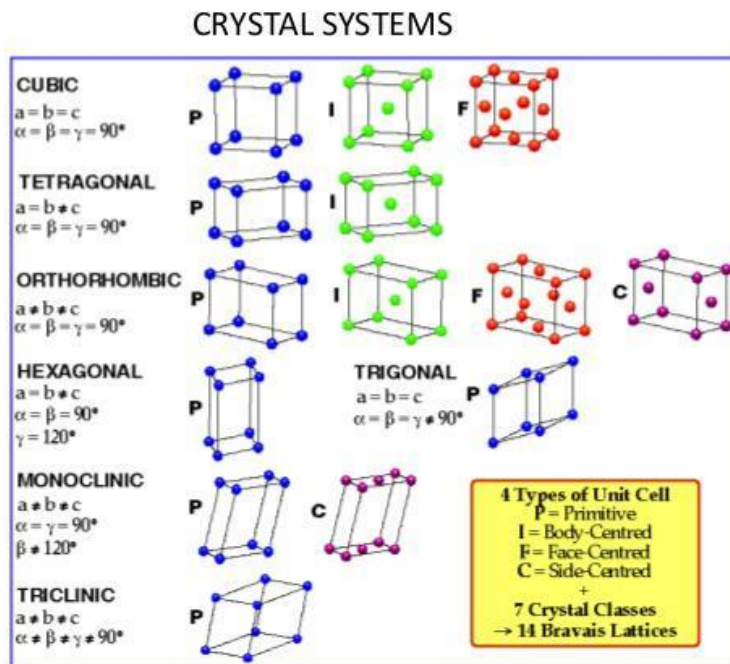


Figur 16 Viser  $zT$ -verdien, Seebeck koeffisient, elektrisk og termisk konduktivitet som funksjon av konsentrasjon av ladningsbærere (Skomedal 2016, 16).

#### 4.3.2.5 Krystallstruktur:

Et krystallinsk metall er at atomene plasserer seg i et repeterende mønster eller en matrise over stor atomiske avstander. Disse atomene vil fordele seg i et tre dimensjonalt mønster. Et krystallinsk metall er avhengig av krystallstrukturen fordi den definerer hvordan atomene, ionene eller molekylene organiseres (Callister; Rethwisch 2011, 48). Atomordren i et krystallinsk fast stoff indikerer at små grupper av atomer former et repeterende mønster. Dette heter enhetsceller som er små grupper med repeterende mønster. Enhetscellen er den grunnleggende strukturenheten eller fundamentet til krystallstrukturen. Enhetscellen definerer krystallstrukturen gjennom sin geometri og plasseringen av atomene inni (Callister; Rethwisch 2011, 49). Det finnes syv krystallsystemer fordelt på fjorten krystallstrukturer i henhold til Bravais-gitter (Gjengedal 2016, notat). De er fordelt etter hvordan enhetscellen er konfigurert, strukturert og organisert som skaper de overordnede gruppene som en kan

plassere de i (Callister; Rethwisch 2011, 50). Figur 17 viser de syv ulike krystallsystemene med henholdsvis de fjorten strukturene for enhetscellen/krystallstrukturen.



Figur 17 Krystall system [http://www.smartway2study.com/2016\\_03\\_01\\_archive.html](http://www.smartway2study.com/2016_03_01_archive.html)

#### 4.3.2.6 Kornorientering og størrelse.

De fleste krystallinske materialene er sammensatt av en kolleksjon av mange små krystaller eller korn, slike materialer kaller vi polykrystall. Under størkningen av et stoff vil det i startfasen formes små krystaller eller cellekjerner i forskjellige posisjoner. Disse har tilfeldige krystallstrukturer. Videre så vil disse kornene vokse ved suksessfull tilførsel av atomer i flytende form og tilslutt vil det være mange korn som grenser mot hverandre (Callister; Rethwisch 2011, 65). Korngranse er den grensen som skiller to små korn eller krystaller som har forskjellig krystallstruktur. Korngrenser er defekter i et materiale og vi betrakter en korngranse som et område med mange dislokasjoner, en feil i gitterstrukturen. Mekanisk tilført energi lagres i form av dislokasjoner og temperaturøkning pluss støy (Gjengedal 2016, Korngranse). Sluttproduktet bør ha så mange og så små korn som mulig. Dette fordi det vil redusere den termiske konduktiviteten og dermed øke den termoelektriske overføringsevnen (Skomedal 2016, 18). Måten dette skjer på er at en reduksjon av kornene gir flere korngrenser som vil spre fononene mer effektivt som resulterer i en reduksjon av den termiske konduktiviteten (Gayner; Kar 2016, 350).

#### 4.3.2.7 Mikrostruktur

«Mikrostrukturen omfatter art, mengde, fordeling, form og størrelse av de forskjellige strukturelementene (Christensen 2009)». Mikrostrukturen er avgjørende for å bestemme de termoelektriske egenskapene til et materiale. Grunnen til dette er fordi gjennom endring av mikrostrukturen kan en øke  $zT$  verdien ved å lage en større vei for ladningsbærerene og en mindre “vei” for fononene. Det finnes måter innenfor nanoteknologi som øker korn grensene og dermed endrer mikrostrukturen til et element. Som nevnt ovenfor vil denne endringer resulterer i bedre termoelektriske egenskaper til materialet (Gayner; Kar 2016, 350).



2. **Materialegenskaper:** materialets egenskaper mot  $Z$  ( $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ), og den elektrisk og termiske kontakt egenskaper.
3. **Designparameter:** Lengen til termoelement  $l$ , tvernsnittsareal  $A$  og antall termoelektriske bein.

(Rowe;Min 1996, 352).

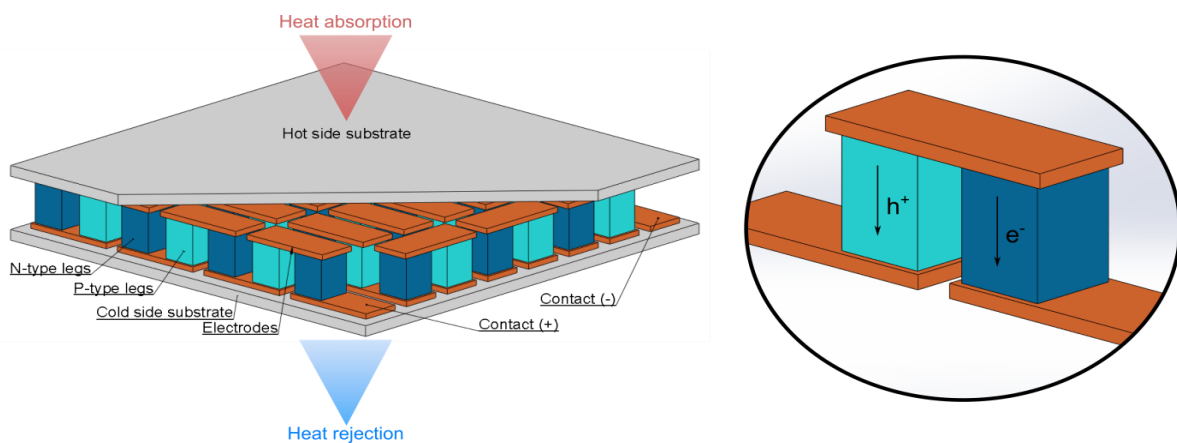
Oppgaven vil videre fokusere på selve design parameteren siden de to andre gruppene har blitt utredet tidligere.

En vil ha så stor andel som mulig av den termiske motstanden over selve det termoelektriske materialet ettersom dette vil maksimere effekten (Skomedal 2016, 31).

Oppgaven vil ta for seg noen grunnleggende betraktninger rundt det å designe og bygge en termoelektrisk modul. Oppgaven vil gjøre rede for grunnleggende prinsipper innenfor hvordan det gjøres, i tillegg til ulike utfordringer som er knyttet til aspektene. Fokuset vil være på både de optimale nåværende løsninger, men også noe om metoder som kan vise seg å bli mer optimale i fremtiden.

Det er to prinsipper som er grunnleggende for alle termoelektriske moduler og det er;

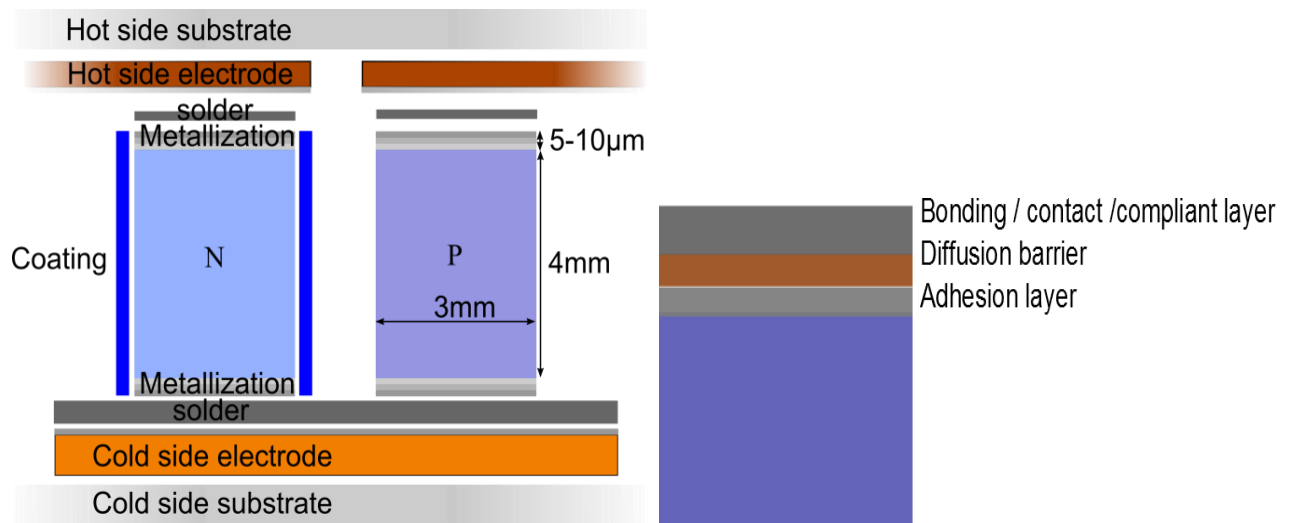
Termoelektrisk bein er koblet i serie, og termisk i parallell som er vist i figur 19 (Skomedal 2016, 32).



Figur 19 Termoelektrisk modul (Skomedal 2016, 11).



#### 4.3.2.3 Grunnleggende byggeklosser til en termoelektrisk-modul



Figur 20 Grunnleggende byggeklosser til en termoelektrisk-modul (Skomedal 2016, 34).

En termoelektrisk modul kan designes på mange forskjellige måter. Likevel er det noen grunnleggende prinsipper og strategier som er veiledende slik som figur 20 viser. Når en skal vurdere en modul sin levetid og yteevne over tid er det relevant å se på alle delene i modulen (Skomedal 2016, 34). Skomedal har laget en tabell 4-1 som ses i kombinasjon med figur 20 som viser de grunnleggende og typiske delene sin funksjon, utfordringer og ønskelige egenskaper i en termoelektrisk modul.

Tabell 4-1 Typiske deler og dens egenskaper i en termoelektrisk modul (Skomedal 2016, 35).

Part	Function	Favorable properties	Typical materials
<b>Substrate</b>	Fixture for mounting electrodes and TE legs	High thermal cond. Electric isolator. Mechanically strong.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , anodized Al
<b>Electrodes</b>	Electrical transport between TE legs. Thermal transport from substrate.	High thermal and electrical conductivity. Chemically inert. Hot side matching CTE with TE material.	Cu, Ag, Ni, Stainless Steel
<b>Solder</b>	Bonding between electrode and TE material (including metallization).	Bonds at low temperatures. Good electric and thermal conductivities. High reliability at high temp.	Cold side: Pb-Sn Hot side: Agbased.
<b>Metallization</b>	Thin metallic layer, forming bond between TE material and electrode.	High thermal and electrical conductivity. Hot side matching CTE with TE material. Diffusion barrier.	Different metals and intermetallics
<b>Coating</b>	Protect side of legs from sublimation and oxidation.	Dense, chemically inert. Thermal and electric insulator. Matching CTE.	Enamel, glassceramic, thin metal layers
<b>Thermal insulation</b>	Reduce parasitic heat losses from sides of TE-material.	Very low thermal conductivity. Matching CTE.	Silicone (<300°C), Aerogel
<b>Encapsulation</b>	Protect TE-material and electrodes from sublimation and oxidation.	Ductile, low thermal conductivity.	Stainless steel casing

#### 4.3.2.4 Belegg og beskyttelse:

Beskyttelse fra omgivelsene og miljøet rundt et termoelektrisk-modul er ekstremt viktig hvis arbeidsområdet er ideell for korrosjon. Hvis elementet skal være i kontakt med luft så kan oksidasjon være et problem for et termoelektrisk-moduler og metalleder. Dette kan en løse ved å beskytte begge sidene av en termoelektrisk-modul. En slik beskyttelse kan gjøres på eksempelvis to måter som; Den første er å kle modulen med et tynt metall lag lik

metallisering. Den andre løsningen er å bruke stoffer som kompositt glass, «enamel coatings», eller metall basert maling der en maler og tørker det på modulen som et beskyttende lag (Skomedal 2016, 36).

Et annet område som er av utfordring for en termoelektrisk-modul i et «inhert atmospheres» er å unngå sublimasjon av overflate av modulen. En løsning til dette er å kapsle modulen slik at en kan fylle den med en «inhert» gass som He eller Ar. I følge NASA så vil dette redusere sublimasjonen betraktelig (Skomedal 2016, 36).

#### *4.3.2.5 Mekanisk egenskaper:*

Mekaniske egenskaper er et begrep som ble presentert i møte med Torleif Tollefsen. Dette begrepet omhandler å se produksjonen av en termoelektrisk generator i en helhet, og ikke kun fokusere på utvikling av de termoelektriske egenskapene. Det vil si at en også må vurdere samt evaluere de mekaniske egenskapene som blant annet smeltetemperatur, hvordan materialeegenskapene påvirkes når eksponert for varme, duktiliteten til materialet, korrosjonsbestandighet og levetid etter å bli eksponert for utmatting. Det har skjedd et skifte av fokusområde i forskningsmiljøet innenfor termoelektrisitet de siste årene fra å kun studere de termoelektriske egenskapene til å se det i en helhet som inkluderer blant annet å optimalisere de mekaniske egenskapene (Tollefsen 2017).

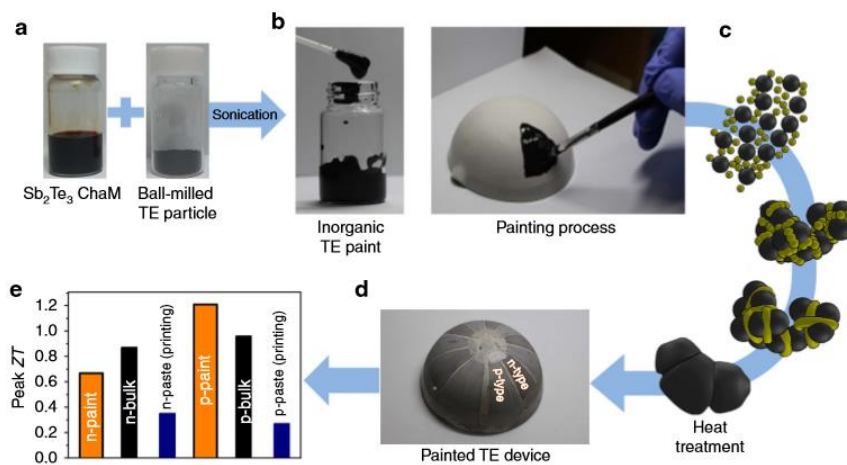
#### *4.3.2.6 Levetid og korrosjon termoelektriske modul*

Saltvann kan skape korrosjon hos materialer. Derfor er det nødvendig å undersøke hvordan lyddemperen og de termoelektriske-elementene blir påvirket av korrosjon.

De termoelektriske modulene vil kledd inn med en beskyttelse materiale. Det går kun strøm i ledningene som går ut fra modulene når de er koblet sammen i en krets. Strømmen er derfor isolert så det vil i utgangspunkt ikke skape en korrosjon hos de termoelektriske-materialene eller lyddemperen så fremt isolasjonen eller innpakning tåler saltvann. Levetiden til et termoelektrisk element i et miljø med saltvann med et beskyttelsesmateriale designet for saltvann, har en modul levetid på rundt 7 år. (Tollefsen 2017).

#### 4.3.2.7 Alternativ løsning - Formbart termoelektrisk-element

El-desouky et. al, skriver i sin artikkel at «Dicing of the sintered ingot accounts for up to 50% of material losses due to chipping, cracking, and kerf losses. The dicing step also poses geometric limitations on the thermoelectric leg shape and dimensions, so most thermoelectric legs in commercial devices are square or rectangular in shape (El-desouky et. al, 2016). » Med andre ord er det et stort potensiale for å bedre produksjonen av et termoelektrisk materiale for å øke yteevnen. For det meste er termoelektrisk-element produsert i en kvadratisk form på grunn av begrensning i det å tilpasse til en annen geometrisk form. Dette byr på utfordring for utviklingen av bruken av termoelektriske-element fordi mange steder der en ville kunne utnytte en form for spillvarme så kan anleggsflaten være av en annen geometrisk form enn kvadratisk. Eksempelvis er det en utfordring i denne oppgaven. Det var derfor interessant å undersøke om det fins alternative løsninger for de stedene der en kvadratisk form ikke eksisterer. Vi fant en artikkel om formbar termoelektrisk maling. Slik gruppen forstår det så er dette kun mulig i et laboratorium og er ikke kommersielt eller kosteffektivt å masseprodusere, men det er en indikasjon i hva fremtiden muligens bringer.



Figur 21 Produksjonsprosess til et malbart termoelektrisk-element (Park et.al 2016, 3).

Figur 21 illustrerer prosessen for å lage et formbart termoelektrisk-element. Oppsummert fra forskningsgruppen så skriver de om forsøket at de oppnådde en effekt på  $4.0mWcm^{-2}$  som kan tilpasse nesten hvilken som helst overflate. Forskningsgruppen oppnådde en zT verdi på 0,67 og 1,21 for henholdsvis n og p-type malt materiale. Det blir avsluttet med at troen på denne type teknologi innenfor termoelektrisk-materiale er stor hos forskningsgruppen (Park et.al 2016, 8). Dette vil ikke bli utredet eller tenkt på som en mulig løsning siden det ikke er kommersielt. Likevel er interessant å ha undersøkt hva fremtiden kan bringe.

#### 4.4 Utredning om termoelektrisk materiale

Ved start av oppgaven var det naturlig å tenke seg at Skutteruditt ville være et gunstig materiale å bruke i vår oppgave med bakgrunn av tilgjengelighet i Norge, og dets optimale arbeidstemperatur er området 500 °C. Underveis i arbeidet ble det avdekket at Skutteruditt ikke var et egnet materiale å bruke som blir forklart i delkapittelet 5.2. Likevel er Skutteruditt inkludert i oppgaven fordi utredelsen er god, det illustrerer egenskapene og karakteristikken til termoelektrisitet som er viktig for forståelse. Videre har det vært problematisk å finne et egnet termoelektrisk-materiale å bruke. Grunnen til dette er at de vitenskapelige artiklene som er brukt ofte omhandler forsøk for å utvikle en ny legering med bedre egenskaper eller en ny måte å produsere et termoelektrisk materiale. Fellesnevneren er at et fåtall av disse materialene kan en kjøpe kommersielt fordi de er fremdeles på et laboratorium stadiet eller for kostbar per dags dato å produsere. Materiale som velges bør også kunnes kjøpe i kvantum av en produsent. Derfor endret gruppen strategi for å finne termoelektriske materialer fra vitenskapelige artikler til å finne bedrifter på internett. Alphabet, Evident, Gentherm og Thermonamic er bedrifter som ble undersøkt (Tollefsen 2017). Thermonamic i motsetning til sine konkurrenter leverer detaljer om sine termoelektriske moduler, dog har vi dessverre ikke lyktes med å komme i kontakt med de for flere detaljer selv etter flere mailforsøk. På deres nettside fant vi to legeringsserier Vismut Tellur og Bly Tellur som mulige kandidater. Disse vil nå bli utredet samtidig som en utredelse om Skutteruditt er inkludert for sammenligning og forståelse.

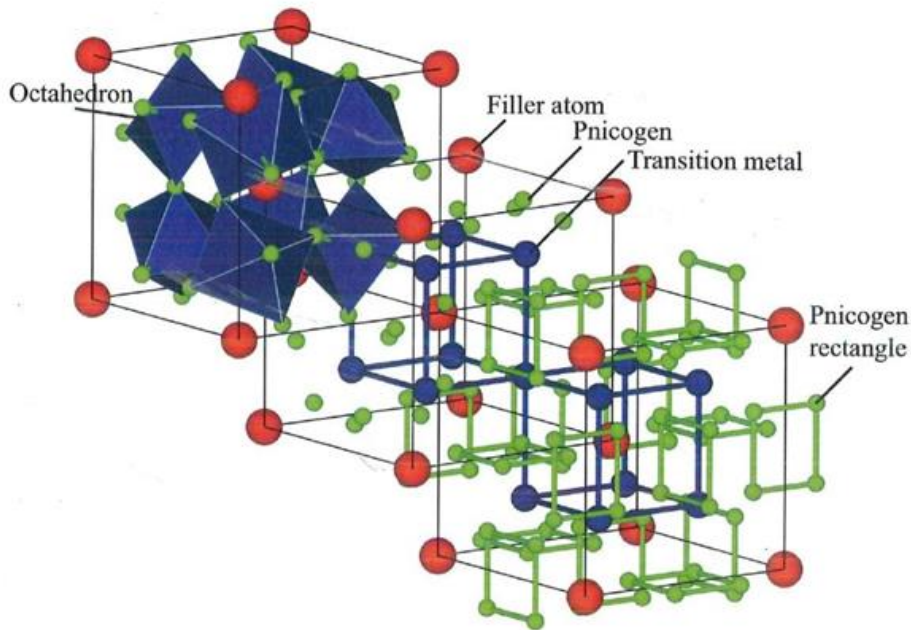
#### 4.4.1 Skutteruditt

Den generelle formelen for skutteruditt er  $MX_3$ . Disse bokstavene representere grunnstoff grupper i henhold til den periodiske tabell. “M” er gruppe IX for overgangsmetall<sup>7</sup> som (Co, Ni eller Fe). “X” er en betegnelse for gruppen med ikke-metaller<sup>8</sup> som (Sb, As, eller Sn). Den blandingen som er mest lovende og fått mye oppmerksomhet er  $CoSb_3$ . For å forstå hvorfor skutteruditt er et godt egnet termoelektrisk materiale kan en studere enhetscellen. Det er et tomrom mellom enhetscellestrukturen oktaederet formet av ikke-metall atomer til neste struktur som kan fylles med store fremmede fyllatomer. Disse fyll atomene vil fungere slik at de reduserer hastigheten til fononene som vil resultere i en lavere termisk konduktivitet (Skomedal 2016, 22). Måten fyllatomene reduserer hastigheten til fononene er at fyllatomene motarbeider gittervibrasjonene med å sende ut uavhengig bølger som bryter opp og sprer gittervibrasjonbølgene til fononene (Goldsmid 2016, 40-41). Desto mindre og tyngre fyll atomene er, desto mer vil fyll atomene endre gittervibrasjonene. Reduksjonen av gittervibrasjonene til fononene vil resultere i reduksjon av den termiske konduktiviteten (Gayner; Kar 2016, 352). Fyllatomene er typisk lanthanides, actinides, alkali eller elementer fra boron eller karbon gruppen. Det optimale fyll atomet vil også fungere som et dopingøker med konsekvens at Seebeck koeffisienten og den elektriske konduktiviteten øker (Skomedal 2016, 22). Oksidasjonene av skutteruditt skjer over 380 °C og sublimasjonen som er direkte overgang fra faststoff til gas over 550 °C.

---

<sup>7</sup> Overgangsgrunnstoffer, overgangselementer, overgangsmetaller, noe upresis betegnelse på noen grunnstoffer der elektronskallet innenfor valensskallet bare er delvis fylt (SNL, 2009).

<sup>8</sup> Ikke-metaller, fellesbetegnelse for de mest elektronegative grunnstoffer, atskilt ved en noe upresist definert gråsoner fra de metalliske grunnstoffene i grunnstoffenes periodesystem. Et alminnelig kjennetegn er at en eller flere allotroper (modifikasjoner) av grunnstoffet i kondensert tilstand fremviser isolator- eller halvlederegenskaper (Fjellvåg, 2009).

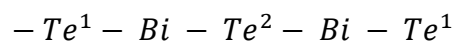


Figur 22 Krystallstrukturen til Skutteruditt (Skomedal 2016, 23).

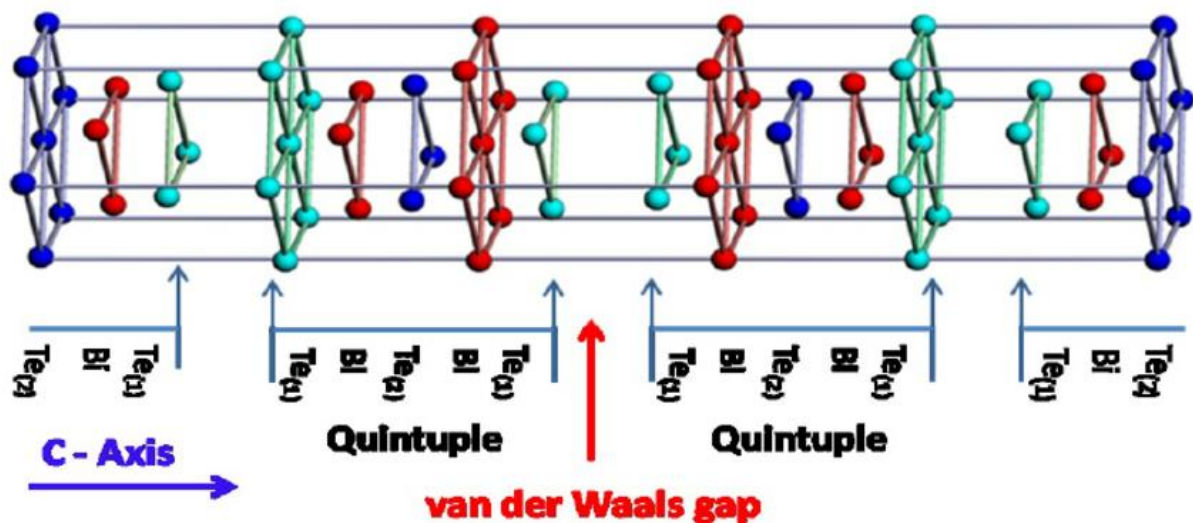
Figur 22 viser en fylt skutteruditt sin krystallstruktur. I posisjonene til gruppe 15 (nitrogen familien) i det periodiske system sitt gitter vil ikke-metallatom plassere seg. Disse ikke-metall atomene vil forme et oktaeder krystallstruktur som er formet av seks ikke-metallatomer som gir de en sekskant med åtte flater rundt overgangsmetaller. I tomrommet mellom oktaederet og strukturen kan fyltatomene bli plassert Skomedal 2016,23).

#### 4.4.2 Vismut Tellur:

Vismut var et av de første termoelektriske som ble studert av forskere. Vismut Tellur ( $Bi_2Te_3$ ), danner monokrystaller som er anisotropis (Goldsmid 2016, 85). Det vil si at monokrystallene har ulike fysiske egenskaper i forskjellige retninger (Pedersen 2015). Vismut Tellur har en krystallstruktur som er organisert i parallelle lag med følgende rekke som er kontinuerlig repetert.



(Goldsmid 2016, 85).



Figur 23 Krystallstruktur Vismut Tellur hentet fra [https://www.researchgate.net/figure/45904785\\_fig1\\_Figure-1-Schematic-of-Bi-2-Te-3-crystal-structure-of-D-3d5-R-3m-space-group-showing](https://www.researchgate.net/figure/45904785_fig1_Figure-1-Schematic-of-Bi-2-Te-3-crystal-structure-of-D-3d5-R-3m-space-group-showing)

Det er sterke kovalente ionebindinger mellom Bi og Te atomene, men som figur 23 viser så er kontakten mellom  $Te^1$  basert på den svake van der Waals kraften<sup>9</sup> (Goldsmid 2016, 85).

Videre så har Vismut Tellur har en smeltetemperatur på 585 °C (Goldsmid 2016, 163). Det vil si at legeringen vil vaporisere hvis utsatt av temperatur over 400 °C i følgende den kjemiske reaksjonen:



(Skomedal 2016, 21).

Som Skomedal skriver at legeringen vil vaporiseres ved utsatt for 400 °C og over, samsvarer også med det Thermonamic oppgir på sine sider om den termoelektriske-modul TEP series bestående Vismut Tellur. På Thermonamic sine sider skrive de optimal arbeidstemperatur er 200 °C, men kan jobbe opp mot 330 °C kontinuerlig og kun periodisk ved 400 °C. De beste Vismut Tellur materialene har en zT verdi opp mot 1.5 (Skomedal 2016, 20). Selv om Vismut Tellur har en svak van der Waals binding mellom  $Te^1$  lagene så er de andre bindingene ansett som sterke (Goldsmid 2016, 97). I applikasjoner der en installasjon av en termoelektrisk generator er tenkelig så vil Vismut Tellur være et naturlig valg når temperaturkilden er rundt 200°C (Goldsmid 2016, 99).

<sup>9</sup> Van der Waals binding forklares ved at i et molekyl er elektronene i rask bevegelse, og i enkelte øyeblikk selv om det er upolart molekyl så kan bevegelsen til elektronene gjøre molekylet polart. Når dette molekylet er polart så kan det påvirke andre molekyl til å polariseres. På denne måten har en oppnådd en tiltrekning eller kraft som betegner en van der Waalsbinding. Dette er en betegnelse på svake bindinger mellom upolar molekyl (Pedersen 2015).



#### 4.4.3 Tin Tellurid

Legeringen Bly Tellur blir som regel leget med andre grunnstoff fra gruppe IV-VI i den periodiske tabell i mellomliggende temperaturer (Goldsmid 2016, 153). Bly Tellur har et smeltepunkt på 923 °C. I praksis vil en ikke bruke en ren legering som Bly Tellur (PbTe), men for eksempel med Tinn (Sn) og Selen (Se) i formelen  $Pb_xSn_{1-x}Te_ySe_{1-y}$  (Goldsmid 2016, 163). Thermonamic tilbyr en tilsvarende legering bestående av Bly, Tellur og Tinn. Bly Tellur har en krystallstruktur formet som en kube som gjøre de termoelektriske egenskapene til isotrop (Goldsmid 2016, 163).

#### 4.4.4 Sammenligning av termoelektriske materialer

Tabell 4-2 Sammenligning av Vismut Tellur og Tin Tellur

Type serie/ Legering	Optimal arbeidstemperatur [°C]	Maksimal temperatur [°C]	Effekt ut * [W]	Strøm * [A]	Spenning [V]
Vismut Tellur	330	400	17,6-	2,0-	8,8-
Tin Tellur	500	600	21,7-	3,27	6,65

\* Verdiene er hentet fra produsenten sine spesifikasjoner ved en driftstemperatur for Bismuttellurid:  $T_h = 300$   $T_c = 30$  [°C], og for tin tellurid:  $T_h = 600$   $T_c = 30$  [°C].

Tabell 4-2 viser en sammenligning mellom Vismut Tellur og Tin Tellur. For å bestemme hvilket materiale som er best egnet til en mulig installasjon må en vite temperaturen som modulen blir utsatt for, kontakttemperaturen. Kontakttemperaturen tar hensyn til den termiske resistansen til lydtemper materialet og vil bli beregnet i avsnitt 4.7.4.7.3.

## 4.5 Forsøk gjennomført ombord på Ula-klassen.

### 4.5.1 Hensikt

Det var tre grunner til at vi gjennomførte dette forsøket:

1. For det første ville vi utforske og bli kjent med eksosanlegget; virkemåte og funksjonsprinsipper. Dette slik at vi kunne gjennomføre gode beregninger og fant ut hvor det var mulig å plassere en TEG.
2. For det andre ville vi undersøke temperatursløyfen til eksos og saltvann i og rundt dieselmotoren på Ula-klassen. Dette for å kunne gi et godt grunnlag for hvilke materialtyper vi skal velge, hvor mye potensiell energi som kan hentes ut. Samt undersøke om dette vil ha innvirkning på den termiskesignaturen – utgangstemperaturen til eksos på ubåten.
3. For det tredje ville vi prøve å kartlegge temperaturfordelingen inne og rundt lyddemperen ved hjelp av et IR-kamera Fluke.

### 4.5.2 Forberedelser:

- kontroll av måleinstrumenter
- karlegging av målepunkter

### 4.5.3 Måleinstrument:

To typer måleinstrumenter:

Termisk kamera:

*Tabell 4-3 Måleinstrument for forsøket*

Type	Fluke Ti 10 Thermal Imager
Nøyaktighe	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ eller 5% av avlesning.
Målområde	-20 $^\circ\text{C}$ til 255 $^\circ\text{C}$
Kaliberet	22.mai.2008 (se vedlegg G for kalibreringsbevis).

Måleinstrument på fartøy:

- Maskinkontrollsystemet om bord  
PT 100 og PT 1000 element.

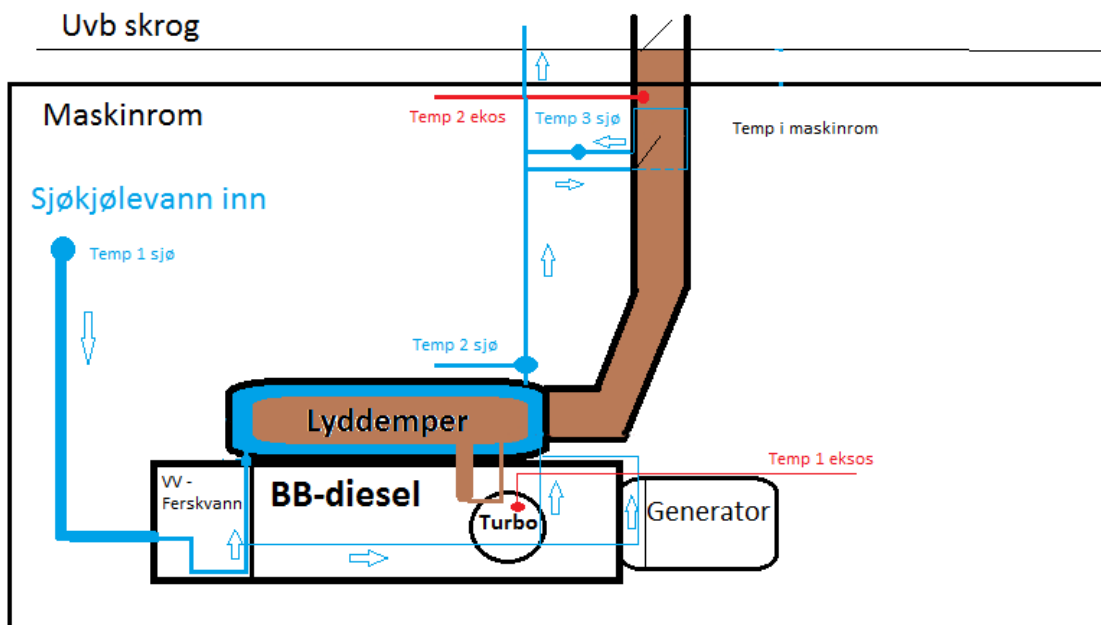
### 4.5.4 Gjennomføring:

- 1) Vi startet med å sette oss inn i: målesystemet, eksos- og saltvannssløyfen.
- 2) Dette ble gjennomført i samråd med 1.elektriker om bord. Oppstart av BB-diesel ble utført etter normal oppstarts prosedyre og igangsetting av ladning med generator om bord.
- 3) Velge riktig lastekondisjon på generator (full last) og 1800 rpm.

- 4) Ventet med avlesing til parameterne har stabilisert seg. Parameterne er: eksostemperatur, oljetemperatur og kjølevannstemperatur. Deretter leste vi av i 2 timer med et tidsintervall på 5 min.
- 5) Tok deretter et gjennomsnitt av hele målingen
- 6) \* under avlesingsperioden undersøkte vi: lyddemperen overflaten, eksosen ut av lyddemperen, saltvann ut av lyddemperen og eksosklaff ytterkappe.

#### 4.5.5 Observasjoner

##### 4.5.5.1 Redegjørelse av eksos- og sjøkjølevannsanlegg

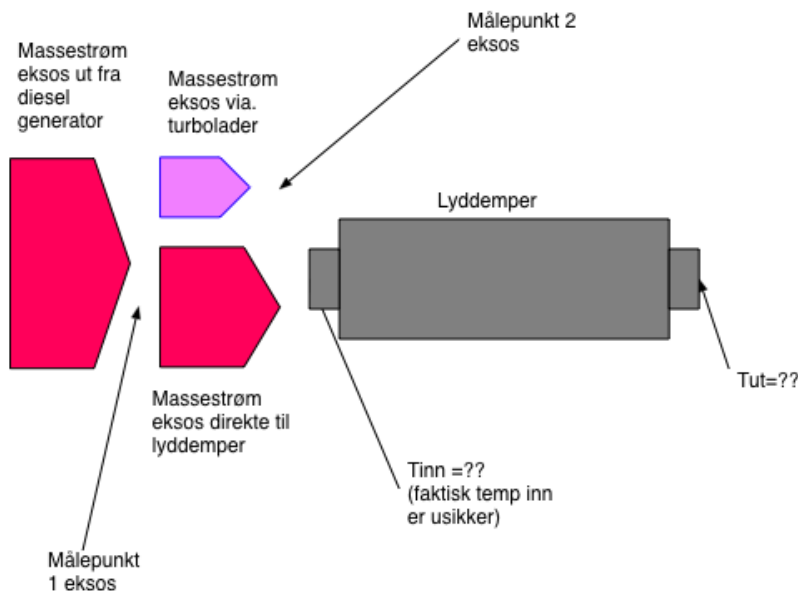


Figur 24 skisse av eksosanlegg

Vi ser ut i fra Figur 24 den totale oversikten over eksosanlegget og den påhengte kjølingen. Det er på figur 24 merket av en del faste målepunkter for eksos, sjøkjølevann og temperatur maskinrom. De målte temperaturene er presentert under neste avsnitt (4.5.5.2). Videre vil vi presentere sløyfen til eksos og sjøkjølevannet med ekstra fokus over lyddemperen.

### Eksossløyfen:

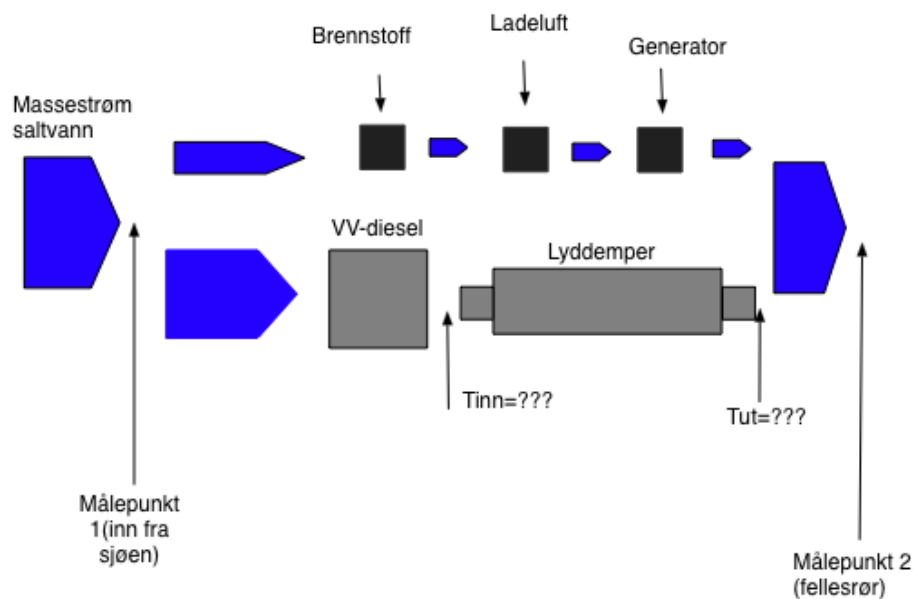
Hoved mengden av eksosen som dieselmotorene produserer går direkte inn i lyddemperen (målepunkt 1). Resterende går først gjennom turboladeren som krever eksostrykk for å fungere. Dette gi eksosen en lavere temperatur ut fra turboladeren (målepunkt 2). Eksosen returnerer så tilbake til lyddemperen og blander seg med eksosen fra dieselmotoren. Etter lyddemperen går eksosen gjennom en indre eksosledning og forbi indre eksosklaff. Etter indre eksosklaff blir eksosen kjølt av spray og kappekjølingen. Her er neste temperatur måling (målepunkt 3) i figur 24. Det som er vesentlig her er at vi mangler en faktisk måling av temperatur inn på lyddemperen (med antes mellom temperatur målepunkt 1 og temperatur målepunkt 2). Under er problemstillingen med målepunkter over lyddemper presentert i figur 25.



Figur 25 Massestrøm eksos med målepunkt 1 og 2

### Sjøkjølevannssløyfen:

Sjøvannstemperaturen blir målt ved innløpet av fartøyet (målepunkt 1/temp 1 sjø) som vist i figur 24 og figur 26. Etter innløpet så deles rørledningen i to. Hoveddelen (ca  $\frac{3}{4}$ ) av sjøvannet går til dieselmotorens varmeveksler (VV-diesel), så videre til lyddemperen og spraykjøling og kappekjøling etter indre eksosklaff. Den andre delen ( $\frac{1}{4}$ ) går til kjøling av brennstoff, ladeluft, generator og ut på et felles utløpsrør med sjøvannet fra lyddemperen (målepunkt 2). Dette er presenter i figur 26. Hovedproblemet her også er at vi ikke har temperaturmåling rett før lyddemperne og heller ikke rett etter lyddemperen, vi må derfor basere oss på antakelser.



Figur 26 Massestrøm sjøkjølevann målepunkt 1 og 2

#### 4.5.5.2 Gjennomsnittstemperatur målt med sensorer om bord:

Tabell 4-4 Temperaturoversikt BB-diesel testkjøring.

Temperatursensor	1	2	3
Sjøkjølevann	8 °C	15 °C	17 °C
Eksostemperatur	398 °C	330 °C	65 °C
Smøreoljetemperatur	92°C		
Maskinromstemperatur	26 °C		

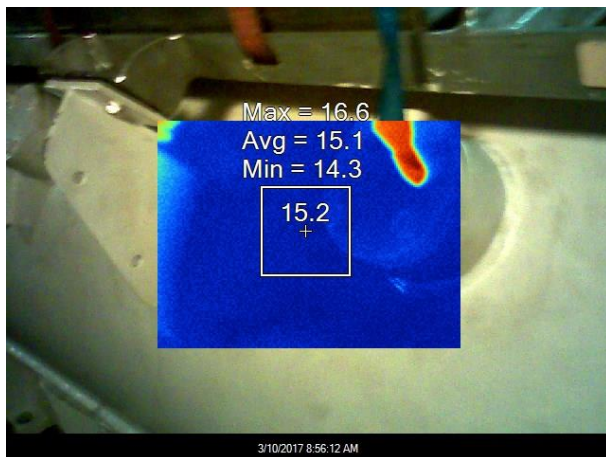
#### 4.5.5.3 Målinger gjort med termisk kamera:

Måling av overflatetemperaturer på dieselmotoranlegg og kjøleanlegg om bord på Ula-Klasse er vist i tabell 4-5.

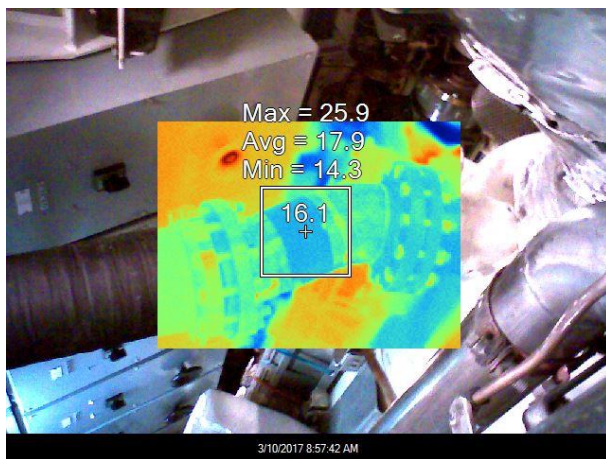
Tabell 4-5 Maskinroms temperatur

<b>Maskinromstemperatur</b>	<b>26 °C</b>
<b>Lyddemper (Figur 25).</b>	15.2°C
<b>Kjølevann ut av lyddemper (Figur 26).</b>	16.1 °C
<b>Eksosledning indre (Figur 27).</b>	95.5 °C
<b>Etter indre eksosklaff (Figur 28).</b>	45.8 °C

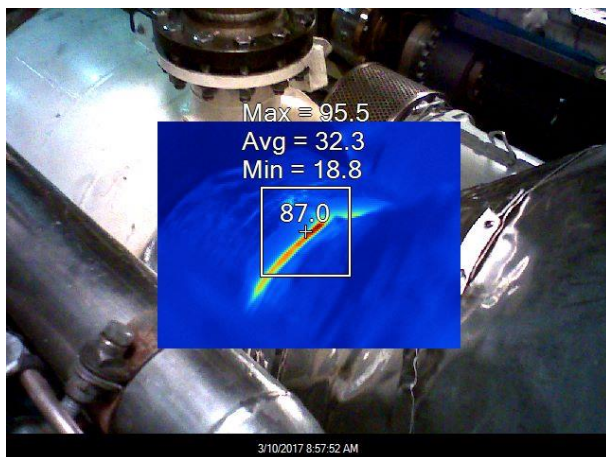
Bilder fra forsøk med IR-kamera Fluke:



Figur 27 Lyddemper overflate



Figur 28 Overflate kjølevann ut av lyddemper.



Figur 29 Eksosledning ut at lyddemper.



Figur 30 Eksosklaff ytterkappe

#### 4.5.8 Diskusjon:

##### 4.5.8.1 Antakelser temperatur over lyddemper (Sjøkjølevann):

Sjøvannstemperaturen ble målt ved innløpet til fartøyet til 8°C. Etter innløpet så deles rørløringen i to. Hoveddelen (ca  $\frac{3}{4}$ ) av sjøvannet går til dieselmotorens varmeveksler (VV-diesel), så videre til lyddemperen og spraykjøling og kappekjøling etter indre eksosklaff. Utfordringen ved varmeoverføringen rundt lyddemperen er sjøkjølevannstemperaturen inn på denne. Vi har et målepunkt ved hoved innløpet før sjøvannspumpen. Altså før sjøvannet går til VV-diesel, men ikke etter denne. Her blir vi nødt til å foreta noen antagelser for at beregningene skal bli mest mulig riktig. Dieselmotoren sitt kjølevann som sirkulerer i VV-diesel holder en temperatur på 75 °C (avlesning maskindagbok), som gjør at sjøkjølevannet som passerer har en viss temperaturøkning. Sjøkjølevannspumpen bidrar også til en viss temperaturøkning i det den passerer gjennom pumpehuset. Dette tas med i bedtraktning når vi skal regne på varmeoverføringen. Siden det ikke finnes et målepunkt for sjøkjølevannet før lyddemperen, blir vi nødt til å anta at sjøkjølevannet inn på denne holder en temperatur på ca 10°C (temp 2 sjø), altså en økning på rundt 2 °C i dette tilfellet.

Ved målepunkt 3 har kjølevannet en temperatur på 15 °C (temp 3 sjø). Her må det tas hensyn til temperaturøkningen i sjøkjølevannet som kommer fra retur brennstoffkjøler, ladeluftkjøler og generatorkjøling, som bidrar til temperaturøkning i sjøkjølevannet. Vi ser derfor at en temperatur økning på 3 grader over lyddemperen kan være fornuftig.

##### 4.5.8.2 Antakelser temperatur over lyddemperen (eksosstrøm):

Ut i fra målingene oppdaget vi at temperaturen ut fra dieselmotoren var på 398 °C, og at temperaturen etter turboladeren var på 330 °C. I tillegg vet vi at mesteparten av eksosen går rett inn i lyddemperen. Vi ser et derfor som en fornuftig antakelse av temperaturen ved inngangen til lyddemperen til å være rundt på 380 °C.

Utgangstemperaturen er på sin side vanskelig å anta. Det vi vet er at temperaturen etter kjøling nummer to er på 65 °C. Ut i fra antakelser gjort på varmeveksleren og diskusjon med teknisk personell i ubåtvåpenet tror vi at temperaturen ut er ca. 225 °C.

#### 4.5.8.3 Usikkerheter:

- Målefeil på utstyret kan være en faktor som vil gi avvik på resultatene.
- Måleinstrument sist kalibrert 22.mai.2008, en stund siden instrument ble kalibrert.
- En annen kilde til målefeil kan være de ulike temperatursensoren i og rundt dieselmotoren. Disse skal være kalibrert de siste 12 mnd.
- Emissiviteten stod på standard innstilling  $e=0.95$  (matt overflate), vi skulle ha justert for blank overflate (ca  $e=0.5$ ). Dette fører til at flaten som var kaldere enn omgivelsene vil vise en høyere temperatur og en flate som er varmere enn omgivelsen vil vise en for lav temperatur.

#### 4.5.9 Konklusjon

Ut i fra diskusjonen konkluderer vi med at temperaturen over varmeveksleren er:

Tabell 4-6 Temperaturfordeling over lydtemper

Navn:	Temperatur inn	Temperatur ut	$\Delta T$
Saltvann	10 °C	13 °C	3 °C
Eksos	380 °C	225 °C	155 °C

Vi velger å forkaste måleresultatene fra IR-kamera av tre årsaker. For det første at varmen på utsiden av eksosledningen på figur 29 ikke er lik eksosvarmen i senter på av massestrømmen, som vi er ute etter. For det andre er ikke instrumentet kalibrert på 8 år, så vi kan anta en viss målefeil. For det tredje var kamera feilinnstilt, vi justerte ikke emissiviteten etter riktig overflate. Disse faktorene er med å påvirke måleresultatet og forkastes derfor.

Forsøket om bord har gitt oss mye relevant data som var nødvendig for videre de beregningene, samt en bedre forståelse av anleggets virkemåte og oppbygning. De forskjellige driftstemperaturene, og parameterne rundt sjøkjølevann og eksosstemperaturer ble gitt ved utskrift av de ulike sensorene fra ubåtens kontroll og overvåkningssystem.



## 4.6 Potensialet til eksisterende lyddemper ved bruk av en termoelektrisk generator.

Dette delkapittelet er en todelt utredelse om potensialet hos den eksisterende lyddemperen ved bruk av en termoelektrisk generator. Første del er å kartlegge varmeoverføring ved hjelp av metode for varmeoverføringsproblem.

1. Dette vet vi: presenter hva som er kjent om problemet.
2. Hva må vi finne: stadfest kort hva som må finnes for å kunne løse problemet.
3. Skisse: Tegn en skisse av systemet, og hvis bevaringslovene skal brukes må kontrolloverflaten presenteres med en stiplet linje, og varmeoverføring skal presenteres med piler.
4. Antakelser: liste med antakelser.
5. Data: innhent nødvendig data
6. Analyse: begynn med
  - a. Bevaringslovene
  - b. Gjør analysen så godt som mulig, før man legger til numeriske verdier
  - c. Nødvendige beregninger
7. Diskusjon: diskuter resultatet med vekt på
  - a. Oppsummering av nøkkel funn
  - b. Kritikk av de første antakelsene
  - c. Hva hvis?
  - d. Sensitivitetsanalyse kalkulering: hvor stor usikkerhet har vi jobbet med?

(Incropera; DeWitt 2002, 25).

Andre del er en utredning om hvordan en mulig installasjon kunne konfigureres.

#### 4.6.1 Dette vet vi:

Det vi vet er at varmeveksleren som er montert på eksosanlegget på dieselgeneratoren har til hensikt å dempe støy og redusere varmen. Vi har ikke kunne måle temperatur inn og ut av varmeveksleren på en tilstrekkelig måte, men vi vet geometriene til varmeveksleren og materialet den er bygget av.

#### 4.6.2 Hva må vi finne:

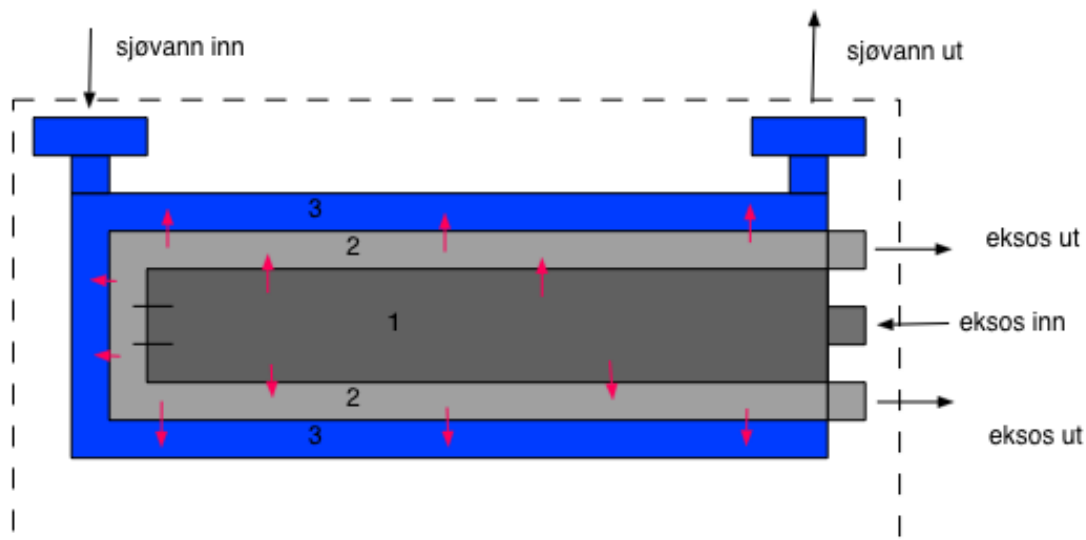
1) Vi må skape oss et bilde over virkemåten til lyddemperen, og hva som gjør den hensiktsmessig til varmeveksling. Under dette vil vi prøve å lage en beregningsmetode som vi kan bruke videre ved beregning av varmeoverføring ved endring i geometriske- og materiellkonfigurasjon.

Dette vil vi gjøre ved:

- først å beregne hvor mye varme som faktisk blir ført vekk fra eksosen over varmeveksleren
- beregne total varmeoverføringsevne til varmeveksleren
- beregne varmeoverføringskoeffisienten og varmeoverføringsevnen til det indre- og ytre eksoskammeret
- beregne varmfordeling og temperaturen gjennom veggene
- sammenligne de beregnede funnene våre med teoretiske tall

#### 4.6.3 Skisse:

Varmeveksleren beskrives som en lyddemper og har til hensikt å redusere varme og lyd. Figur 31 er en skisse av utformingen og virkemåten til varmeveksleren. For oss ser det ut som om eksosen først kommer inn i et indre eksoskammer (merket kammer 1) for deretter å snu og gå ut i et ytre eksoskammer (merket kammer 2). Varmevekslingen skjer mellom det indre og ytre eksoskammeret (kammer 1 og 2) og det ytre eksoskammeret og sjøvannet (2 og 3). Eksosen i det ytre kammeret og saltvannet beveger seg medstrøms.



Figur 31 Illustrasjonsskisse av eksisterende varmeveksler-lyddemper

#### 4.6.4 Antakelser:

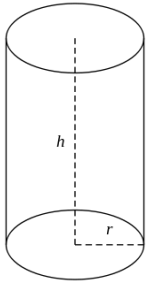
Vi har under gjort en del antakelser, forenklinger og vurderinger etter beste evne for å kunne gjøre gode beregninger på den eksisterende lyddemper.

##### Geometrisk antakelser:

Ut i fra teknisktegning 1 i vedlegg A figur 65 og alternative varmevekslerer i boken *Fundamentals of mass and heat transfer* har vi definert eksisterende lyddemper som en medstrøms konsentrisk-rør-varmeveksler (Incropera; DeWitt 2002, 668).

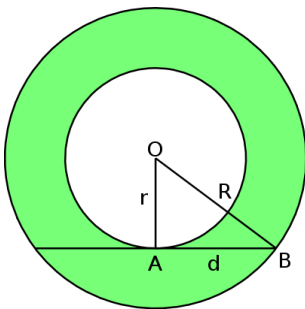
Vi har definert det som en medstrøms varmeveksler selv om inngangen til eksosen og inngangen til sjøvannet er på motsatt side. Vi har valgt dette fordi kontakten mellom veggene til det kalde og varme fluidet ikke er før eksosstrømmen snur til det ytre eksoskammeret, og da går strømmingene medstrøms.

Vi velger i tillegg ut i fra teknisktegning 2 i vedlegg A figur 66 å forenkle varmeutvekslingsarealet mellom det ytre eksoskammeret og kjølevannet, og mellom det indre eksoskammeret og det ytre eksos kammeret til den geometriske formen av en sylinder:



Figur 32 Sylinder hentet fra wikipedia 03.04.2017

Vi ser ut i teknisktegnning 1 figur 65 at strømmingen i det indre eksosrommet foregår gjennom en sylinder, mens strømmingen gjennom det ytre eksoskammeret og strømmingen til saltvannet foregår gjennom det som kalles et ringrom vist i figur 34:



Figur 34 Ringrom - wikipedia 15.04.2017



Figur 33 Bilde av oppskjært eksisterende varmeveksler

### Strømningsantakelser:

For å beregne hvor massen som strømmer gjennom av eksos og saltvann må vi benytte oss av endel forenklinger. Dette fordi vi ikke har mulighet til å måle massestrømmene til saltvann- og eksosstrømmingen.

### **Massestrøm eksos:**

For å beregne massestrømmen til eksos sier vi at:

- Massestrøm inn = massestrøm ut,  $M_{fuel} + M_{luft} = M_{eksos}$
- ingenting går ut andre steder enn til eksosen, dvs. alt som går inn kommer ut ved eksosen.
- støkiometrisk luft behov for diesel = 14,5 kg luft pr. kg diesel (Lundby 2011, 27).
- og deretter velger vi å sette luftfaktoren ( $\lambda$ ) til 2 (Lundby 2011, 27).

### **Massestrøm saltvann:**

For å beregne massestrøm til saltvannet, har vi fra tekniske data og tegninger utlevert av Ubåtvåpenet presentert i vedlegg H, lest av at pumpen leverer 18 l/s ved 1500 rpm, og motoren sitt turtall på normalbelastning er 1800 rpm. Vi har deretter brukt affinitetslovene

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \rightarrow \dot{m}_2 = 21,6 \text{ l/s}$$

og er videre omgjort fra l/s til kg/s ved hjelp av tettheten. Denne tilnærmingen er gjort på grunn av at 18 l/s mest sannsynlig er en ideell levering fra leverandør, og vi har ingen preferanser om hva den vil levere nå. Vi har ikke satt oss inn i pumpekarakteristikk eller gjort noen andre målinger.

### Generelle forenklinger:

- Endimensjonal varmestrøm
- Neglisjerer endring i potensiell og kinetisk energi
- Velger stasjonær strømming (Incropera; DeWitt 2002, 647).
- Konstant  $C_p$  over hele prosessen utregnet fra en middeltemperatur.

(Dette fordi en av endring av spesifikk varmekapasitet og konstant varmeoverføringskoeffisient ofte er så lite signifikante at en middelvei er en rimelig antakelse, dette forutsetter at fluidet ikke gjennomgår et faseskifte (Incropera; DeWitt 2002, 648-649))

- Velger konstante verdier (middeltemperatur) for gitte arbeidsperioder/turtall og last.
- Ved beregning av den totale varmeoverføringsevnen (UA) bruker vi logaritmiskmiddeltemperatur ( $dT_{lm}$ ) og da sier vi også at det eneste som varmer opp kjølevannet er eksosen, men det vil jo også bli påvirket av omgivelsene.
- Beregner med luft i stedet for eksos, fordi vi har gode data på luft og det er en god tilnærming som er anbefalt av faglærer Gisle Strand.
- Velger å neglisjere strålingsvarme
- Data for saltvann er hentet fra internett

Velger at  $\overline{NuD} \approx NuD, fd$ , fordi vi ikke vet nok om strømningsforløpet og ved turbulentstrømmingen er inngangsforholdene neglisjerbare

Det er regnet med et annet trykk enn det faktiske trykket som er noe høyere, vi velger å arbeide med 1 atm

- Hvis vi velger at  $T_m = T_{\infty,1}$ , og at  $\dot{Q}_{eksos}$  er hele varmeoverføringen gjennom sylindere, blir temperaturfordeling gjennom sylindere slik en kombinasjon av formel 4.38.

-  $\dot{Q}_{eksos}$  er hele varmeoverføringen gjennom sylindere

#### 4.6.5 Data:

Vi har hentet inn data på tre forskjellige måter. For det første har vi gjennomført et forsøk for å kartlegge temperaturendringen til kjølesløyfen (saltvannssløyfen) og varmesløyfen (eksossløyfen) vist i figur 25. Forsøket ble gjennomført om bord i ubåten ved hjelp av overvåkningssensorer som brukes i vanlig drift og et IR-kamera lånt fra Sjøkrigsskolen. For det andre har vi sett i maskindagbøker, maskintestbenkkjøring, vedlikeholds rapport, sett på tegninger og snakket med teknisk personell for å skape oss et bilde av drivstofforbruk og virkemåte av anlegget. For det tredje har vi brukt fagbøker, snakket med fagpersonell og lest på nettsider.

Ut i fra tekniske tegninger har vi etter beste evne lest av mål på varmeveksleren:

Tabell 4-7 Tekniskdata på lydtemper tatt fra Vedlegg A figur 65.

Navn	Diameter [m]
Dindre eksos, innside ( $D_{iei}$ )	0,44
Dindre eksos, utside ( $D_{ieu}$ )	0,446
Dytte eksos, innside ( $D_{yei}$ )	0,491
Dytte eksos, utside ( $D_{yeu}$ )	0,497
Dsjøvann, innside ( $D_{si}$ )	0,538
Diameter lydtemper utside ( $D_{su}$ )	0,6

Tabell 4-8 Tekniskdata på lydtemper tatt fra prinsippkisse 2.

Navn	Lengde [m]
Lengde sylindere, ytre eksos	2,965
Lengde sylindere, indre eksos	1,75
Lengde hele varmeveksleren	3,1

Tabell 4-9 Tekniskdata på lydtemper tatt fra vedlegg A figur 66.

Verdier fra Vedlegg A – Sertifikat for lydtemper figur 66	Verdi [Enhet]
maksekstempertur	540 [°C]
trykk vannstrøm inn/ut	9 [bar]
trykk eksosstrøm inn/ut	4 [bar]
vekt tom varmeveksler	1090 [kg]
tillegg av vann	125 [kg]

Fra forsøket beskrevet i 4.5 om bord på ubåten er følgende verdier beregnet.

Tabell 4-10 Verdier målt ved forsøk ombord på ULA-klassen

Beregnet middelverdier fra forsøk i 4.2	[°C]
Inngangstempertur saltvann	10
Utgangstempertur saltvann	13
Inngangstempertur eksos	380
Utgangstempertur eksos	225

Beskrivelse på hvor noen utvalgte data er funnet.

Tabell 4-11 Relevante data fra forsøket

Beskrivelse:	Hentet fra:
<p>materiale til lydtemperen er: 1.4435 X2CrNiMo 18-14-3. Det vil si; Rustfritt austenittstål, krom nikkell molyb-denum stål med lavt karboninnhold.</p> <p>Vi har valgt å bruke verdier for rustfrittstål</p>	<p>Vedlegg B tabell 8-1 – Sertifikat til lydtemper</p> <p>(Incropera; DeWitt 2002, 907)</p>
<p>Data for eksosstrømmen har blitt endret til luft lest av ved 1 atm og lest av ved middeltemperatur (T<sub>m</sub> 302,5 °C)</p>	<p>(Incropera; DeWitt 2002, 917)</p>

Data saltvannet er tatt ut i fra middeltemperatur (T <sub>m</sub> = 11,5) °C: ρ <sub>saltvann</sub> , μ <sub>saltvann</sub> og cp	(5.mars 2017) <a href="http://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html">http://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html</a>
ksaltvann: konduktivitet saltvann	(6.mars 2017) <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Saline_water">https://en.wikipedia.org/wiki/Saline_water</a>
Prsaltvann :Prandtlnr. For saltvann	(2.05.17) <a href="http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html">http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html</a>

Med bakgrunn i tabell 4-11 som viser kildene til dataene så er funnen presentert i tabell

Tabell 4-12 Verdier hentet fra tabell 4-11 avhengig av målt middeltemperatur ved 1 atm

Hva	Verdi	Enhet
Avhengig temperatur saltvann(T <sub>m</sub> )	11,5	[°C]
Avhengig temperatur eksos (T <sub>m</sub> )	576	[K]
ρ,luft	0,5804	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ,saltvann	1027	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ,diesel	835	[kg/m <sup>3</sup> ]
μ,luft	0,00003058	[Ns/m <sup>2</sup> ]
μ,saltvann	0,00135	[Ns/m <sup>2</sup> ]
Pr,saltvann	9,835	[]
Pr,luft	0,685	[]
k,saltvann	0,6	[W/(m * K)]
k,luft	0,0469	[W/(m * K)]
k,termoelektrisk-element	2,5	[W/(m * K)]
k,rustfritt stål	20	[W/(m * K)]
Cp,luft	1,051	[kJ/kg * K]



Cp,saltvann	4,003	[kJ /kg * K]
R''f,eksos	0,00176	[(m <sup>2</sup> * K) /W]
R''f,saltvann	0,0001	[(m <sup>2</sup> * K) /W]

#### 4.6.6 Analyse:

I denne analysen av varmeveksleren er hensikten å finne ut av hvor mye varme som forsvinner fra eksosen og hvor mye varme som blir tilført saltvannet. Det er fordi vi vil bruke dette som et sammenligningsgrunnlag for videre beregninger.

Vi bruker derfor først bevaringslovene, og som vi allerede har nevnt har vi neglisjert endring i potensiell og kinetisk energi. Vi går derfor videre og bruker entalpibalansen:

$$\dot{Q}_h = m_h * C_{p_h}(T_{h_i} - T_{h_o})$$

*Formel 4.20 Entalpibalansen for eksos.*

$$\dot{Q}_c = m_c * C_{p_c}(T_{c_i} - T_{c_o})$$

*Formel 4.21 Entalpibalansen for saltvann.*

(Incropera; DeWitt 2002, 648)

Henholdsvis  $\dot{Q}_h$  og  $\dot{Q}_c$  er eksosen og saltvannet som strømmer gjennom varmeveksleren. Hvis, vi neglisjerer varmetap til omgivelsene så skal  $\dot{Q}_h = \dot{Q}_c$ , men dette er jo selvsagt ikke tilfellet. Det vil både bli tilført varme fra maskinrommet til kjølemediet og avgitt varme fra eksosen til maskinrommet.

I tillegg benytter vi oss av en annen formel for varmeoverføring som består av varmeoverføringsevnen (UA) og  $(dT_{lm})$

$$\dot{Q} = UA * dT_{lm}$$

*Formel 4.22 Varmeoverføring.*

(Incropera; DeWitt 2002, 650)

Logaritmiskmiddeltemperatur er spesifikk for type strømning, og en medstrøms-varmeveksler blir da:

$$dT_{lm} = \frac{dT_1 - dT_2}{\ln\left(\frac{dT_1}{dT_2}\right)}$$

Formel 4.23 Logaritmiskmiddeltemperatur.

$$dT_1 = Th_i - Tc_i$$

$$dT_2 = Th_o - Tc_o$$

(Incropera; DeWitt 2002, 651)

Snur vi rundt på formelen for varmeoverføring, og kjenner inngang-/utgangstemperaturene og varmestrømmen kan vi regne ut varme overføringsevnen.

$$UA = \frac{\dot{Q}}{dT_{lm}}$$

Formel 4.24 Overføringsevnen.

Vi har så langt funnet ut hva den faktisk totale varmeoverføringsevnen til varmeveksleren ved gitt strømning og temperatur er. Vi vil nå teoretisk prøve å komme frem til en varmeoverføringsevne som er relativt lik den faktiske slik at når vi teoretisk legger til det termoelektriske-moduler vil den teoretiske tilnærmingen tilsvare den faktiske.

#### 4.6.6.1 Beregning av varmeoverføringskoeffisienten:

Det er tidligere presentert den samlede varmeoverføringskoeffisienten (U) som består av termiske konduktiviteten (k) og varmeoverføringskoeffisienten (h). Den termiske konduktiviteten til materialet er relativt lett å lese av i tabell. Det som krever et større arbeid er å kartlegge strømningsbildet og derav varmeoverføringskoeffisienten (h).

For å kunne regne ut konveksjon, og til slutt beregne en varmeoverføringskoeffisient (h) følger vi en utregning metodologi beskrevet i *fundamentals of heat and mass transfer*:

- Hva er strømningsgeometrien?
- Hva er temperaturene derav fluid parameterne?
- Hvilke strømningsforhold er det? - Finne reynoldstallet, og deretter bestemme om det er laminær eller turbulent strømning
- Fastsette en lokal- eller overflatekoeffisient
- Og deretter velg korrekt korrelasjonsfaktor

(Incropera; DeWitt 2002, 399-400)

For å kunne beregne varmeoverføringskoeffisienten starter en med strømningsgeometrien. For strømmingen i eksos- og saltvannsrøret kan en betegne strømningsgeometrien som et ringrom. Vi kan da bruke formlene for sirkulære rør, men med hensyn til annen utforming, og bruker da det som kalles hydraulisk diameter. Hydraulisk diameter skal brukes til  $ReD$  og  $NuD$  (Incropera; DeWitt 2002, 495), og formel 33 er for hydraulisk diameter  $D_h$  i et ringrom:

$$D_h = D_o - D_i$$

*Formel 4.25 Hydraulisk diameter for ringrom.*

(Incropera; DeWitt 2002, 501)

Strømmingen i det indre eksosrøret går gjennom et sirkulært rør og derfor kan vi bruke formelen for et sirkulært rør, som resulterer i at den hydrauliske diameteren blir:

$$D_h = D$$

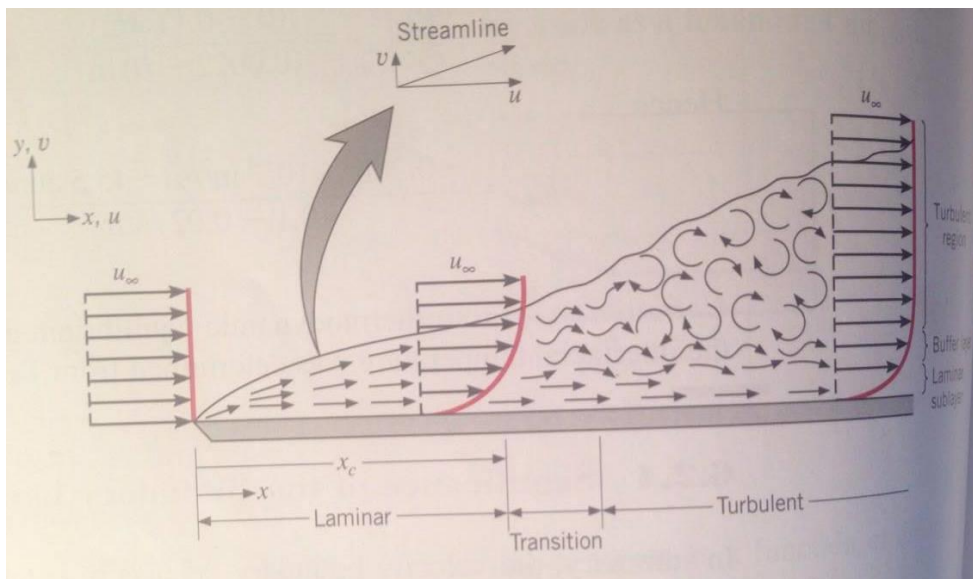
*Formel 4.26 Hydraulisk diameter til sirkulært rør.*

(Incropera; DeWitt 2002, 467)

Når strømmingene skal beregnes må to spørsmål besvares.

- er strømmingen laminær eller turbulent?
- er strømmingen i en inngangs fase eller er den fullt utviklet?

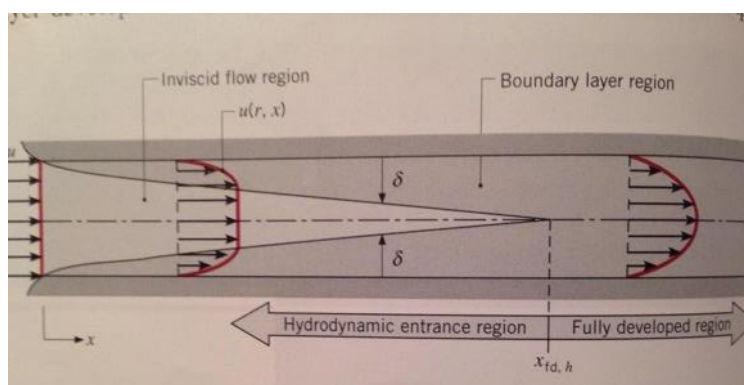
Om strømmingen er laminær eller turbulent er essensielt i forhold til overflatefriksjonen og konveksjonsvarmeoverføringen. Figur 25 viser at det er stor forskjell mellom strømningsbilde ved turbulent og laminær strømming (Incropera; DeWitt 2002, 336).



Figur 35 Viser forskjell mellom strømningsbilde ved turbulent og laminær strømming (Incropera; DeWitt 2002, 336)

Figur 35 viser at ved laminær strømming er strømningsbildet relativt forutsigbare og rett, mens den turbulente er uforutsigbare og svingete. Svingningen i den turbulente strømmingen er fordelaktig for varmeoverføring ved konveksjons (Incropera; DeWitt 2002, 337).

Om strømmingen er i inngangsfasen eller fullt utviklet er avgjørende fordi det oppstår en viskøs effekt når en strømming kommer i kontakt med rørveggene. Dette fører til lagsjiktet og hvor lenger strømmingen kommer inn i røret desto mer endres hastighetsprofilen. Figur 36 viser med at endringen fra en uniform hastighet når den beveger seg lengre inn i røret – her er det viktig å påpeke at figuren er av laminær strømming, og at dette er mest fremtredende da, men nytten er der fordi turbulent strømming utvikler seg også pga. den viskøse effekten (Incropera; DeWitt 2002, 466).



Figur 36 Hastighetsprofil i rør (Incropera; DeWitt 2002, 466).

Når hastighetsprofilen ikke lenger endrer seg, betegner en strømmingen som fullt utviklet. Som en generell regel kan en betegne strømmingen som fullt utviklet for turbulent strømming, hvis:

$$\frac{x}{D_h} > 10$$

*Formel 4.27 Turbulent strømming.*

dvs. at fra lengden  $x > 10 * D_h$  vil strømmingen være fullstendig turbulent og formelen vil være gyldig.

Formelen er gjort ved antakelsen at strømmingens innløp har en sirkulær form (Incropera & DeWitt 2002, 467).

### **Strømningsforhold - gjennomsnittlig Reynoldstall:**

Reynoldstall for et konsentrisk rør blir ved bruk av hydraulisk diameter slik:

$$\overline{\text{ReD}} = \frac{(\rho * \bar{v} * D_h)}{\mu}$$

*Formel 4.28 Reynoldstall for et konsentrisk rør.*

(Incropera; DeWitt 2002, 467)

Reynoldstallet over 2300 vil gi turbulent strømming, mens reynoldstall over 10 000 gir fullt utviklet turbulens forhold (Incropera; DeWitt 2002, 467).

Deretter bruker en det som kalles Nusselnummeret ( $N_u$ ), og da gjerne det gjennomsnittlige Nusselnummeret ( $\overline{N_u D}$ )

$$(\overline{N_u D}) = \frac{h * D_h}{k}$$

*Formel 4.29 Gjennomsnittlige Nusselnummeret.*

(Incropera; DeWitt 2002, 502).

Nusselnummeret gir oss et mål på konveksjons-varmeoverføringen som foregår på overflaten. Når vi har funnet Nusselnummeret løser vi ut varmeoverføringskoeffisienten:

$$h = \frac{\overline{NuD} * k}{D_h}$$

Formel 4.30 Varmeoverføringskoeffisienten løst med Nusselnummeret.

Deretter er det anbefalt for ringrom å bruke Reynolds- og Prandtlnummer ( $P_r$ ) med Dittus-Boelter ligning (Incropera; DeWitt 2002, 502)

$$(\overline{NuD}) = 0,023 * (\overline{ReD})^{4/5} * P_r^n$$

Formel 4.31 Dittus-Boelter ligning

$n=0,4$  for  $T_s > T_m$  (varming)

$n=0,3$   $T_s < T_m$  (kjøling)

Denne ligningen er god å bruke for analysen av turbulente forhold, og under forholdene har den eksperimentelt blitt bekreftet (Incropera; DeWitt 2002, 491).

$$0,7 \leq P_r \leq 160$$

$$ReD \geq 10\ 000$$

$$\frac{L}{D_h} \geq 10$$

Formel 4.32 Analyse av turbulent forhold.

Det er viktig å peke at det kan forekomme feil opp til så mye som 25% med denne metoden (Incropera; DeWitt 2002, 492).

En annen formel for å beregne det gjennomsnittlige Nusselnummeret ( $\overline{NuD}$ ) for ikke-sirkulære rør er Petukhov sin formel. Denne kan brukes til å sammenligne resultatet med Dittus-Boelter ligningen for å bygge opp under beregningene våre:

$$\overline{NuD} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \overline{ReD} * P_r}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (P_r^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

Formel 4.33 Gjennomsnittlig Nusselnummeret - Petukhov ligning.

$$f = (0,790 \ln \overline{ReD} - 1,64)^{-2}$$

Petukhov ligningen er gyldig for:

$$0,5 < Pr < 2000$$

$$10^4 < ReD < 5 * 10^6$$

Formel 4.34 Petukhov ligning er gyldig i henhold til forholdene.

(Incropera; DeWitt 2002, 492)

### Inngangsforhold:

Fordi inngangslengde til turbulent strømning ofte er kort er det ofte rimelig å si at:

$$\overline{NuD} \approx NuD, fd$$

Formel 4.35 Nusselnummeret ved turbulent strømning.

(Incropera; DeWitt 2002, 492)

### Temperaturfordeling fra senter av eksosen og gjennom sylinderveggen:

For å finne temperaturfordeling gjennom sylinderveggen på varmeveksleren bruker vi formel 4.36, med hensyn på geometrien til en sylinder, og derfor kombinert med 4.37:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{tot}}$$

Formel 4.36 Total termisk resistans sammen med varmestrøm og grense temperatur.

og:

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{(\pi * d_1 * L * h_1)} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2 * \pi * k_A * L} + \frac{\ln(d_3/d_2)}{2 * \pi * k_B * L} + \frac{1}{(\pi * d_3 * L * h_2)}}$$

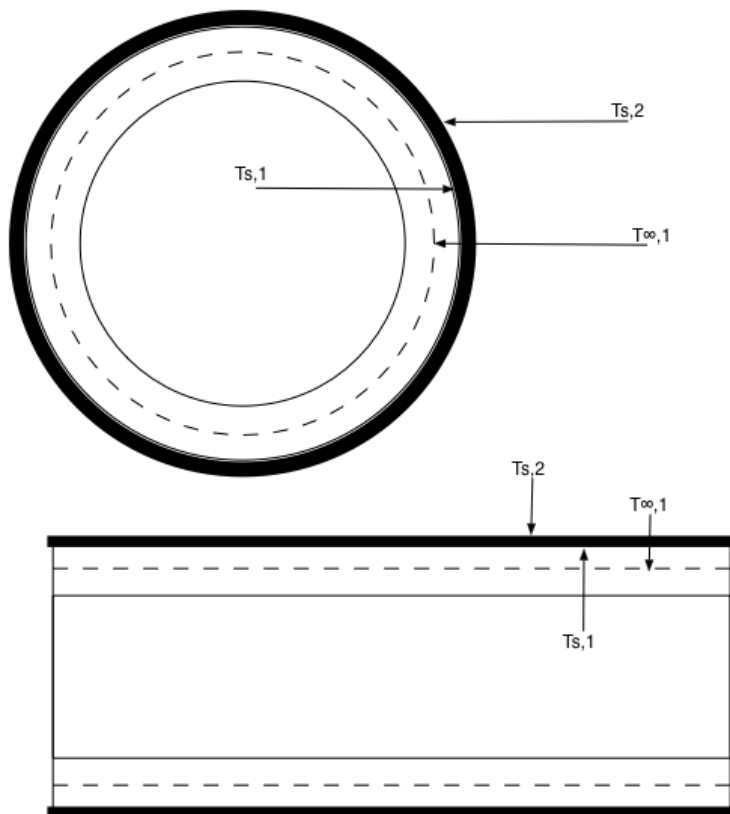
Formel 4.37 Samlet varmeoverføringsevne til en sylinder.

Temperaturfordeling gjennom sylindere blir da:

$$T_{s1} = T_{\infty 1} - \left( \frac{\dot{Q}}{A_1 * h_1} \right) = T_{\infty 1} - \left( \frac{\dot{Q}}{\pi * d_1 * L * h_1} \right)$$

$$T_{s2} = T_{s1} - \left( \dot{Q} \frac{\ln(d_2/d_1)}{2 * \pi * k_A * L} \right)$$

Formel 4.38 Temperaturfordeling gjennom sylindere



Figur 37 Varmefordeling gjennom sylindrer skall

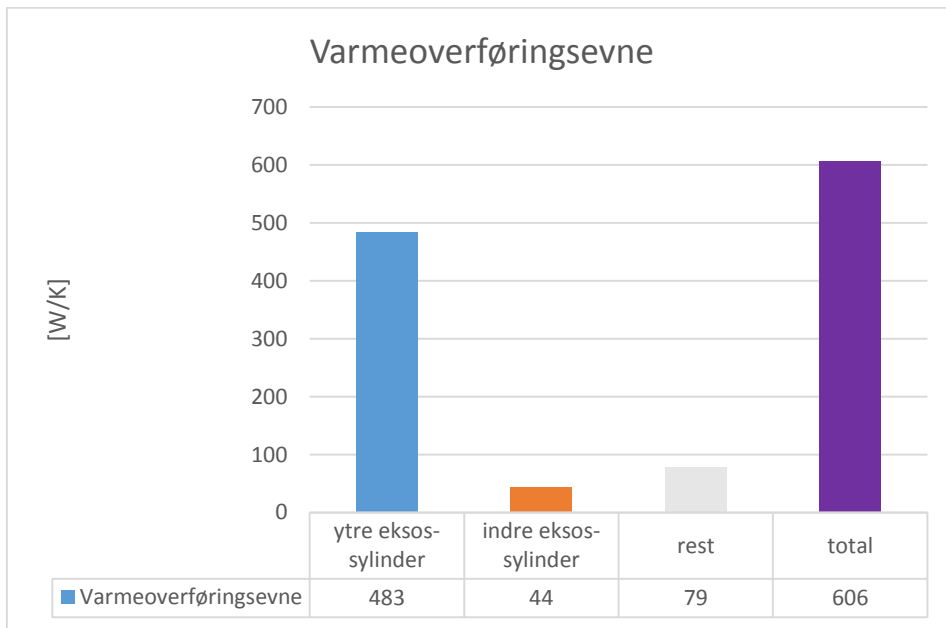
Velger  $T_{\infty,1} = (T_{\text{eksos inn}} + T_{\text{eksos ut}}) / 2$

#### 4.6.7 Resultater

Fremgangsmåten for beregningene er nå blitt presentert og forklart. Alle beregninger er gjort i Excel i vedlegg D. Resultatene fra Vedlegg D presenteres nå grafisk. I tillegg er det brukt andre metoder for beregning av varmeoverføring for å kvalitets sikre arbeidet og resultatene som også presenteres.



#### 4.6.7.1 Varmeoverføringsevne og temperaturfordeling gjennom ytreesoskammer

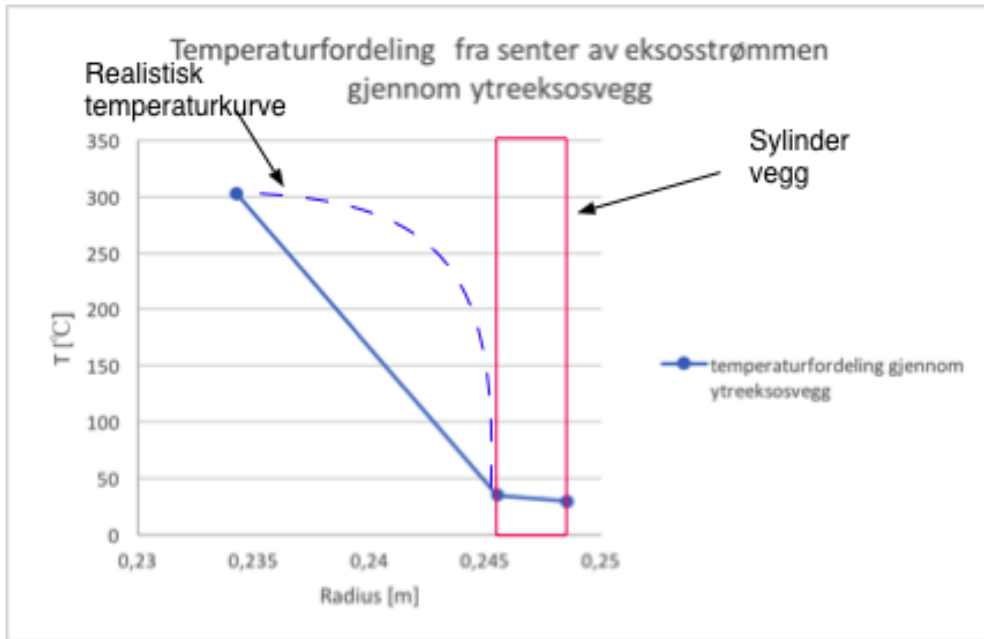


Figur 38 Sammenligning av hvordan varmeoverføringsevne er presentert grafisk.

Figur 38 presenterer resultatene av teoretisk beregnet oversikt av hvilke deler som prosentvis overfører mest varme. Resultatene viser at største delen av varmen blir overført gjennom veggen til ytre eksoskammer.

Figur 39 presenterer temperaturfordeling fra midten av eksosstrømmen i det ytreesos-sylinderkammeret gjennomveggen. Temperaturen er en middeltemperatur mellom utgang og inngang.

På grunn av mangel av målepunkter har er det tegnet inn en mer realistisk temperaturfordeling (stiplet linje).



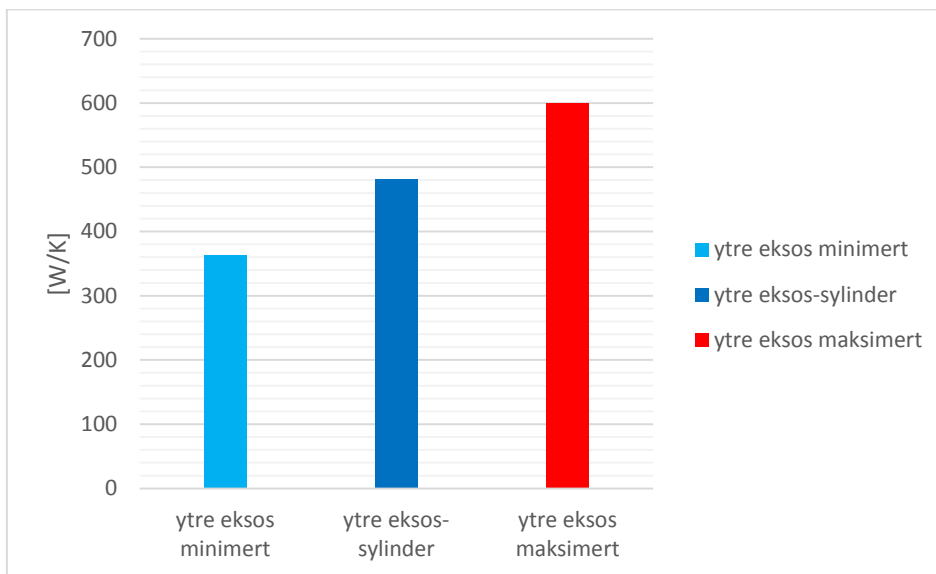
Figur 39 Temperaturfordeling fra senter av eksosstrømmen

Til figur 39 er det brukt varmeoverføringskoeffisienten med et tillegg på 25% for ikke å få en negativ temperatur. Det tyder på at enten er varmeoverføringskoeffisienten høyere eller så er temperaturen ut av lydtemperen høyere enn den antatte temperaturen på 225 °C.

#### 4.6.7.2 Bruk av andre metoder for kvalitetssikring av resultater

Beregningene skal nå kvalitetssikres med å bruke flere metoder.

##### 4.6.7.2.1 Usikkerheten til de teoretiske beregningene:



Figur 40 Grafisk fremstilling av usikkerheten til de teoretiske beregningene

Figur 40 viser den minimale og maksimale usikkerheten i beregningsmetodene i seg selv. Funnene viser at avstanden mellom grensene er ganske stor, og for å tilspisse beregningene bør det gjøres forsøk.

#### 4.6.7.2.2 Total varmeoverføringskoeffisient sammenligning:

Ulike varmeoverføringskoeffisienter er hentet fra internett i den hensikt å sammenligne de mot de vi har beregnet. Dette gir en indikasjon på om beregningene våre er sannsynlige og mulige.

Tabell 4-13 Funn av samlet varmeoverførings koeffisient

Verdi:	Beskrivelse:	Hentet fra:
$U = 10 - 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gas coolers)	Forced Convection (flowing) Gas - Forced liquid (flowing) water	<a href="http://www.engineeringtoolbox.com/">http://www.engineeringtoolbox.com/</a>
$U=15-70 \text{ W/m}^2\text{K}$	Gass ved atmosfæretrykk og vann	<a href="http://www.engineersedge.com/">http://www.engineersedge.com/</a>
$U=20-300 \text{ W/m}^2\text{K}$	Gass-vann	<a href="http://www.engineeringpage.com/">http://www.engineeringpage.com/</a>
$U=100 \text{ W/m}^2\text{K}$	Gass-vann	(Incropera; DeWitt 2002, 669)
$U = 10 - 30 \text{ W/m}^2\text{K}$	Forced Convection (flowing) Gas - Forced Convection Gas	<a href="http://www.engineeringtoolbox.com/">http://www.engineeringtoolbox.com/</a>

Samlet varmeoverføringskoeffisient beregnet:

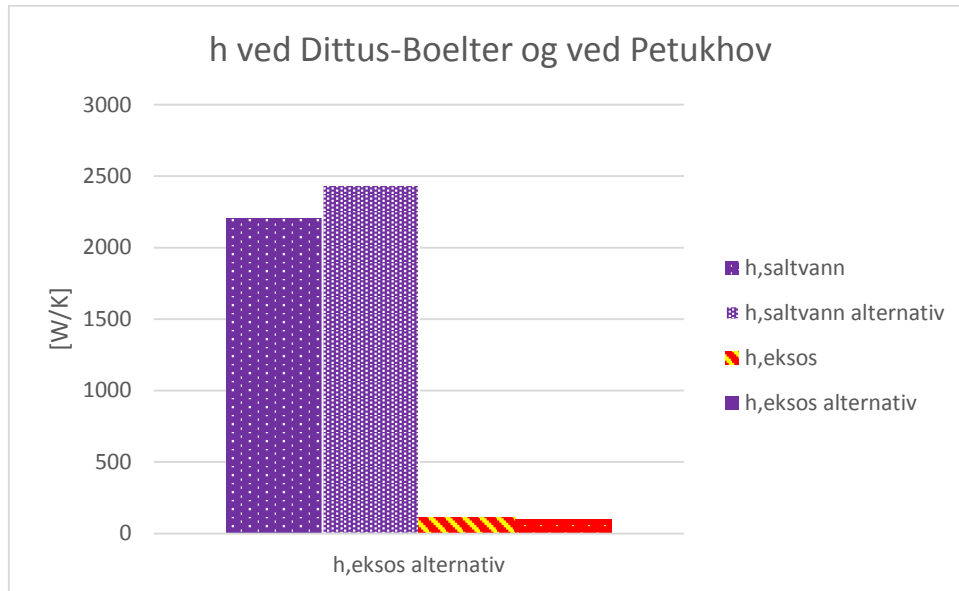
Tabell 4-14 Beregnet samlet varmeoverføringskoeffisient

Samlet varmeoverføringskoeffisient	[W/(Km <sup>2</sup> )]
U ytre sylinder	101
U ytre sylinder + 25%	124
U ytre sylinder - 25%	77
U sammenligning ytre sylinder	88
U,liten sylinder	18

Ved å sammenligne verdiene beregnet i tabell 4-14 og verdiene hentet fra nettet i tabell 4-13 kan en konkludere med at verdiene er plausible. Dette fordi de er relativt like som de som er hentet fra bøker og internett og innenfor de gitte intervallene.

#### 4.6.7.2.3 Varmeoverføringskoeffisient sammenligning

Det er brukt to forskjellige metoder Dittus-Boelter- og Petukhov-metoder for å beregne varmeoverføringskoeffisienten ( $h$ ) for saltvann og eksos. Resultatene fra disse metodene er grafisk fremstilt i figur 40.



Figur 41 Sammenligning av varmeoverføringskoeffisienten til saltvann og eksos ved Dittus-Boelter og Petukhov-metodene

Resultatene fra figur 41 viser at de to forskjellige metodene gir tilsvarende likt resultat. Det styrker gjennomføringen av beregningene våre – at beregningene er gjort korrekt fordi resultatet er relativt likt.

#### 4.6.8 Oppsummering av nøkkel funn

Det er gjort to funn vedrørende varmeveksleren, og to funn vedrørende validering av beregningsmetoden og resultatene.

For det første viser beregningene at hoveddelen av varme blir overført mellom ytreesoskammer og saltvannet, dette begrunnes med størst varmeoverføringsevne og størst temperaturdifferansen mellom fluidene.

For det andre viser varmedifferansen mellom senter av varmestrømmen til veggen at den er stor. Dette blir interessant å undersøke ved en installasjon av TEG, og som helt klart er en avgjørende faktor.

For det tredje presenteres maksimal og minimal varmeoverføringsevne, noe som gir en indikasjon på usikkerheten til beregningen av varmeoverføringsevnen – usikkerheten må videreføres i andre beregninger.

For det fjerde ligger verdiene til varmeoverføringskoeffisientene fra resultatene i område som funn fra nettsider vist mellom tabell 4-13 og 4-14, og boken *Heat and Mass transfer*, dette styrker validiteten til resultatene våre. I tillegg er differansen mellom beregnet varmeoverføringskoeffisient ved Dittus-Boelter og Petukhov ikke altfor stor, noe som tyder på at beregningene virker plausible. Det er viktig å presisere at når de samme dataene puttes inn, så blir det feil ved begge beregningsmetodene som viser at resultatene fra beregningen ikke er en tilfeldighet.

#### *4.6.8.1 Konklusjon:*

Derfor vil vi i konklusjonen ta med fire momenter. For det første at hoveddelen av varmen blir overført fra det ytre eksoskammer. For det andre at temperaturfallet fra senter av eksosstrømmen gjennom eksosveggen er relativt høy og må utforskes nærmere ved integrasjon av TEG-moduler. For det tredje at vi har jobbet med en del usikkerhet. For det fjerde at de teoretiske beregningene ikke er så verst.

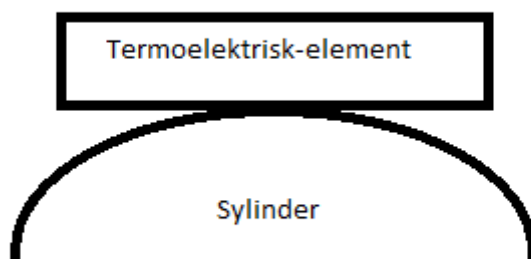
#### 4.7 Utredning av mulig integrasjon på eksisterende lyddemper

Dette er da en litteraturstudie og det vil dermed ikke bli laget en prototype. Likevel skal oppgaven vurdere installasjonsmulighetene. Disse installasjonsmulighetene er basert på gruppens kreativitet, i tillegg til tips og råd fra lærere samt fagmenn i næringslivet.

Installasjonsutredelsen vil begrenses til å se på hvordan en ville installert de termoelektriske materialene. Ved dette kan gruppen da beregne hvordan strømmingsbilde vil forandre seg, hvordan påvirkes og endres kjølingen og lyddempingen ved installasjon av termoelektrisk-element. Det vil ikke bli gjort noen utredelse for tilkobling til eksisterende batteri. Dette delkapittelet vil utrede om ulike løsninger og materialvalg, mens valg av løsning og materiale vil være i diskusjonskapittelet 5.2.

Fra avsnitt 4.6.7.1 med figur 38 ser en at størst varmeoverførings evne finnes i ytre eksos kammer. Det vil derfor være hensiktsmessig å plassere den termoelektriske generatoren i indre sjøvannskammer fordi størst mulig temperaturdifferanse vil gi mest energi (Goldsmid 2016, 16)

I avsnittet om modul design er det beskrevet at med dagens teknologi vil det ikke være mulig med en annen geometrisk form enn kvadratisk hos de termoelektriske-elementene. Det vil si at hvis en installerer kvadratiske termoelektriske moduler på en sylinder vil det slik ut som i figur 42.



Figur 42 Prinsippskisse av kontaktflate

Sylindere må derfor tilpasses slik at en får en plan kontaktflate med kun metall til metall som er i kontakt. Kontaktflaten som skal være mellom sylinder og de termoelektriske-modulene må ha høyest mulig termisk konduktivitet for å minske virkningsgraden til installasjonen av

termoelektriske-element. Hvis et mellomrom fylles av luft vil en mistet mye varmeoverføring fordi luft har en lav termisk konduktivitet i forhold til metaller (Tollefsen 2017). Det første som ble tenkt på var å maskinere en plate eller en slags foil som kunne legges rundt sylindere som resulterte i en plankontaktfalte til den termoelektriske generatoren. Dette skapte to spørsmål hos gruppen.

1. Er det mulig å maskinere en så tynn plate etter våre geometriske spesifikasjoner
2. Hvis mulig, hvilket materiale vil dette være, og hvilket vil være mest gunstig. Gruppen definere gunstig materiale som:
  - a. Høy termisk konduktivitet
  - b. Levetid med tanke på korrosjon
  - c. Tilgjengelighet-pris

Etter tips fra vår faglærer Gisle Strand tok gruppen kontakt med Størksen Rustfritt Industri som er eksperter på rustfritt stål. Intensjonen med dette møtet var å få svar på de to spørsmålene over.

Fra dette møtet fikk vi vite at Størksen Rustfritt Industri ikke hadde mulighet til å maskinere en slik plate med vannskjæring<sup>10</sup> slik de er eksperter på. Dog blei vi fortalt om at en CNC maskin<sup>11</sup> skulle kunne klare å spenne dette fast i maskinen og maskinere ut de geometriske formene på platene som vi skulle ønske. I tillegg blei en alternativ løsning presentert; å slipe sylindere til å få en flatanleggsflate. Disse to løsningene å maskinere en plate eller å slipe en flatanleggsflate på sylindere.

#### 4.7.1 Løsning en - Maskinere en 24-kant plate.

Målet er å konstruere en plate som skal passe geometrisk om sylindere, i tillegg til å ha en flat overflate. På høsten 2016 fikk maskinklassen opplæring i et tegneprogram Solidworks. Dette har blitt benyttet for å tegne inn installasjonen med eksakte verdier, samt lage figurer og illustrasjonsbilder over vårt design.

---

<sup>10</sup> Vannskjæring kutter stål med vann (Næss 2009).

<sup>11</sup> CNC-maskin – Computer Numerical Control er om maskin som ved bruk av en datamaskin kan konstruere mange, like og komplekse metalleder eller andre materialer (Eriksen 2009).

Fra møtet med Størksen Rustfritt Industri blei det foreslått en 16-kant plate. Denne er økt til 24-kant fordi det er 24 kjølevannsribber og tanken er å plassere anleggsflaten og de termoelektriske-elementene mellom. Figur 43 viser kjølevannsribbene. Spesifikasjonene til denne platen er at den må være tynn og ha høy termisk konduktivitet. Fra Størksen Rustfri Industri fikk vi bekreftet at det er mulig å maskinere en slik plate så tynn i en CNC-maskin. Dermed blir neste utfordring å finne et egnet materiale.



*Figur 43 Kjølevannsribbene til eksisterende lyddemper - rapport lyddemper*

Fra møte med Størksen Rustfri Industri fikk vi tips til at en legering av kobber-nikkel eller et slags titan kunne være optimalt med tanke på den løsningen vår med en plate formet til sylinder og en flat overflate. Dette ble da utgangspunktet i vår jakt etter det materialet som ville være mest gunstig for vårt bruk. Det ble brukt tre bøker i denne undersøkelsen; «Materials Science and Engineering», «Materials selection in mechanical design» og «Materials, engineering, science, processing and design». Det vil bli utredet om legeringene kobber-nikkel og titan, i tillegg til en kort forklaring på hvordan andre legeringer ikke er blitt utredet om.

Under er det eksempler på metaller og legeringer som kunne vært aktuelt å bruke med en kort forklaring på hvorfor de ikke er det.

### **En kort forklaring på hvorfor mulige legeringer ikke er utredet om:**

- Aluminium har en smeltetemperatur på 660°C, noe som er litt for lavt med tanke på at driftstemperatur på lyddemperanlegget er rundt 400 °C (Ashby 2017, 583).
- Magnesium ganske lik aluminium når det kommer til smeltetemperatur på rundt 651 °C (Callister; Rethwisch 2015, 450).
- Gull og Sølv har både høy smeltetemperatur og god termisk konduktivitet, men denne ideen er ansett som for kostbart.



Tabell 4-15 Sammenligning av Kobber og Titan legeringer

Hva	Smeltepunkt [°C]	Termisk konduktivitet [W/mK]	Termisk ekspansjon ( $10^{-6}\text{°C}$ )	Pris 2016 US\$/kg	Referanse
Kobber- legering	980-1100	160-390	17-18	7.1-7.8	(Ashby 2017, 577,585).
Titan- legeringer	1500-1700	7-14	7.9-11	51-57	(Ashby 2017, 577, 585).

#### 4.7.1.1 Titan

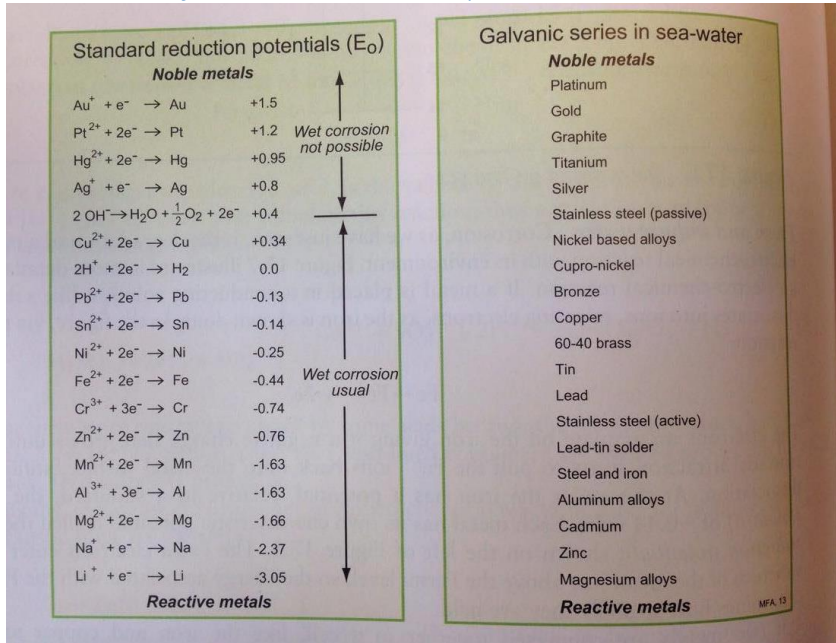
En stor begrensning for titan er dens kjemiske reaktivitet, at den reagerer lett kjemisk med andre metaller under høye temperaturer. Likevel er dens korrosjonsmotstand egenskap for en titanlegering veldig godt. Det påstås at det er nesten immune mot korrosjon med normale temperaturer mot luft, marint miljø eller andre industrielle miljø. Samtidig er titanlegeringer veldig dyre (Callister; Rethwisch 2015, 452).

#### 4.7.1.2 Kobber-nikkel

Ikke leget kobber er veldig mykt og duktilt som gjør det vanskelig å maskinere. På en annen side er det utrolig motstandsdyktig mot korrosjon i omgivende atmosfære, sjøvann og industrikjemikalier. De mekaniske og korrosjonsmotstand egenskapene til kobber kan styrkes gjennom legering (Callister; Rethwisch 2015, 446). Kobber kan ha mange ulike legeringer for ulikt bruk. I vårt tilfelle ønsker vi et materiale som tåler en høy temperatur og er korrosjonsbestandig. I tabell 13.6 i «Materials Science and Engineering» blir Kobber-nikkel legeringen typiske bruksområde definert som kondenser, varmeveksler og vannrør. Denne legeringen består av 30 wt% Ni.

Ved en slik løsning må en også vurdere om det vil oppstå korrosjon når en installerer en maskinert plate, som vil være det neste som blir utredet.

#### 4.7.1.3 Korrosjon med en maskinert plate



Figur 44 Spenningsrekke (Ashby 2014, 488).

Desto lavere spenningspotensialet  $E_0$ , desto lettere reduseres materialet (Ashby 2014, 489).

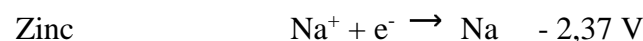
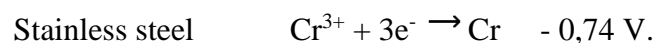
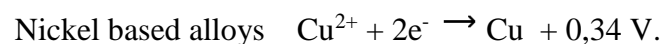
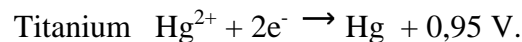
Fra sertifikatet til lydtemperen i vedlegg B tabell 8-1 så finner en at materiale er: 1.4435 X2CrNiMo 18-14-3. Det vil si; Rustfritt austenittstål, krom nikkell molybdenum stål med lavt karboninnhold.

For å hindre korrosjon er det installert offeranoder av Zink figur 45. Vi ønsker å lage maskineringsplaten til TEG elementene av kobbernikkel eller en titan legering. I den forbindelse må en undersøke om et av disse materialene vil korrodere/fungere som offeranode.



Figur 45 Zinkanoder

Vi leser av følgende data fra spenningsrekken på figur 32.



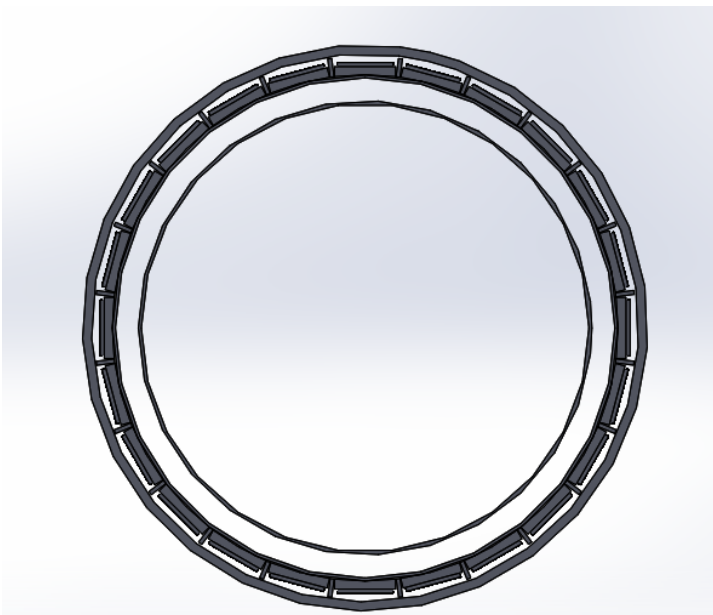
Dette viser at Zink anoden vil fremdeles fungere som offeranode fordi Zink har den laveste spenningspotensialet.

#### 4.7.2 Løsning to - Sliping av sylinder

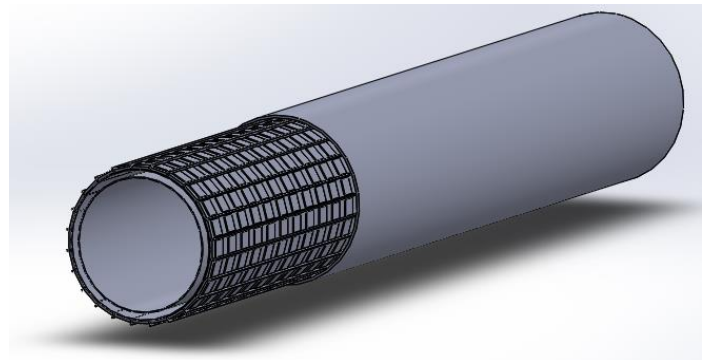
Ved sliping er det tenkt at dette kan skje på to måter. Måte en er å slipe ned den eksisterende sylindren som skiller eksos og sjøvann til å få flate anleggsflater. Dette kan være problematisk fordi tykkelsen på sylindren er kun tre millimeter som gjør slipearbeidet vanskelig og kanskje umulig. Presisjonsarbeidet ved en slik løsning vil naturligvis variere etter om en bruke en CNC maskin eller manuelt. Måte to er å konstruere en tykker sylinder som gjør det enklere å slipe til en flat anleggsflate. Fordelen med måte to er at en kan gjøre sylindren tykkere ved å redusere både eksos og sjøvannskammeret sin tykkelse, og på den måten gjør slipearbeidet enklere.

#### 4.7.3 Visuell konstruksjon tegnet i Solidworks.

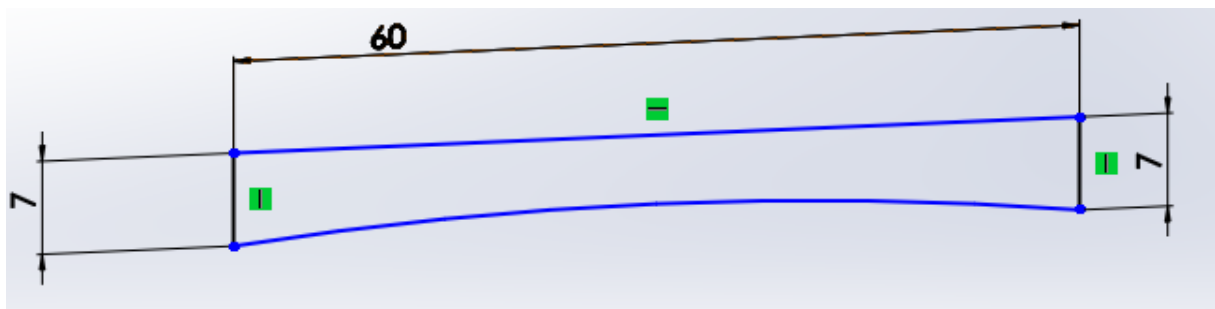
Ved hjelp av solidworks er det blitt konstruert etter reelle mål hvordan en mulig installasjon som er utredet over av termoelektrisk-element kunne vært.



Figur 46 Prinsipptegning av modul installasjon på eksisterende varmeveksler tegnet i Solidworks



Figur 47 Prinsipptegning av modul installasjon på eksisterende varmeveksler tegnet i Solidworks



Figur 48 Tegning fra solidworks av maskinert plate

I kammeret som har sjøvann i er det konstruert en plate som har en flat anleggsflate for deretter og blitt kledd med termoelektriske-moduler som skaper en termoelektrisk generator. Disse skissene fungerer kun som illustrasjon og tatt utgangspunkt i at det er maskinert en 24-kant. Konstruksjonen er av sylindrisk form og ikke spiss og avkappet som bildene viser, dette er på grunn av dårlig oppløsning i programvaren Solidworks. Konstruksjonen i solidworks har følgende mål: Termoelektrisk-element sin tykkelse er satt til 4 mm. Platen har en tykkelse på 7mm på sidene og 5,18mm på midten. Dette viser at det er fysisk mulig å velge løsning en (som er den tykkeste) med en maskinertplate med målene til figur 48, og en tykkelse til de termoelektriske modulene på 4 mm. Figur 46 viser at det er fysisk plass for en installasjon av TEG.

#### 4.7.4 Beregninger og resultater av mulig installasjon på eksisterende lydtemper

I dette delkapittelet skal beregninger og resultatene presenteres med bakgrunn i

##### 4.7.4.1 Dette vet vi:

Vi har allerede dannet oss et bilde av varmeoverføringen og varmeoverføringsevnen til den eksisterende varmeveksleren, og har dermed dannet oss et grunnlag for å beregne teoretisk varmeoverføringsevne til varmeveksleren. I tillegg har vi gjort en utredning for TEG-utforming rundt sylinder.

##### 4.7.4.2 Hva må vi finne:

Det vi må finne her er:

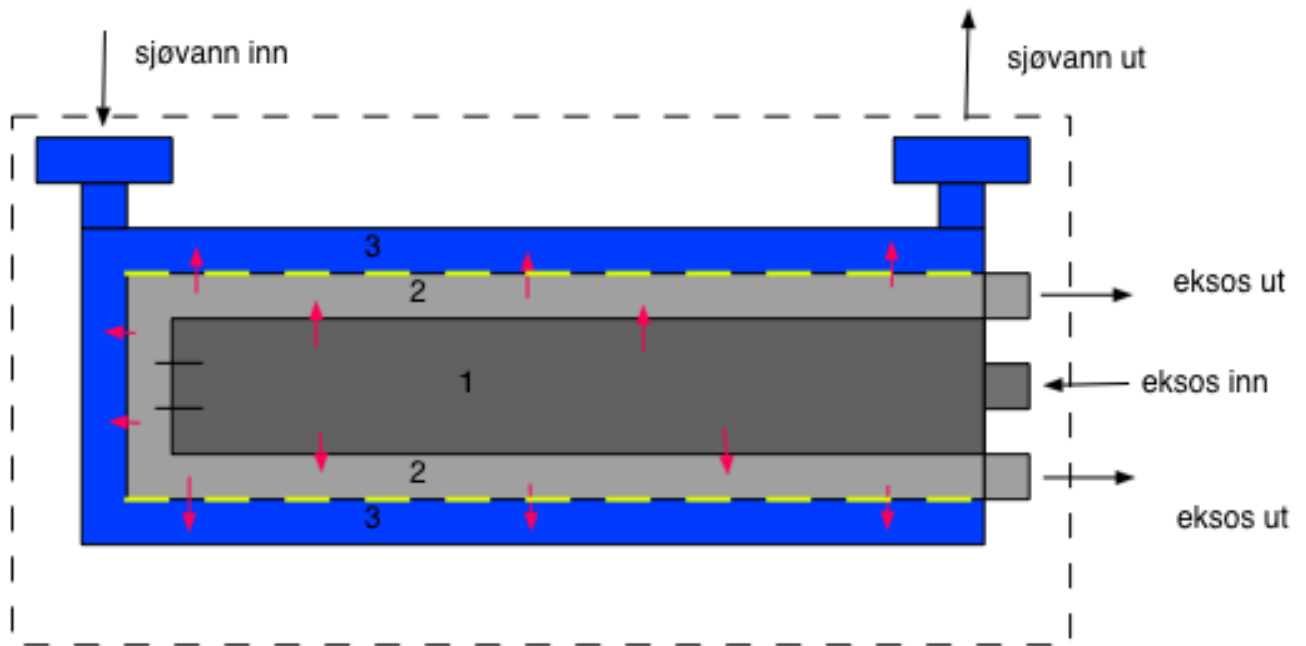
- Hva blir temperatur ut ved tillegg av en TEG-modul?
- Hva blir temperaturdifferansen over TEG-modul?
- Hvor mye effekt er det mulig å hente ut fra en slik installasjon?
- Hva er kostnadene av en slik installasjon?
- Hva blir egenvarmen til modulene?

##### 4.7.4.3 Skisse:

Vi har allerede laget skisser over en mulig installasjon, vi viser da til solidworks tegningene til figur 46,47 og 48.

I tillegg har merket TEG-modulene på figur 49 - tegnet inn med gult.

Kontrollvolumet vil være det samme som for den eksisterende varmeveksleren.



Figur 49 Illustrasjonsskisse av eksisterende varmeveksler-lyddemper med tillegg av TEG

#### 4.7.4.4 antakelser:

Vi gjør her de samme antakelsene som er gjort under beregninger av varmeveksleren, og lister de derfor ikke opp her.

I tillegg gjør vi disse forenklingene og antagelsene:

- at termoelektriske moduler legges rundt sylindere Vedlegg A figur 66.
- at varmeoverføringen fra sideveggene forblir den samme ved endringen av sylindere varmeoverføringsevne.
- at de termoelektriske modulene blir en del av vegg, og uten mellomrom, og dermed neglisjerer kontaktresistansen.
- at de termoelektriske modulene dekker hele vegg, uten mellomrom som det selvsagt vil være.
- Neglisjerer egenvarmen som måtte oppstå i kontrollvolumet grunnet strøm gjennom resistans ( $\frac{1}{2} * I^2 * R_i$ )
- Beregningene våre er gjort ved likhet mellom RL og Ri
- at modulene rundt sylindere er formet som en sylinder uten kanter for å gjøre beregningene enkle nok (vil kanskje gjøre areal litt mindre, men kantene kan også føre til mer turbulens og derfor bedre varmeoverføring).
- Bruker differansen mellom 30 og 170 som er oppgitt fra Thermonamic i vedlegg C – Figur 74, og ikke den egentlige som er mellom 150 og 13. Dette valget ble gjort fordi

grafene bare gikk fra 30 og ikke ned til 13, og da for å beholde lik differanse. I tillegg er varmeoverføringskoeffisienten til saltvann høy, noe som vil resultere i god varmeoverføring fra den kalde siden, slik at strømmingstemperaturen er relativt lik kontakttemperaturen.

#### Beregning av kostnader

- Ved beregning av kostander har vi tatt hensyn til en dollar pris på 8 kr pr dollar
- Beregningene har bare tatt hensyn på modul kostander, og disse kostnadene er et estimat fra fagpersonell og ikke fra leverandør.

Ved disse beregningene brukes de samme geometriske parameterne som tidligere brukt, bortsett fra en endring i strømningsbildet i saltvannsrøret som fører til en endring i varmeoverføringskoeffisienten ( $h_2$ ). Varmeoverføringskoeffisienten blir da erstattet med en ny, kalt  $h_{2ny}$  - denne beregnes ved et veggtillegg som skal tilsvare en termoelektrisk modul sammen med en foil/trykkplate. Denne nye konfigurasjonen vil da få en tykkelse på 0,008 [m] (0,005 [m] termoelektrisk-modul + 0,003 [m] med foil/trykkplate).

De nye målene blir da som følger i tabell 4-16.

Tabell 4-16 Teknisk data ved installasjon av termoelektriske-element.

Hva	[m]
Diameter indre eksoskammer ( $D_{ie}$ )	0,44
Diameter ytre eksoskammer ( $D_{ye}$ )	0,446
Diameter med termoelektrisk -element med foil indre ( $D_{ti}$ )	0,497
Diameter med termoelektrisk -element med foil ytre ( $D_{ty}$ )	0,505
Diameter sjøvann indre ( $D_{si}$ )	0,547
Diameter sjøvann ytre ( $D_{sy}$ )	0,556
Diameter lyddemper utside ( $D_{su}$ )	0,6

#### 4.7.4.5 Data:

Dataene blir de samme som fra varmeveksleren, men i tillegg noen data fra produsenten av termoelektriske-moduler Thermonamic.

Tabell 4-17 Termoelement spesifikasjoner fra Thermonamic

Navn på element	lengde [m]	bredde [m]
TEP1-24156-2.4 Vismut Tellur	0,056	0,056

Verdiene som er brukt er lest av fra spesifikasjonsdokument produsert av Thermonamic - vedlegg C Figur 73 og 74. Vi prøvde å ta kontakt med bedriften for å få flere verdier men det vi har ikke lykkes med selv etter gjentatte forsøk. Begrunnelse for valg av materialet er i delkapittel 5.2.

#### 4.7.4.6 Analyse - Beregningsteori

##### 4.7.4.6.1 Varmeoverføringsevne

For å beregne ny varmeoverføringsevne og tilslutt ny utgangstemperatur beregnes først varmeoverføringskoeffisient med tillegg av termoelektrisk-materiale – her brukes samme metode som tidligere, men et ekstra lag med materiale legges til, noe som fører til smalere geometri og høyere konduktivitet.

##### 4.7.4.6.2 Utgangstemperatur:

For å beregne endringen i temperatur ut av varmeveksleren har vi sett på forskjellen i varmeoverføringsevne før og etter tillegg av TEG. Deretter har vi tatt differansen av dette:

$$(UA_{\text{sylinder}} - UA_{\text{sylinder 3 m med TEG}} = \Delta UA_{\text{sylinder}})$$

Formel 4.39 Varmeoverføringskoeffisient differanse

For deretter å trekke resultatet fra totalen:

$$(UA_{\text{total med TEG}} = UA_{\text{total}} - \Delta UA_{\text{sylinder}})$$

Formel 4.40 Total varmeoverføringskoeffisient

For da å kunne beregne en ny utgangstemperatur for eksosen brukes NTU-metoden.

#### 4.7.4.6.3 NTU-metoden:

NTU-metoden er praktisk, hvis man bare kjenner inngangstemperaturene til en varmeveksler, noe som vil være tilfellet for oss når vi prøver å beregne en ny termisk motstand (Incropera; DeWitt 2002, 660)

Metoden baserer seg på først å regne ut maksimal varme ( $\dot{Q}_{max}$ ). Maksimal varme beregnes ved hjelp av det fluidet som kan gi fra seg/ta til seg minst varme ( $C_{min}$ ):

$C_{min} = C_{pfluid} * m_{fluid}$  : (hvilke som er minst avgjøres i forhold til hvilke av strømmingene som har lavest verdi)

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} * (T_{hi} - T_{ci})$$

*Formel 4.41 Maksimal varmeoverføringsevne.*

(Incropera; DeWitt 2002, 660)

Deretter å multiplisere maksimal overføringsevne med en effektivitetsfaktor ( $\epsilon$ ).

$$\dot{Q} = \epsilon * \dot{Q}_{maks}$$

*Formel 4.42 Maksimal overføringsevne multiplisert med effektivitetsfaktor.*

(Incropera; DeWitt 2002, 660)

Epsilon ( $\epsilon$ ) er en funksjon av parameterne NTU og  $C_r$  ( $\frac{C_{min}}{C_{maks}}$ ) og vil være avhengig av strømningsarrangement og type varmeveksler.

$$\epsilon = f(NTU, C_r)$$

*Formel 4.43 Funksjon av parameterne NTU og  $C_r$ .*

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

*Formel 4.44 NTU.*

(Incropera; DeWitt 2002, 661)

Fordi  $C_{min} \ll C_{maks}$  vil  $C_r$  være tilnærmet lik 0, derfor blir formelen for  $\epsilon$ :

$$\epsilon = 1 - \exp^{-NTU}$$

*Formel 4.45  $\epsilon$  fra varmeveksler der  $C_r = 0$ .*



(Incropera; DeWitt 2002, 662)

- For å kunne gjøre effekt-beregningene så gode som mulig benytter vi oss av  $T_m$  (middeltemperatur) mellom inngang og utgang av lyddemperen. Hvis vi velger at:

-  $T_m = T_{\infty,1}$ , og at:

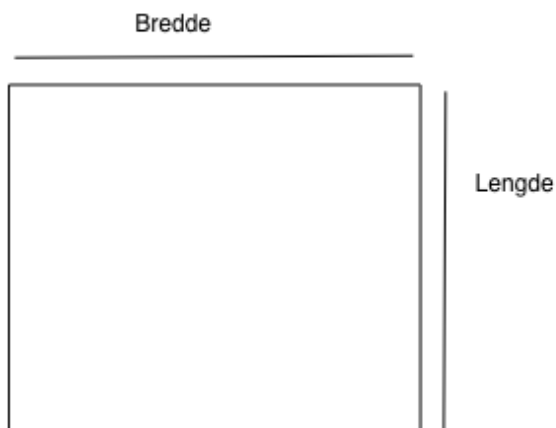
$$\dot{Q}_{\text{overført fra ytre eksoskammer}} = \dot{Q}_{\text{eksos med TEG}} - \dot{Q}_{\text{indre eksoskammer}}$$

Varmeoverføringen gjennom ytre eksoskammer brukes som varme ( $\dot{Q}$ ) i formel 4.37 og 4.38 temperaturfordeling fra senter av eksosstrømmen gjennom eksosveggen.

#### 4.7.4.6.4 Beregning av effekt fra TEG-konfigurasjon

Ved valg av TEG-modul leverandør har vi blitt anbefalt Thermonamic av fagpersonell og vil derfor bruke moduler fra dem.

Alle modulene har en rektangelform som vist under i Figur 50:

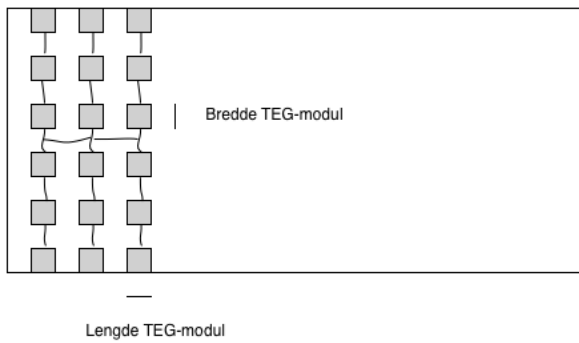


Figur 50 Geometrisk form av termoelektrisk element

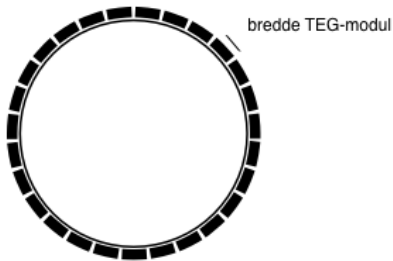
Som tidligere beskrevet vil modulene puttes i serie og i parallell, etter hva som er mest hensiktsmessig. Her bør det vektlegges:

- Brukervennlighet i forhold til vedlikehold og redundans.
- Størrelse på spenning og elektrisk strøm

Som en start velger vi å legge de i serie rundt omkretsen til sylindere, og deretter legger vi omkretsene i parallell med neste serie, dette er vist ved under ved Figur 51 og 52.



Figur 51 Tegning av termoelektriske moduler i serie og parallell



Figur 52 Termoelektriske moduler i serie om eksisterende varmeveksler

For å beregne antall elementer i serie pr. omkrets av sylindere brukes formelen:

$$\text{Antall mulige elementer i serie pr. Omkrets} = \frac{O_{\text{sylinder}}}{B_{\text{modul}}}$$

$O_{\text{sylinder}}$ : omkretssylinder

$B_{\text{modul}}$ : bredde modul

Deretter trekkes en modul fra, slik at uforutsett plass og størrelse blir ivaretatt, og dermed blir formelen for antall elementer i serie pr. omkrets slik:

$$Nr_{\text{omkret sylinder}}: \text{Antall elementer i serie pr. omkrets} = \frac{\text{Antall mulige elementer i serie per Omkrets} - 1}{1}$$

Vi finner deretter spenning, strøm og lik last per modul ved avlesning av graf ved hjelp av temperaturdifferanse.

Vi bruker deretter formler 2.4 - 2.8 om hvordan en beregner moduler som er lagt i parallell og/eller serie.

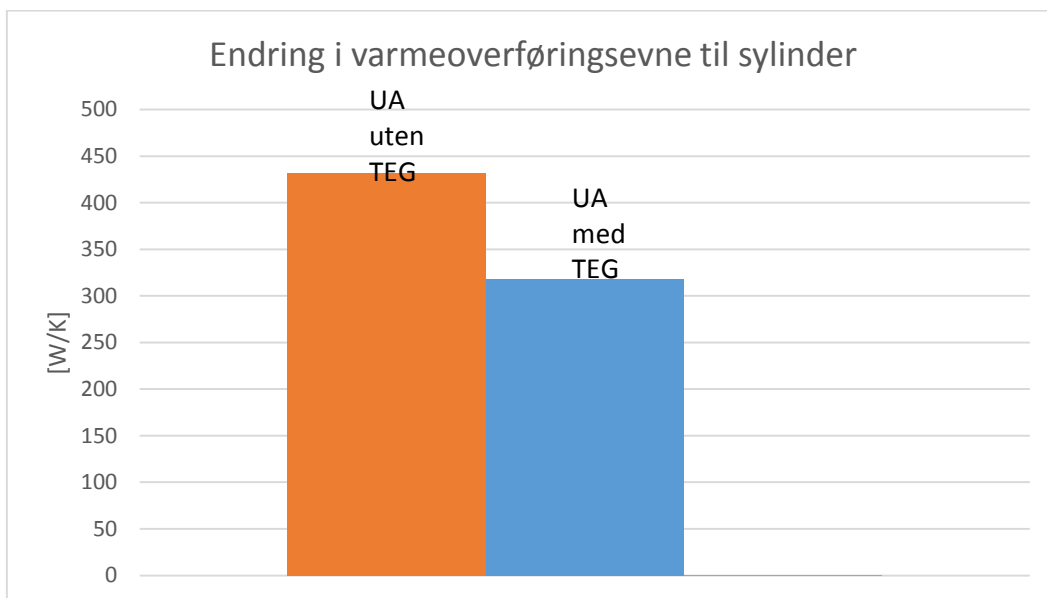
#### 4.7.4.6.5 Kostander:

For å kunne beregne total kostnader for modulene har vi multiplisert antall moduler med kostanden av en modul.

#### 4.7.4.7 Resultater

##### 4.7.4.7.1 Endring i opprinnelig varmeoverføringsevne ved tillegg av TEG-moduler rundt sylindere:

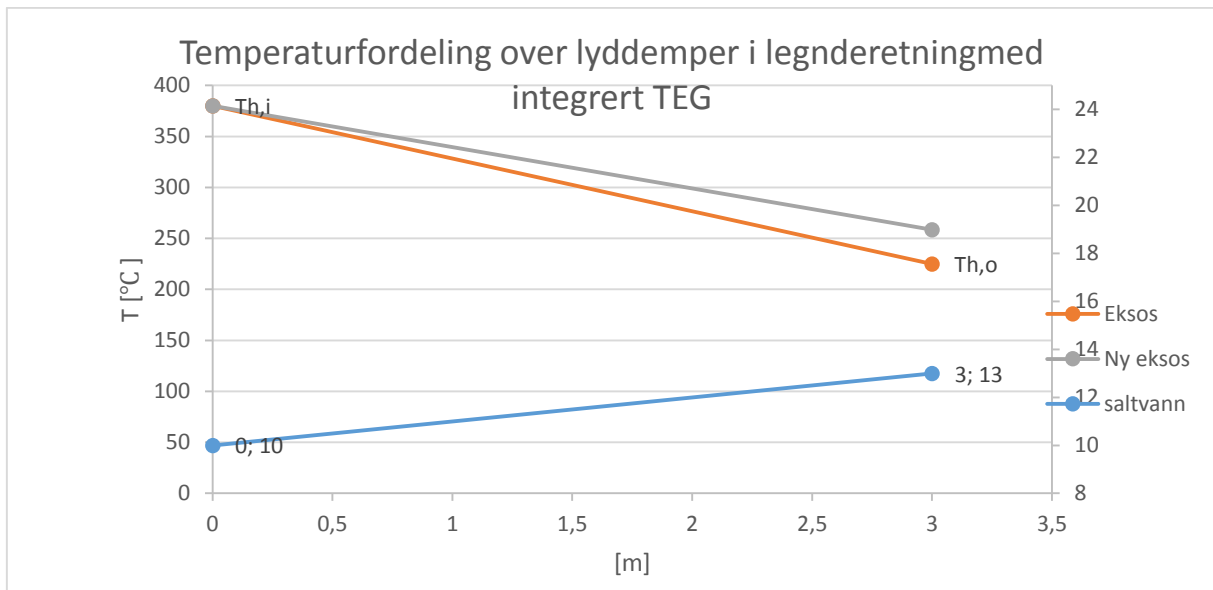
Figur 53 presenterer den grafiske endringen i opprinnelig varmeoverføringsevne over sylindere med tillegg av TEG-moduler. Funnet viser tydelig at varmeoverføringsevnen går ned ved tillegg av TEG-moduler.



Figur 53 Endring i opprinnelig varmeoverføringsevne ved installasjon av TEG-moduler

##### 4.7.4.7.2 Temperatur ut av varmeveksler ved forskjellig dekningsgrad av TEG-moduler rundt sylindere:

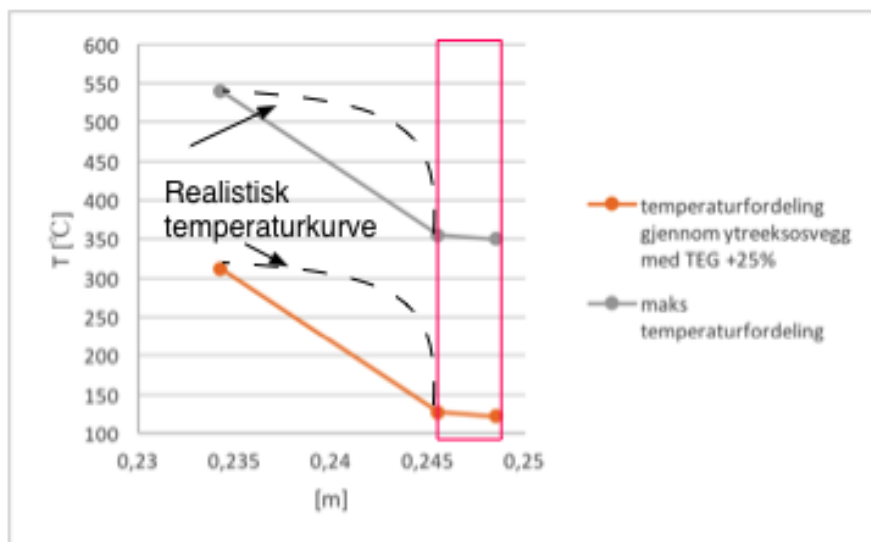
Figur 54 viser temperaturendring ut av varmeveksleren presentert grafisk, og de viser at ved dekning av TEG-moduler øker temperaturen ut av varmeveksleren.



Figur 54 Temperatur ut av varmeveksler ved forskjellig dekningsgrad av TEG-moduler rundt sylindrer

#### 4.7.4.7.3 Temperaturfordeling gjennom sylindervegg:

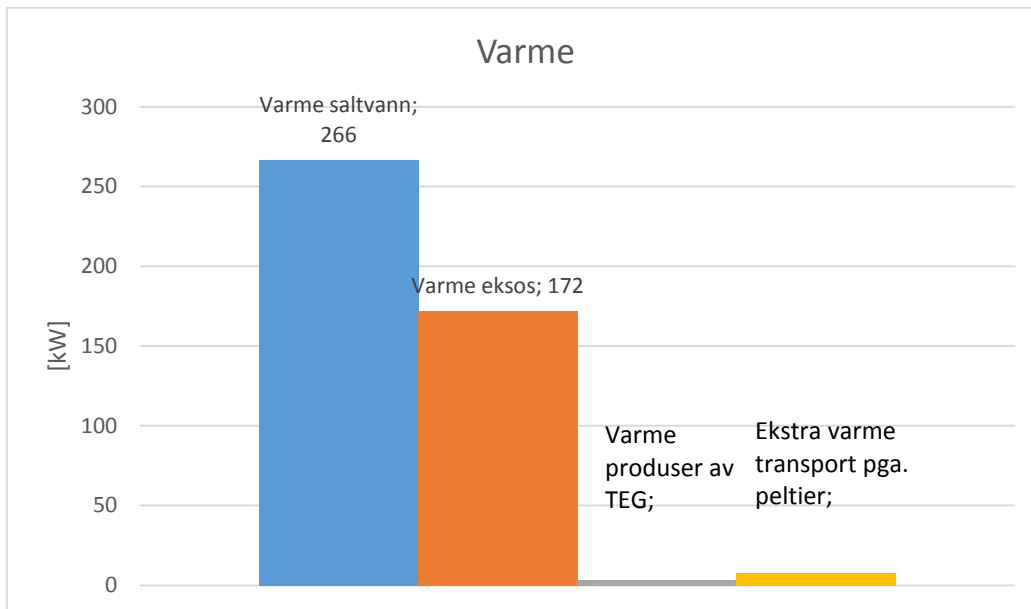
Figur 55 viser en grafisk fremstilling over temperaturfordelingen fra senter av eksosstrømmen frem til kontaktpunktet til TEG-element. Funnene viser at det er en stor forskjell i temperatur mellom senter av massestrømmen og kontaktflaten på TEG-modulen. Det andre de viser er at selv ved maks temperatur er ikke varmeoverføringen til kontaktflaten større enn 300 °C.



Figur 55 Temperaturfordeling fra senter av eksosstrømmen gjennom sylindervegg ved tillegg av TEG

#### 4.7.4.7.4 Varmeproduisert fra moduler:

Figur 56 viser en grafisk fremstilling ekstra varmemstrøm grunnet peltiereffekten og resistansen. På grunn av strømmen i kretsen og resistansen i materiale produserer modulen varme, men også fordi det går en strøm i kretsen hjelper peltiereffekten til med varmetransporten. Funnene viser at egenvarmen er neglisjerbar.



Figur 56 varmemstrøm grunnet peltier og resistans opp mot varme eksos og saltvann

#### 4.7.4.7.5 Effekt og kostnad fra TEG-moduler

Tabell 4-18 viser effekten og kostanden til system av TEG-modul installert på ytre eksosylinder. Tallene er beregnet ved en temperaturdifferanse på 150 grader celsius til 30 grader celsius. Prisen på modulen er tatt fra intervju med ekspert og beregnet, hvis modulene koster 20 \$ stykke (Tollefsen 2017).

Tabell 4-18 Effekt og kostand av TEG over sylinder

antall moduler []	Effekt [W]	Kostand [kr]
1247	7480	kr 199 474

#### 4.7.4.8 Oppsummering av nøkkel funn

For det første viser funnene at et tillegg TEG, som har mye lavere konduktivitet vil minske varmeoverføringsevnen til den delen av sylindere den er kledd med, noe som vil resultere i dårligere varmeoverføringsevne til varmeveksleren og dermed høyere signatur.

For det andre viser beregningene at det er stor variasjon mellom temperaturen i midten av sylindere og ut til sideveggen noe som i stor grad vil påvirke temperaturdifferansen over modulen, og hvilke modul som er hensiktsmessig å velge. I tillegg viser beregningen av selv om temperaturen på eksosen blir 520 °C så er ikke temperaturen på modulen mer enn 350 °C, noe som ligger innenfor begrensningene til modulen.

For det tredje viser beregningene at egenprodusert temperatur fra modulene er neglisjerbar.

For det fjerde viser beregningen at det er en ganske bra effekt potensiale å hente ut av modulen ved temperaturen som er tilgjengelig, hvis vi greier å overføre varmen på en god måte. I tillegg kan kostanden ligge i overkant av 200 000 kr i moduler.

##### 4.7.4.8.1 Konklusjon:

Vi vil derfor konkludere med fem momenter. For det første viser funnene våre at integrasjon av TEG-moduler øker temperaturen ut av varmeveksleren. For det andre at det er et kraftig temperaturfall mellom eksosstrømmingen og TEG-kontaktflaten. For det tredje at egenvarmen ved denne installasjonen er neglisjerbar. For det fjerde at effekten man kan hente ut er ganske stor. For det femte at prisen i moduler ligger i overkant av 200 000 kr.

## 4.8 Utredning om alternativ varmeveksler konfigurasjon

Resultatene fra beregninger på eksisterende lydtemper viser at den har dårlig varmeoverføringsegenskap og det er et potensiale i mulig utnyttelse av varmeoverføring. Dette tror vi er på grunn av at den er designet primært for å redusere støy, og ikke som en varmeveksler. Interessen er derfor stor for å undersøke potensialet for en ny konfigurasjon av en varmeveksler ved samme volum som eksisterende lydtemper, spesielt siden Forsvaret skal anskaffe nye ubåter og er per dags dato i planleggingsfasen. Dette potensialet vil nå bli utredet om med å følge metode for varmeoverføringsevne, og deretter fremvise resultatene.

### 4.8.1 Hvordan oppnå maksimal varmeoverføringsevne med begrensning i volum

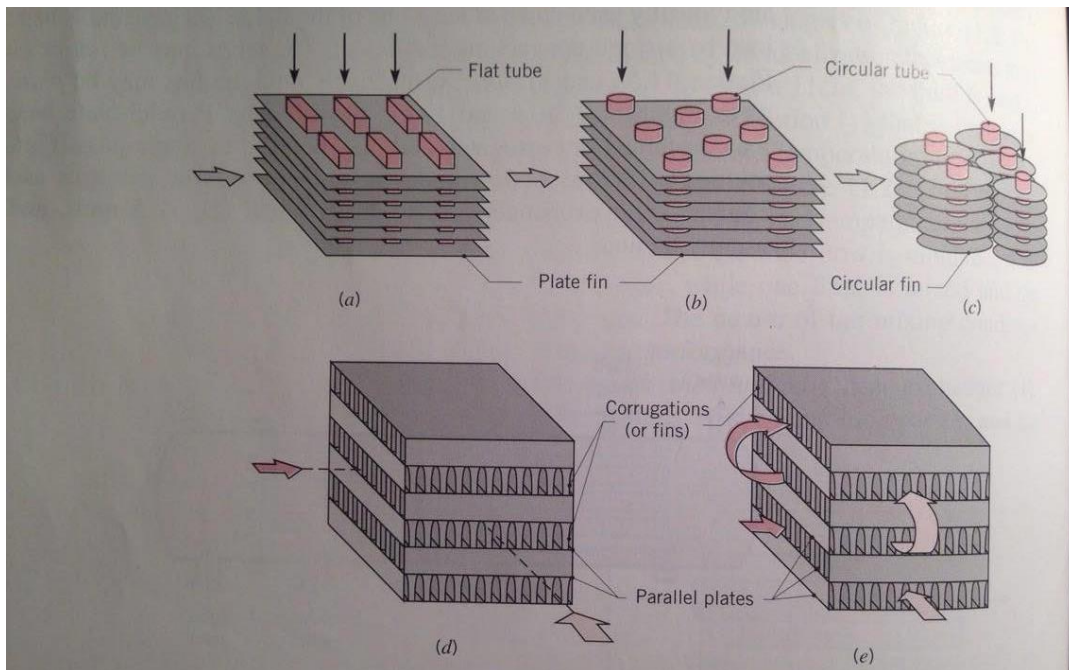
Det vi har behov for av denne varmeveksleren er at den tar liten plass og overfører mye varme fra eksosgassen.

Fra boken *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* anbefales det en kompakt varmeveksler fordi denne type varmeveksler har mulighet til å danne et stort varmeoverføringsareal, i tillegg er den anbefalt når minst en av fluidene er av gass, og dermed har en lav varmeoverføringskoeffisient ( $h$ ) (Incropera; DeWitt 2002, 643) – noe som er tilfelle for oss.

Den kompakte varmeveksleren har gjerne et varmeoverføringsoverflateareal per volum på:

$$>700\left[\frac{m^2}{m^3}\right]$$

og disse varmevekslerne består gjerne av matriser med rør og finner eller plater – rørene kan både være flate og sirkulære og det samme kan finnene eller platene være, dette kan ses på figur 57 - a, b og c. I tillegg er også en mulighet å legge parallelle plater ved en eller flere passasjer, dette kan ses på figur d og e (Incropera; DeWitt 2002, 644).



Figur 57 Kompakte varmevekslerer (Incropera; DeWitt 2002, 644).

#### 4.8.2 Dette vet vi:

Som vist i vedlegg A figur 64 er plassen vi har til rådighet et volum på  $L=3\text{ m}$  og  $D=0,6\text{ m}$  som tilsvarer et volum på  $V=0,9\text{ [m}^3\text{]}$

Tabell 4-19 Total vekt til varmeveksler

Hva	Verdi [kg]
vekt varmeveksler tom	1090
tillegg av vann	125
total vekt under bruk	1215

Tabell 4-20 Varmeoverføringsareal pr. volum:

Varmeoverførings areal pr. Volum	5,43	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
----------------------------------	------	---------------------------

#### 4.8.3 Hva må vi finne:

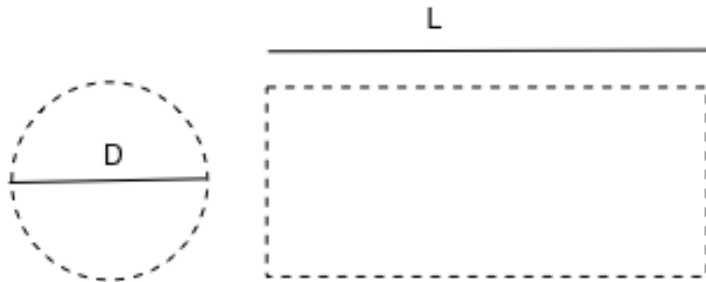
- Det vi har lyst til å finne ut av er om det finnes en annen varmeveksler konfigurasjon som kjøler eksosen bedre ved det samme volumet?
- Er det mulig å gjøre andre modifikasjoner på den eksisterende varmeveksleren?



- Og, hvis dette er mulig, hvor mye effekt kan vi hente ut, hvilke temperaturer blir det ut?
- Sammenligne varmeoverføring, temperatur ut og effekt for alle installasjonene.

#### 4.8.4 Skisse:

Skisse av volum til rådighet:



Figur 58 Volum til rådighet

#### 4.8.5 Antakelser

Det er gjort noen beregninger for å gjøre beregningene simple, siden hensikt er bare å undersøke på et generelt grunnlag for sammenligning om mulige andre konfigurasjoner som kan være bedre enn den eksisterende installasjonen.

#### **Beregning av varmeoverføringsevne:**

- Ved utregning av varmeoverføringsevne er det lagt til fouling faktorer for eksos og saltvann

#### **Beregning av temperatur ut:**

- For å beregne utgangstemperatur har vi gått ut i fra samme inngangstemperatur som eksisterende.
- Vi har brukt ( $C_p$ ) som er funnet fra tidligere middeltemperatur

#### **Geometriske beregninger**

- De geometriske beregningene er gjort uten en mal, men etter opparbeidet kunnskap og egenerfaring.

#### **Effektberegning**

- Effektberegningene er gjort med den samme middeltemperatur som på den eksisterende varmeveksleren – dette vil selvsagt ikke bli helt riktig, men hovedpoenget var å vise at det var mulig å dekke et større areal med moduler og dermed hente ut mer energi.

## Beregning av kostnader

- Ved beregning av kostander har vi tatt hensyn til en dollar pris på 8 kr pr dollar
- Beregningene har bare tatt hensyn på modul kostander, og disse kostnadene er et estimat fra fagpersonell og ikke fra leverandør.

### 4.8.6 Data:

Som tidligere nevnt vil vi her se på om det er mulig å overføre mer varme med en annen varmevekslerkonfigurasjon, med begrensningene:

- Volum
- Ytterkanter (Høyde, bredde og lende) som den eksisterende
- Lengde

Vi vil derfor ta for oss hva som kan øke varmeoverføringsevnen, hvis vi sier at eksosvarmen som kommer ut av motoren er konstant – noe som er tilfelle for oss.

Vi har derfor samlet inn informasjon ut i fra spørsmålet: Hvordan oppnå et større varmeoverføringsareal, med lik volumbegrensning som eksisterende lydtemper?

### 4.8.7 Analyse:

Valg av varmeveksler konfigurasjon:

Vi har etter diskusjon innad i gruppen laget vårt eget varmeveksler design, vi har gjort dette ut med bakgrunn i:

- Inspirasjon fra diverse varmevekslerer
- Variert parameterne for å optimalisere resultatene i Excel
- Plane flater som er tilpasset TEG-elementer

Produktet kan se under på figur 59, 60 og 61. Dette er et veldig enkelt design, mest for å se om det er mulig å lage en mye bedre varmeveksler med det samme volumet og tilpasset TEG elementer.

#### 4.8.8 Alternativ varmeveksler konfigurasjon – kvadratisk 8x8 matrise:

Konfigurasjonen er inspirert fra en kompakt varmeveksler, med forbehold at det er plass til å installere en termoelektrisk generator på utsiden.

##### 4.8.8.1 Konfigurasjon/geometrisk utforming:

Design målene ble bestemt til en høyde og bredde til et rektangel på 0,6 meter. Dette vil resultere i tilsvarende volum til eksisterende lydtemper. På denne måten er det mulig å avgjøre hvor mange kjølerør eller matrise (antall rader og kolonner) det er plass til. Formel 4.50 er for høyde og bredde.

$$\text{Mulig antall rader} = \frac{H_{8x8\ VV}}{H_{kjølerør}}$$

*Formel 4.46 Mulige antall rader geometrisk utforming*

For å finne det fysiske mulige antall rader inkluderte vi formel 4.51 for mellomrom mellom rader.

$$\text{Mellomrom mellom rader} = \frac{H_{8x8\ VV} - n_{kjølerør} * H_{kjølerør}}{n_{mellomrom}}$$

*Formel 4.47 Mellomrom mellom rader*

n: antall

H/B: høyde/bredde

Fordi utformingen er kvadratisk brukes forutsetningen om at samme beregning vil gjelde for antall kolonner, slik som er vist for antall rader.

##### 4.8.8.2 Beregning av varmeoverføringsevne (UA):

For å gjøre teoretiske beregninger på denne utformingen benyttes strømningsgeometrien som ikke er sirkulær. Derfor brukes beregningsreglene for ringrommet, men tas hensyn til en annen hydraulisk diameter. Formel 4.52 er for den hydrauliske diameteren:

$$Dh = \frac{4Ac}{P}$$

*Formel 4.48 Hydraulisk diameter*

Ac: kryssareal eller areal perpendikulært på strømmingen

P: våt perimeter er kontakt perimeterne

(Incropera; DeWitt 2002, 495)

$A_c$  og  $P$  for eksosen blir:

$$A_c = H * B - n * h * b$$

$H/B$ : høyde/bredd på varmeveksler [m]

$n$ : antall rør

$h/b$ : høyde/bredd på rør

$$P = 2(H + B) + 2(h + b)n$$

$A_c$  og  $P$  for saltvannet blir:

$$A_c = ((h - t) * (b - t)) * n$$

$$P = 2(h + b - 2t) * n$$

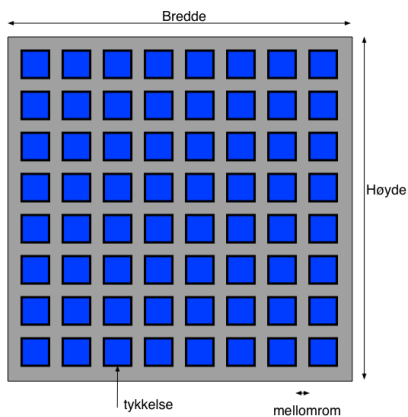
$t$ : tykkelse på rør

#### 4.8.8.3 Beregning av temperatur ut:

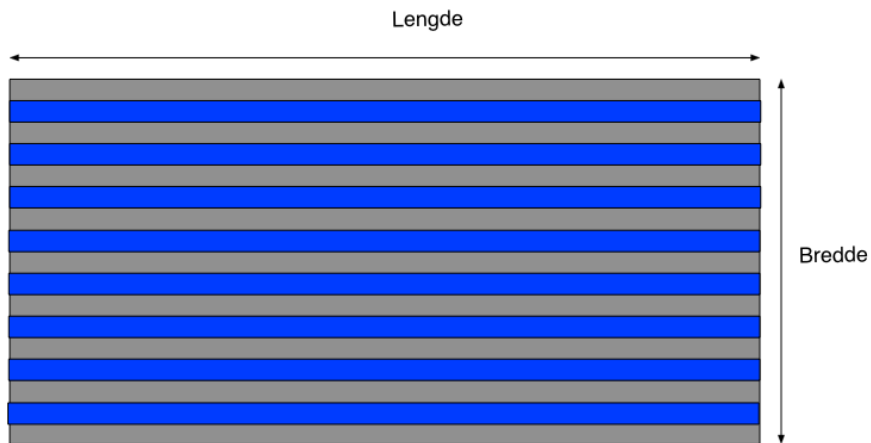
For å beregne temperaturen ut av varmeveksleren brukes  $UA$  sammen med fouling faktor for eksos og saltvann.

#### 4.8.8.4 Utforming/virkemåte:

Som vist figur 59 og 60 vil kjølevannet gå i rørene, mens eksosen vil bevege seg i det større rommet som gir et stort varmeoverføringsareal. Rørene vil være kvadratisk med en plan flate dette vil gi mulighet til installasjon av TEG-moduler. Eksosen kan gå parallelt eller perpendikulært av kjølerørene.

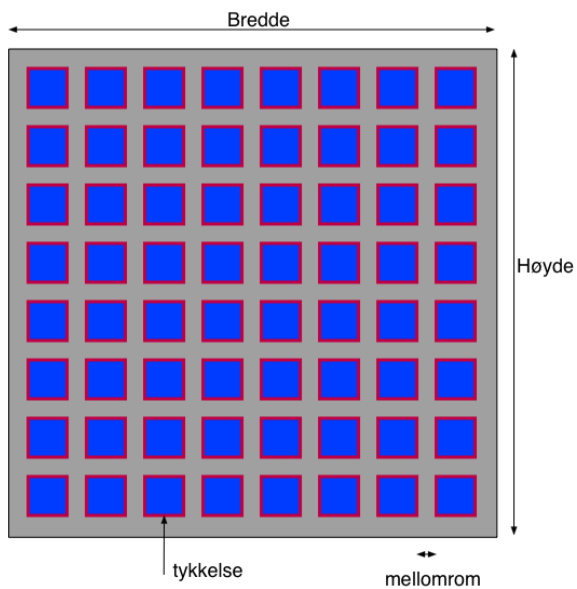


Figur 59 Kvadratisk 8x8 matrise sett forfra



Figur 60 Kvadratisk 8x8 matrise sett fra siden

Vi har valgt den kvadratiske utformingen for å optimalisere TEG-moduler installasjonen på utsiden – det vil bli seende ut slik som vist på figur 61.



Figur 61 Kvadratisk 8x8 matrise sett forfra med TEG

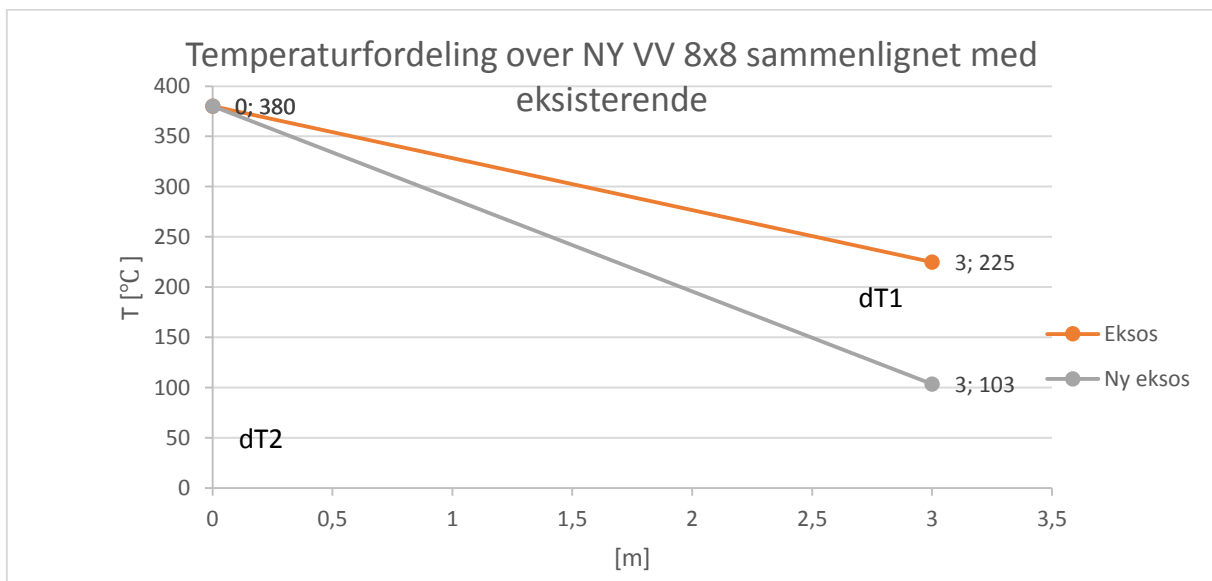
#### 4.8.9 Resultater:

##### 4.8.9.1 Alternativ varmeveksler (VV 8x8)

Tabell 4-21 viser resultatene i verdier når en beregner egenskapene hos VV 8x8. Beregningene er gjort i Excel vedlegg D.

Tabell 4-21 Verdier til VV 8x8

Verdier VV 8x8		
Ytre volum	1,08	[m <sup>3</sup> ]
Varmeoverføingsareal eksos	46,08	[m <sup>2</sup> ]
UA	1527	[W/K]
overføringsevne i forhold til før	316	[%]
Varmeoverføingsareal pr. Volum	38	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
Temperatur ut [°C]		
	103	



Figur 62 Temperaturfordeling over NY VV8x8 sammenlignet med eksisterende lydtemper

Figur 62 viser temperatur ut av varmeveksler sammenlignet med eksisterende lydtemper.

Tabell 4-22 En enkel kostnadsoversikt over materiellpris og effekt ut for VV 8x8

antall moduler []	Effekt [W]	Kostand [kr]
13458	80750	kr 2 153 326

#### *4.8.10 Oppsummering av nøkkel funn*

Funnen viser at det er mulig å oppnå et høyere varmeoverføringsareal per volum enn eksisterende lyddemper.

Funnene viser også at det kan være mulig å endre den eksisterende varmeveksler slik at den transporterer mer varme mellom fluidene i den hensikt å redusere utgangstemperaturen.

Funnene viser at ved andre konfigurasjoner er det mulig å oppnå en høyere effekt fra en termoelektrisk generator enn ved en integrasjon på den eksisterende.

Funnene viser at det er mulig å lage en installasjon som både reduserer varmen bedre og har et større effekt potensiale ved installasjon av en termoelektrisk generator.

Det er viktig å presisere at dette ikke er gode analyser og beregninger med usikkerheter, men er en ideell forestilling om hva som kan være mulig å få til med en grundigere analyse og utredelse. Derfor konkluderer vi med at det finnes andre måter som mest sannsynlig er bedre, og som både kan overføre mer varme og øke produsert effekt fra en termoelektrisk generator.

## 4.9 Operativ betydning og kostnadsbesparelse

Denne utredelsen har til hensikt å illustrere effektpotensialet og forskjellen til en installasjon av en termoelektrisk generator på eksisterende lyddemper mot en alternativ konfigurasjon.

### 4.9.1 Bakgrunn

Fremdriftssystemer og verdier som generatorytelsen på ULA-klassen er begrenset informasjon. Siden vi ønsker at oppgaven skal være åpen og offentlig er det benyttet et fiktivt eksempel i beregning på besparelse potensiale. Selv om det blir brukt et fiktivt eksempel så er det fremdeles mulig å besvare problemstillingen til oppgaven.

### 4.9.2 Fiktivt eksempelet på generatorytelse

Vi har valgt at Erling Pedersen eier en liten båt. Han bruker denne båten til å kjøre opp og ned norskekysten for å fiske. Denne båten går på elektrisk fremdrift med en batteripakke og et dieselaggregat. Om bord har han installert en identisk lyddemper som finnes om bord i dag i ULA-klassen.

Tabell 4-23 Parameter til fiktiv historie

Hva:	Kapasitet
Batteripakke	Gir fremdrift i 1 døgn med marsjfart på 6 knop. De har en ladetid på 4 timer.
Dieseltank	50,000 liter
Seiling	Seiler hver dag hele året
Vedlikeholds syklus	Hvert 7 år

#### Type:

Himoinsa HMW-915 T6 HEAVY RANGE Diesel

Standard static

Tabell 4-24 Himoinsa HMW-915 T6 HEAVY RANGE Diesel Standard static

Motor		Generator	
Motoreffekt	963 [kW]	Generatoreffekt	915 [kW]
Turtall	1800 [rpm]	Spenning	480/277 [V]
Drivstofforbruk	240 [liter/h]	Frekvens	60 [Hz]
		Effektfaktor $\cos\phi$	0,8





Figur 63 Fiktiv MTU-motor

### 4.9.3 Potensiale fremstilling

Dette delkapittelet skal vise potensiale en termoelektrisk generator har i henhold til beregningene gjort tidligere. Det er gjort en forenkling med å si at besparelsen i prosent kan finnes ved å ta forhåndstallet med produsert strøm fra en termoelektrisk generator over produsert strøm av generatoren.

#### 4.9.3.1 Driftstidsberegninger på fiktiv MTU-generator

Tabell 4-25 Driftstid til fiktivt eksempel på MTU-generator

Hva	Beregning/verdi
Driftstid	1 time
Forbruk	240 l/h
Dieselpris	11,11 kr/l
Effekt dieselmotor	963 kW
Effekt generator	915 kW

Tabell 4-26 Forbruk fiktiv diesel

#### Forbruk:

Hva:	Driftstid [timer]	forbruk [liter]	kostand [kr]
drift 1 time	1	240	kr 2 666,40
Drift 4 timer (normalt døgn)	4	960	kr 10 665,60
Drift 1 år med drift hver dag	1460	350400	kr 3 892 944,00

#### 4.9.3.2 Beregninger:

Beregningene er gjort i beregningsdokumentet i Excel vedlegg D. Men hovedpoenget er at beregningene er gjort ved hjelp av et forhåndstall:

Alt merket med (1) og (2) er henholdvis referet til installasjon på eksisterende lydtemper (1), og alternativ konfigurasjon(2). Det er lik merking i Excel-dokumentet vedlegg D

$$\text{Forhåndstall} = \frac{\text{Effekt generator} - \text{Effekt fra TEG}}{\text{Effekt generator}}$$

Formel 4.49 Forhåndstall

Tabell 4-27 Forhåndstall

<b>Forhåndstall:</b>	
Forhåndstall (1)	0,99182
Forhåndstall (2)	0,91175

#### 4.9.3.2 Potensiale ved installasjon av TEG

Tabell 4-28 Potensialet ved installasjon av TEG

<u>Integrerer TEG (1)</u>				<b>Besparelser</b>	
	Driftstid [timer]	forbruk [liter]	kostand [kr]	Besparelse [liter]	Besparelse [kr]
drift 1 time	0,99	238	kr 2 644,60	2	kr 22
(normalt døgn)	3,97	952	kr 10 578,41	8	kr 87
Drift 1 år	1448,06	347535	kr 3 861 118,50	2865	kr 31 826
<u>Installerer TEG (2)</u>					
	Driftstid [timer]	forbruk [liter]	kostand [kr]		
drift 1 time	0,912	219	kr 2 431,09	21,18025293	kr 235
(normalt døgn)	3,647	875	kr 9 724,35	84,72101171	kr 941
Drift 1 år	1331	319477	kr 3 549 387,59	30923,16927	kr 343 556

### Totale kostander ved installasjon av TEG

Tabell 4-29 Totale kostander med installasjon av TEG

<b>Totale kostnader:</b>				
Navn	TEG-moduler	Installasjon	Sparing i drivstoff pr. 7 år	Totalt
TEG (1)	kr 199 474	kr 12 000	kr 222 779	-kr 11 304
TEG (2)	kr 2 153 326	kr 12 000	kr 2 404 895	-kr 239 569

Kostnaden ved installasjon av TEG ser kun på modulkostnader og en planlagt installasjon etter antall arbeidstimer. Den inkluderer ikke kostnad for en videre utredelse om installasjon, testing og prøving eller tar hensyn til buffer og uforutsette hendelser. Det er derfor naturlig å anta at kostnaden for en installasjon av TEG vil være høyere enn forespeilt i oppgaven.

## Tokt:

Tabell 4-30 Tokt kapasitet med og uten TEG

### Kapasitet - tokt:

Hva:	Drivstoff tank	drivstoff forbruk [l]	antall døgn	rekkevidde døgn [nm]	rekkevidde tokt [nm]	eksta [nm]	ekstra [km]
tokt	50000	960	52	144	7500	0	0
tokt med TEG (1)	50000	952	53	144	7562	62	114
tokt med TEG (2)	50000	875	57	144	8226	726	1344

Tabell 4-31 kapasitet taktisk ladning med og uten TEG

Kapasitet - taktisk ladning					
Ladning:	Lade tid [min]	Lade tid [sek]	Besparelse [sek]	Besparelse	Ladetid
uten TEG	20	1200	0	0	20 min
Med TEG (1)	19,84	1190	10	0 min og 11 sek	19 min og 49 sek
Med TEG (2)	18,23	1094	96	1 min og 30 sek	18 min og 30 sek

#### 4.8.5 Konklusjon: Hvordan vil dette påvirke den strategiske kapasiteten til ubåten.

Det er her gjort tre viktige funn. For det første så viser beregningene at ingen av installasjonene vil gå i tap økonomisk, det ser faktisk ut til at du vil spare penger i drivstoffkostander. For det andre så øker kapasiteten til fartøyet i form av lengre rekkevidde. For det tredje kan man spare snorkletid.

Dette er gode funn fordi ubåten har sin kritiske fase når den snorker, er dette helt essensielt å holde snorkletiden så kort som overhodet mulig. I tillegg vil økt rekkevidde gi en strategisk kapasitet som er helt avgjørende for et militært fartøy. En annen fordel som følge av dette er at tiden mellom vedlikeholds sykluser kan forlenges. Samt belastningen på besetningen går ned under operasjon og til kai, som følge av mindre vedlikehold. Som betyr at en ubåt kan være operativ tilgjengelig lenger, samt vedlikeholdskostnadene går ned.

## 5. Diskusjon

I dette kapitlet skal problemstillingen besvares. Først blir del en av problemstilling besvart, om det er mulig å utnytte spillvarmen til lyddemperen. Deretter blir andre del av problemstillingen besvart med å evaluere strategisk kapasitet og kostnad mot hverandre med bakgrunn i en optimal løsning. Til slutt er det et avsnitt som tar for seg veien videre som løfter blikket med en anbefaling.

### 5.1 Er det mulig?

Første del av problemstillingen lyder som følger:

*Er det mulig å utnytte spillvarmen til eksisterende eksosanlegg ved hjelp av en termoelektrisk generator?*

For å kunne avgjøre om det er mulig å installere en TEG på Ula-klassen undersøkte vi først teknologien rundt termoelektrisitet og det tekniske systemet om bord. Dette for å redegjøre for eventuelle begrensninger.

For at en TEG skal fungere, er det ikke mange aspekter som må oppfylles. Begrensingen ligger på de mekaniske egenskapene til materialet. Det vil da være avgjørende å velge materiale i forhold til smeltepunkt, duktilitet, korrosjonsbestandighet og utmatting. Dette er gjort rede for under delkapittel 4.3 og 5.2.1.

Vi har ikke sett på muligheten for tilkobling til det elektriske systemet ombord. Men fordi TEG produserer likestrøm, ser vi ikke dette som en utfordring. Vedrørende integrasjon på lyddemperen kommer det frem fra resultatdelen 4.7.3 *Visuell konstruksjon* tegnet i Solidworks og figur 46 og vedlegg E originalfilene, at en enkel kledning av termoelektriske moduler på den eksisterende varmeveksleren er mulig. Men ettersom lyddemperen reduserer lyden og kjøler eksosen, vil endring av eksoslyd og temperatur kunne være avgjørende i forhold til strategisk kapasitet. Dette vil da ikke avgjøre om det er mulig, men heller om det er gunstig, som vi drøfter i neste delkapittel. Derfor vil vi konkludere med at det er mulig å integrere en TEG på det eksisterende eksosanlegget.

## 5.2 Er det gunstig på eksisterende varmeveksler

Andre del av problemstillingen til oppgaven er som følger:

*Er det gunstig for ULA-klassen å utnytte spillvarmen til eksisterende eksosanlegg ved hjelp av en termoelektrisk generator (TEG)?*

Måten problemstillingen skal besvares på er å diskutere to aspekter: strategisk kapasitet og kostnad som er basert på en optimal løsning for installasjon av TEG på lydempere. Disse aspektene skal vi analysere for å kunne konkludere om det er gunstig med en termoelektrisk installasjon. Vi starter med en presentasjon av en optimal løsning. Dette skaper grunnlaget for å vurdere gunstighetene mellom strategisk kapasitet og kostnad.

### 5.2.1 Optimal løsning for en installasjon av en TEG

#### 5.2.1.1 Faktorer å ta hensyn til:

For å konstruere en optimal løsning er det tre faktorer man må ta hensyn til. Det første er mekaniske egenskaper, som er gjort rede for gjennom i diskusjonen i avsnitt 5.1. Det andre og tredje tar for seg hvordan oppnå høyest mulig virkningsgrad. Det er spesielt viktig at modulene er varmetilpasset og at kontaktflaten mellom varmekilden og modulen er best mulig. Modulene må ikke være underdimensjonert slik at de er tilpasset smeltepunktet, men heller ikke være overdimensjonert for å få god virkningsgrad – dette er belyst i delkapittelet 4.3. Derfor er det viktig å kartlegge hvilke temperaturer kontaktflaten til TEG-modulene blir utsatt for. Temperaturfallberegningen er gjort i avsnitt 4.7.4.7.3 med figur 55 viser at når middeleksostemperaturen ligger på 380 °C er ikke kontakttemperaturen på mer enn 120 °C. I tillegg viser beregningene at ved makstemperatur på 540 °C ligger kontakttemperaturen på 350 °C.

I avsnitt 4.4 ble det utredet om valg av termoelektriske moduler. Skutterditt egner seg godt som et termoelektrisk materiale fordi en kan oppnå høye zT-verdier. På tross av dette er ikke materialet like egnet når en inkluderer de mekaniske egenskapene. Skutterditt har en lav smeltetemperatur som begrenser bruken, i tillegg til at det er et porøst materiale som lett knuses ved slag. Eksempelvis har TEGma sluttet med utvikling og produksjon av termoelektriske moduler som bruker skutterditt (Tollefsen 2017). Vismut Tellur er det termoelektriske materiale som er valgt for denne oppgaven basert på kontakttemperaturen

modulene blir utsatt er mest optimal hos Vismut Tellur i henhold til tabell 4-2. Det er her viktig å presisere at vi bare har gjort rede for termoelektriske materialer fra én leverandør, men denne leverandøren var da anbefalt av fagpersonen Tollefsen fra TEGma.

For å oppnå best mulig kontaktflate for termoelektriske moduler på lyddemperen er det under delkapittelet 4.7 sett på to løsninger: Sliping av varmeveksler og påmontering av en plate. Det ble konkludert med at løsning 2 – sliping av sylindere – er den mest optimale løsningen for denne oppgaven fordi den krever mindre materiale og gir derfor lavere termiskresistans i henhold til avsnitt 4.2.7.3, i tillegg til mer plass til sjøvannet. Som presisert i samme avsnitt og figur 15 om termiskresistans, må kontaktflaten være finest mulig og påsmurt termiskgris, slik at den termiske resistansen blir lavest mulig.

Informasjon om generatorytelsen på ubåtene er ikke offentlig tilgjengelig, og vi har derfor laget et fiktivt eksempel for å synliggjøre potensiale til installasjon av en TEG. Beregningene med det fiktive eksempelet er i delkapittelet 4.9.2 og tabell 4-27 presenteres potensiell besparelse av en mulig installasjon av en termoelektrisk generator til i forhåndstall til nesten 1% på eksisterende lyddemper. Denne prosenten brukes videre for å diskutere strategisk kapasitet og kostnader.

### 5.2.2 Strategisk kapasitet

Når vi ser på den strategiske kapasiteten er det vurdert to faktorer som en TEG installasjon kan påvirke: signatur og utholdenhet.

#### 5.2.2.1 Signatur

Vedrørende signatur er det to aspekter som er viktig. Det første er signatur på grunn av temperatur. Figur 54 i avsnittet 4.7.4.7.2 viser at ved integrasjon av TEG på eksisterende varmeveksler vil temperaturen ut av varmeveksleren øke med 34 °C, fra 225 °C til 259 °C ved inngangstemperatur på 380 °C. Det andre gjelder signaturer ved overflateeksponering - når ubåten er oppe for å snorkle. Vi har gjort et estimat for det vi har kalt «taktisk snorkling» på 20 min. Ved den fiktive historien under delkapittel 5.3.1 er det en reduksjon i overflateeksponeringstid på 11 sekunder.

### 5.2.2.2 Utholdenhet

I tabell 4-28 fremkommer det at ved å bruke prosenten for besparelse og driftstideksempellet som er beskrevet i tilhørende avsnitt, øker utholdenheten per tokt med 8 liter drivstoff spart hver dag. Dette resulterer i en økt rekkevidde kapasitet på 62 nautiske mil per tokt. Figur 64 (den minste avstanden) viser den økte kapasiteten i forhold til norskekysten.

### 5.3.2 Kostnad

Delkapittelet 4.9.3 tar for seg anslåtte kostnader for en installasjon av en termoelektrisk generator på eksisterende lyddemper. Kostnadene er beregnet fra antall mulige moduler som passer på lyddemper vist i tabell 4-29 som vil koste rundt 200 000,- totalt i materialpris. Arbeidstimer er anslått til 12 000,- i installasjonskostnader (Tollefsen 2017). I det fiktive eksempelet i avsnitt 4.9.2 og 4.9.3 med tabell 4-28 presenterer potensialet for besparelse til driftstimer og drivstofforbruket. Ved å spare 2865 liter drivstoff årlig vil en med en dieselpriis på 11,11,- man over 7 år 222 779,-. Utdrag er hentet fra tabell 4-28 og 4-29.

Totale kostnader:				
Navn	TEG-moduler	Installasjon	Sparing i drivstoff pr. 7 år	Totalt
TEG (1)	kr 199 474	kr 12 000	kr 222 779	-kr 11 304

#### 5.2.4 Diskusjon

Det skal nå diskuteres om det er gunstig med en installasjon av en termoelektrisk generator ved å vurdere de to aspektene; strategisk kapasitet og kostnad mot hverandre. Argumentene vil være basert på resultatene til oppgaven som er presentert tidligere i delkapittelet 5.2.

Hvis en vurderer kostnaden for installasjonen og den praktiske funksjonaliteten isolert sett, så er det ikke gunstig. Grunnen til det er at det er en investering på rundt 210 000,-, med kun en årlig drivstoffbesparelse på 30 000,-. I tillegg vil utgangs-eksostemperatur øke med 34 °C ved en installasjon av TEG. For ubåtvåpenet er det ikke ønskelig at utgangs-eksostemperatur øker, tvert imot er målet å redusere den termiske signaturen.

Retningslinjene til ubåtvåpenet understreker at det skal være store fordeler for å implementere et nytt system om bord. Resultatene våre viser at overflateeksponeringen på 20 minutt kan reduseres med 11 sekunder, noe som anses som ubetydelig. Et annet aspekt som har en strategisk betydning er økt utholdenhet. Resultatene våre viser at på et fiktivt tokt kan en spare 8 liter med drivstoff hver dag som vil gi ubåten en økt rekkevidde på 62 nautiske mil per tokt. I en krigssituasjon der utholdenhet er essensielt, kan etterforsyning være umulig og i slike situasjoner en TEG bidra med det lille ekstra som er utslagsgivende for å overleve. Dog, en besparelse på 8 liter drivstoff daglig tilsvarer bare rundt cirka to timer med dieselkjøring per tokt ekstra, noe som er minimalt i et perspektiv der kostnadene for å operere en ubåt er i millionklassen.

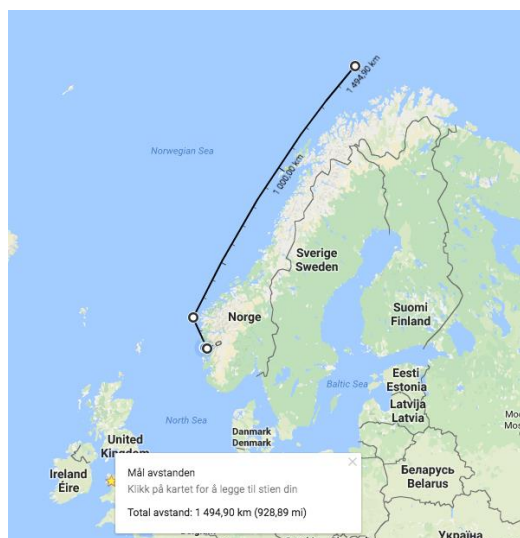
Basert på resultatene i oppgaven og diskusjonen besvarer vi problemstillingen med at det ikke er gunstig med en installasjon av en termoelektrisk generator fordi fordelene er nesten ubetydelige mot ulempen økt termisk signatur. Resultatene har imidlertid også vist at det er et stort potensiale med en ny konfigurasjon til en varmeveksler - dette vil neste avsnittet ta for seg.



## 5.3 Veien videre

I løpet av oppgaveperioden har vi oppdaget muligheter for installasjon av en ny løsning med installasjon av en TEG – som kan gi både strategiske og økonomiske fordeler. For det første er lydtempereren som er montert om bord en dårlig varmeveksler. Dette kommer nok av at den er gammel, pålitelig og har som hovedoppgave å dempe lyden. Vi har derimot vist i avsnitt 4.8.9.1 og figur 62 at ved bruk av nesten det samme volumet kan man installere en varmeveksler som er 3 ganger så effektiv. Dette er interessant, for som tidligere nevnt ønsker Ubåtvåpenet å redusere den termiske signaturen. Ved en ny konfigurasjon kan temperaturen ut av varmeveksleren reduseres fra 225°C til 100 °C som figur 62 viser, noe som er betraktelig lavere og vil gi en reduksjon av fartøyets signatur. Det er viktig å presisere at dette er en helt enkel beregning som ikke tar hensyn til noe mer enn et større indre varmeoverføringsareal. Den tar heller ikke hensyn til lydtempereregenskapene til den eksisterende lydtempereren. Men poenget står, og det er at signaturen ut av ubåten enkelt kan reduseres.

For det andre har vi sett at en annen konfigurasjon kan hente ut mye mer effekt fra spillvarmen. Fra avsnitt 4.9.3.2 og tabell 4-31 ser vi at overflateeksponeringen kan reduseres med 1 min og 30 sek. Noe som kanskje ikke er det helt store, men i en krigssituasjon hvor hver liten fordel teller kan det være det lille ekstra som avgjør. I tillegg ser vi at ubåten kan redusere forbruket sitt med 21 liter pr. døgn. Dette fører til mindre vedlikehold av utstyr, drivstoffbesparelsen, og en ekstra rekkevidde 700 nm pr tokt, noe som tilsvarer 1300 km. Det betyr at ubåten kan bevege seg opp hele norskekysten uten etterfylling, noe som vil føre til en betraktelig økt rekkevidde. Dette er illustrert i figur 64.



Figur 64 Kart over norskekysten som illustrerer økt rekkevidde ved installasjon av TEG 1 og TEG 2.

Vi finner derfor veien videre meget interessant, og viktig. I kontakt med en av ingeniørene fra ThyssenKrupp, verftet som skal bygge de nye norsk konvensjonelle ubåtene som skal leveres i 2025, informerer de oss om at verftet ikke har prosjekter som ser på muligheten til å utnytte spillvarmen til en varmeveksler ved hjelp av termoelektrisitet. Det er uvisst om de har undersøkt potensialet til termoelektrisitet tidligere, eller hvorfor de ikke har pågående prosjekter som undersøker potensialet. Vår studie gir grunnlag til å utrede en ny studie for konstruksjon og installasjon av TEG på de nye ubåtene til Norge. En økt utnyttelse av energi har mange militære fordeler som økt operativ tilgjengelighet, økt rekkevidde og den viktigste av alle; redusert eksponeringstid ved snorkling. Et slikt prosjekt vil være unikt etter dagens standard.

Forsvaret kan være med på det grønne skiftet med ny teknologiutvinning. Ser vi mot Sverige så laget de sine egne ubåter av type Gotlandklassen som ble sjøsatt i 1995. De var på den tiden verdens første ubåter som ble konstruert med Stirlingmotorer som kan brukes til å generere elektrisitet fra spillvarme og som på mange måter har den samme teknologi som TEG. Fordelen med TEG kontra Stirling er alle de bevegelige delene som Stirlingmotoren innehar. I kombinasjon med dette er Gotlandklassen utstyrt med luftuavhengig fremdrift (Air-Independent Propulsion (AIP) ([www.forsvarsmakten.se](http://www.forsvarsmakten.se))). Det er bestemt at de nye ubåtene til Norge også skal være utstyrt med luftuavhengig fremdrift.

Norge har nå muligheten til å være innovative og ledende med ny teknologi. Norge kan bli den første nasjonen til å inneha AIP og TEG. Forsvaret har gjennom historien vært en viktig bidragsyter til utvikling av ny teknologi, og ny teknologi har gi enorme fordeler. Forsvaret investerer i nye jagerfly, ubåter, kystvaktskip og luftvern, og med AIP OG TEG så vil forsvaret både være innovative og kostnadseffektive.

## 6. Konklusjon

Resultatene for en installasjon av TEG på lyddemperen viste fem følgende funn;

1. Det er mulig å utnytte spillvarmen i lyddemperen ved hjelp av termoelektrisitet.
2. Den termiske signaturen til eksosen øker med 34 °C.
3. Årlig kostnadsbesparelse på drivstoff er rundt 30 000,- noe som i et 7 års perspektiv resulterer i et 7 års besparelse på nesten 12 000,- når installasjonskostnaden er 210 000,-.
4. En installasjon gir økt rekkevidde på rundt 60 nm per tokt.
5. Det er mulig å redusere eksempelvis nåværende 20 minutters snorkletid, reduseres med 11 sekunder.

Og ved å diskutere de to aspektene - kostnad og strategisk kapasitet mot en optimal installasjonsløsning - har vi kommet frem til følgende svar på problemstillingen:

*Det ikke er gunstig med en TEG installasjon på eksisterende lyddemper.*

Dette begrunnes med at årlig besparelse av drivstoff, redusert snorkeltid og økt rekkevidde, nesten er ubetydelige. Og siden termisk signatur øker, kan det ikke argumenteres for at en installasjon av TEG på eksisterende lyddemper er gunstig.

Det har ikke blitt laget en prototype for testing, det må derfor tas forbehold om feil i beregninger siden vi ikke har fått verifisert dem. Likevel mener vi at det gir en god indikasjon på hva som blir påvirket og hvordan det blir påvirket. Dette gjør det lettere for oss å konkludere med at det vi tror er riktig.

Vi mener det er viktig å være fremtidsrettet, og derfor vil vi rette oppmerksomheten mot de nye norske ubåtene. Det er ikke lenge siden det tyske verftet ThyssenKrupp vant anbudsrunder for produksjon av Norges fremtidige ubåter. I dialog med en ingeniør hos ThyssenKrupp kom det frem at de ikke har noen prosjekter eller utredelser om potensialet til utnyttelse av spillvarmen ved hjelp av termoelektrisitet.

Resultatene til beregningene på en alternativ varmeveksler viser følgende to fordeler:

For det første ble det vist at en alternativ varmeveksler kan gjøres tre ganger så effektiv som

den eksisterende. Gjennom å redusere utgangstemperaturen til eksosen fra 225 °C til 100 °C, reduseres den termiske signaturen betraktelig.

For det andre viser resultatene at en alternativ varmeveksler kledd med TEG-moduler kan produsere 10 ganger så mye effekt som ved TEG installasjon på lyddemperen. Denne effektøkningen fører til to fordeler: 20 minutters snorkletur reduseres med 1 minutt og 30 sekunder og drivstoffbesparelse på 21 liter per døgn resulterer i en økonomisk besparelse og ekstra rekkevidde på 700 nm per tokt. En ny varmeveksler som reduserer termisk signatur best mulig, har optimal tilretteleggelse for en TEG og opprettholder dagens støyreduksjon vil føre til økt strategisk kapasitet for de nye ubåtene.

*Vi anbefaler derfor at det gjøres videre utredelser på potensialet for en mulig installasjon av en TEG på de nye norske ubåtene.*

## 7. Bibliografi

**Ashby, M. F.** (2017). *Materials selection in mechanical design* (5th ed.).

**Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.** (2011). *Materials science and engineering* (9th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

**Christensen, N.** (2009, February 14). metallografi – Store norske leksikon. Retrieved January 27, 2017, from <https://snl.no/metallografi>

**El-Desouky, A., Carter, M., Andre, M. A., Bardet, P. M., & LeBlanc, S.** (2016). Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices. *Materials Letters*, 185, 598-602.

**Eriksen, L. H.** (2009, February 14). fresemaskin – Store norske leksikon. Retrieved May 23, 2017, from <https://snl.no/fresemaskin>

**Fjellvåg, H.** (2009, February 14). Czochralski-metoden – Store norske leksikon. Retrieved January 22, 2017, from <https://snl.no/Czochralski-metoden>

**Fjellvåg, H.** (2009, February 14). ikke-metaller – Store norske leksikon. Retrieved January 25, 2017, from <https://snl.no/ikke-metaller>

**Offentlig dokument:** Forsvarsstaben ((2014, oktober 01) Forsvarets fellesoperative doktrine. Oslo: Media as.

**Offentlig dokument:** Informasjon om Gotlandklassen – [www.forsvarsmakten.se](http://www.forsvarsmakten.se) , 23.05.2017

**Gayner, C., & Kar, K. K.** (2016). Recent advances in thermoelectric materials. *Progress in Materials Science*, 83(2016), 330-382.

**Gjengedal, R.** (2016, August 18). *Krystallinske metaller* [onenoe].

- Gjengedal, R.** (2016, September 8). *Korn grense* [onenote].
- Grøn, Ø.** (2016, December 9). elektrisk strøm – Store norske leksikon. Retrieved January 30, 2017, from [https://snl.no/elektrisk\\_str%C3%B8m](https://snl.no/elektrisk_str%C3%B8m)
- Grøn/Høgskolen i Oslo og Akershus, Ø.** (2009, February 15). termoelektrisk effekt. Retrieved January 30, 2017, from [https://snl.no/termoelektrisk\\_effekt](https://snl.no/termoelektrisk_effekt)
- Grøn/Høgskolen i Oslo og Akershus, Ø.** (2009, February 15). Thomsons effekt. Retrieved January 30, 2017, from <https://snl.no/thomsoneffekt>
- Grøn/Høgskolen i Oslo og Akershus, Ø.** (2015, November 23). impedans – fysikk – Store norske leksikon. Retrieved April 19, 2017, from [https://snl.no/impedans\\_-\\_fysikk](https://snl.no/impedans_-_fysikk)
- Grøn/Høgskolen i Oslo og Akershus, Ø.** (2016, December 9). elektrisk ladning – Store norske leksikon. Retrieved January 30, 2017, from [https://snl.no/elektrisk\\_ladning](https://snl.no/elektrisk_ladning)
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P.** (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer* (5th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Linder, J.** (2017, May 17). Fermienergi – Store norske leksikon. Retrieved May 23, 2017, from <https://snl.no/Fermienergi>
- Lund, A. 1.** (2012). *Termodynamikk og strømningslære* (2nd ed.).
- Lundby/NTNU: institutt for marin teknikk, L., & Æsøy/NTNU: institutt for marin teknikk, V.** (2011). Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs. In *Havromsteknologier*. Retrieved from <http://www.ntnu.no/documents/14574940/2c3b364e-220b-48cc-8d52-3d7b52d37e33>
- Lødøen, S Macdonald, R** (2003, November 03). Forsvarets forskningsinstitutt - Undervannsbåtens nye roller. Mars 01, 2017 fra FFI-Fokus Forsvarsfagelig tidsskrift. <https://www.ffi.no/no/Publikasjoner/Documents/FFI-Fokus-2003-6.pdf>

**Meier-Peter, H., Bernhardt, F., & Ackermann, G.** (2009). *Compendium marine engineering: Operation, monitoring, maintenance*. Hamburg: Seehafen Verlag.

**Moran/The Ohio State University, M. J., Shapiro/Wayne State University, H. N., Boettner/U.S. Army, D. D., & Bailey/Rochester Institute of Technology, M. B.** (2012). *Principles of engineering thermodynamics*, (7th ed.). Asia: John Wiley & Sons.

**Næss, A. A.** (2009, January 15). vannskjæring – teknikk – Store norske leksikon. Retrieved May 23, 2017, from [https://snl.no/vannskj%C3%A6ring - teknikk](https://snl.no/vannskj%C3%A6ring_-_teknikk)

**Offentlig dokument:** Sjøforsvarsstaben (2015, desember 15). Forsvarets doktrine for maritime operasjoner. Oslo: Media as.

**Pedersen, B.** (2009, February 14). konveksjonsstrøm – fysikk – Store norske leksikon. Retrieved January 30, 2017, from <https://snl.no/konveksjonsstr%C3%B8m/fysikk>

**Pedersen, B.** (2014, April 14). anion – Store norske leksikon. Retrieved January 26, 2017, from <https://snl.no/anion>

**Pedersen/SNL, B.** (2015, March 25). anisotropi – Store norske leksikon. Retrieved May 2, 2017, from <https://snl.no/anisotropi>

**Pedersen, B.** (2015, March 25). van der Waals binding – Store norske leksikon. Retrieved May 2, 2017, from [https://snl.no/van\\_der\\_Waals\\_binding](https://snl.no/van_der_Waals_binding)

**Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A.** (2016). *Research methods for business students* (7th ed.). Edinburgh, England: Pearson Education Limited.

**Skomedal, G.** (2016). *Thermal durability of novel thermoelectric materials for waste heat recovery*. Retrieved from University of Agder Faculty of Engineering Sciences website:

**Store Norske Leksikon.** (2009, February 14). overgangsgrunnstoffer – Store norske leksikon. Retrieved January 25, 2017, from <https://snl.no/overgangsgrunnstoffer>

**Rowe, D., & Min, G.** (1996). Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 143(6), 351-356.

**Thermoelectrics. (n.d.)**. Retrieved April 13, 2017, from <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>

**TELP Series - TELP1-12662-0.9** Retrieved April 19, 2017  
[http://thermonamic.com/pro\\_view.asp?id=839](http://thermonamic.com/pro_view.asp?id=839)

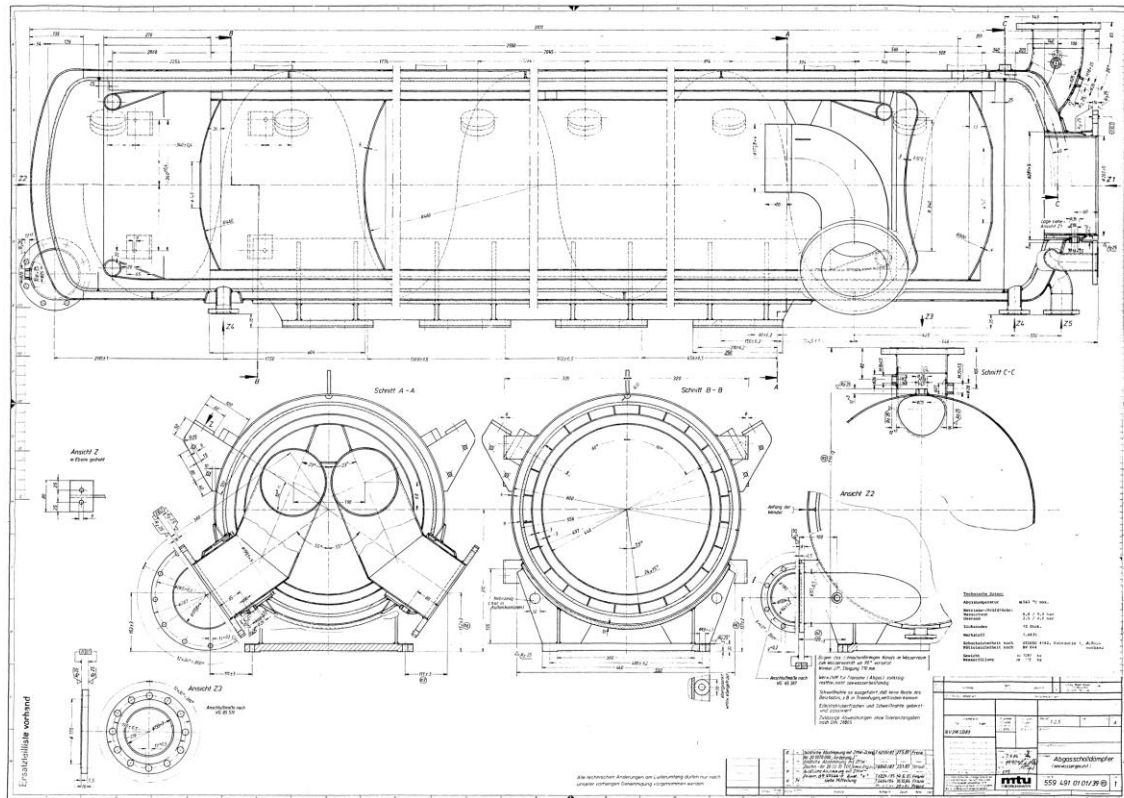
**TEP Series - TEP1-24156-2.4.** Retrieved April 19, 2017  
[http://thermonamic.com/pro\\_view.asp?id=802](http://thermonamic.com/pro_view.asp?id=802)

**Tollefsen, T.A** – Intervju Oslo, 21.04.2017.

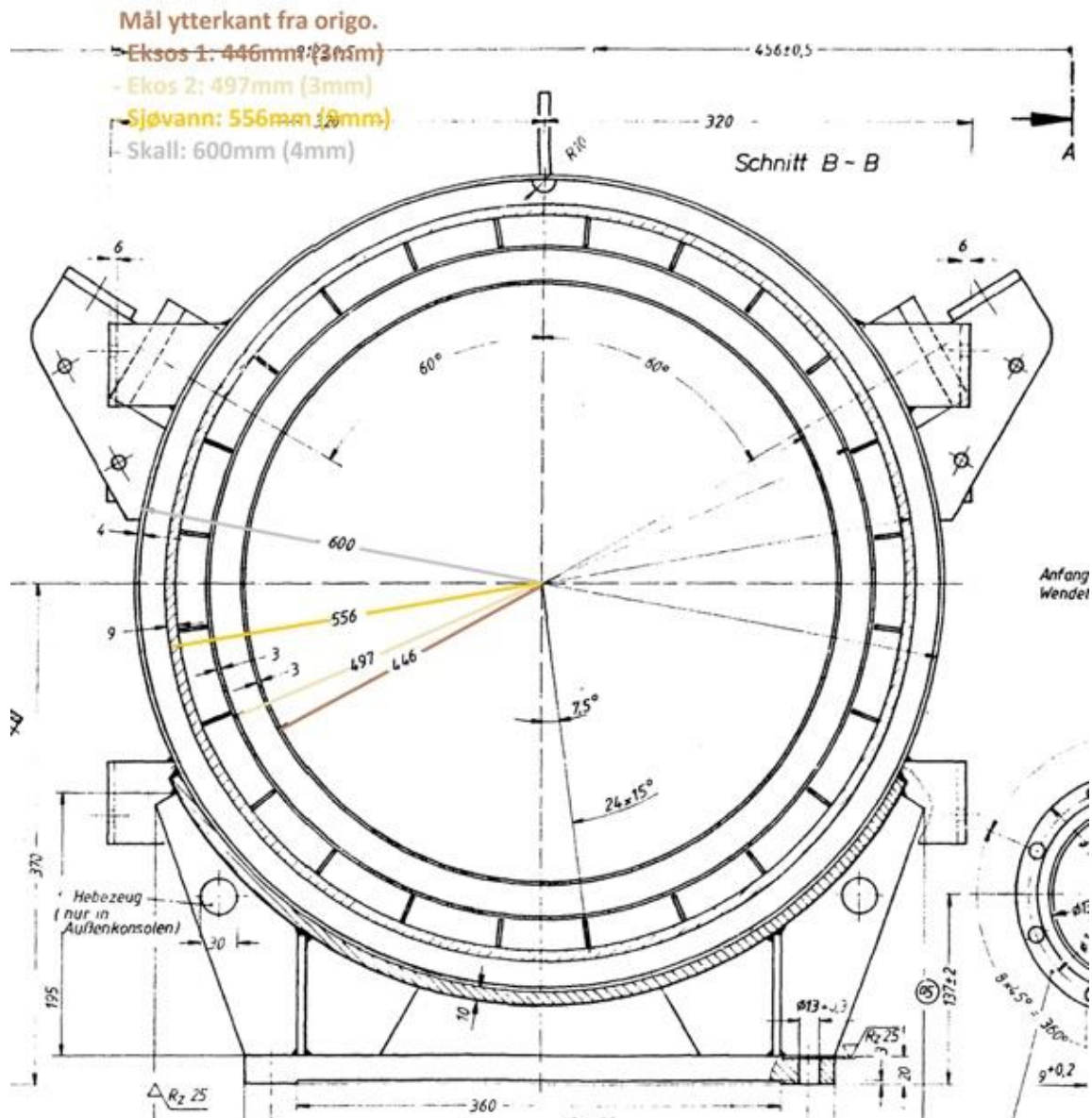


# 8. Vedlegg

Vedlegg A – Tekniske tegninger og bilder hentet fra vedlikeholds-rapport lydtemper  
Teknisktegning av lydtemperen hentet fra vedlikeholds-rapport av lydtemper



Figur 65 Teknisktegning 1 hentet fra vedlikeholds-rapport av lydtemper



Figur 66 Teknishtegning 2, nærbilde av teknisk tegning 1 og presisert radius hentet fra vedlikeholds-hentet fra rapport av lydtemper



Technische Daten:


Abgastemperatur	ca. 540 °C max.
Betriebs-/Prüfdrücke:	
Wasserraum	6,0 / 9,0 bar
Gasraum	2,5 / 4,0 bar
Zinkanoden	12 Stck.
Werkstoff	1.4435
Schocksicherheit nach Rüttelsicherheit nach	STANAG 4142, Kategorie 1, Außen- verband
Gewicht	ca 1090 kg
Wasserfüllung	ca 125 kg

Figur 67 Teknisktegning 3, spesifikasjonsdata for lyddemper.

# Vedlegg B Sertifikat til lydtemperen.

Tabell 8-1 Viser sertifikatet til lydtemperen, hentet fra vedlikeholds-rapport av lydtemper

<b>INSPECTION CERTIFICATE 3.1</b> ABNAHMEPRUFZEUGNIS 3.1  To: EN 10204		 <b>C.COLUMBUS STAINLESS</b> Ltd Columbus Stainless   P.O. Box 133   1050 South Africa •27 13 247   13 246 1681 Website: http://www.columbus.co.za		2439471 - Datum 02-Jan-2013																														
				MANUFACTURERS MARK  Herstellereichen METALLOGRAPH <b>E/AOD</b> Färschtlungsart																														
CUSTOMER (Besteller)  EP14314  CUSTOMER ORDER No (Kundenbestell-Nr) Hernandez  REQUIREMENTS AD W: A) WIO Certified by TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg to Directive 971 for Pressure Equipment, Certificate no 01 202		TUV Rheinland 1.4435 1.4432		INSPECTION MARK  Zeichen des Sachverständigen																														
PREPARATION (Fertigungsform) 2B Kaltgewalzt, warmbehandelt, gebeizt, kalt nachgewalzt 2B: Cold rolled, heat treated, pickled, cold rolled		NO. 389205 * The first numbers are heat character represent a part of the slab with common mechanical properties.		MPONo. 3892052/1 slab detector																														
SPECIFICATIONS (Eigenschaften) EN 10088-2 2005 COLD ROLLED COIL & SHEET 1.4435 1.4432 EN 10028-7 2007 COLD ROLLED COIL & SHEET 1.4435 1.4436 ASTM A240 / A240M-12 316L 316 ASME SECT II.A ED.2010 ADD.201 1 SA240 316L 316		MATERIAL CODE GCP108539		101 BRAND; (ISO 944.6-02/09-ASTM A480/480M/ASME SA480iSA480M CIR) Delivered Note No. 33364																														
DIMENSIONS (Abmessungen) 4.000 mm x 1.000 00 mm x COIL		KURZNAME X2CrNiM0 18 14 3		VIJAMI MASS																														
CHEMICAL ANALYSIS (Chemische Zusammensetzung) REQUIREMENTS (Anforderungen) LADLE (Schmelze)		MECHANICAL PROPERTIES (Mechanische Werte) 5 (*Elongation) Hardness (IRB) Bend Impact Test (Kerbschlagarbeit ISO 15653)																																
C	S	P	Mn	Si	Ni	Ti	Co	Sn	0.030	0.015	0.045	0.020	0.022	0.003	0.020	0.51	12.6	17.8	2.56	0.03	Head	339	383	623	50	46	85	Req a	Req a	EST (Zusätzliche Prüfungen)	RFSJLT	IRREGULAR CORROSION (Interkristalline Korrosion)	N (Number)	RFSI
																				TEST NAME		RFSJLT		ASTM A262-10:E		PASS								
																				TEST NAME		RFSJLT		EN ISO 3651-2		PASS								
																				TEST NAME		RFSJLT												
																				TEST NAME		RFSJLT												

		Solution	<p>This material is free from mercury contamination.  The radiation level exhibited by this material is not greater than the normal background level.  This document is issued without alteration or erasure and may only be reproduced in full.  Tests to verify batch and quality have been made. Verwechslungsprüfung wurde durchgeführt.  Visual and dimensional control: no exceptions. Hinsichtungen und Abmessung: ohne Beanstandung.  The delivery is in accordance with the order. Die Lieferung entspricht den Postleibehaltungen.  Made and packed in South Africa.  This material meets the hardness requirement of Sacc NBR-0175 &amp; NBR-0105-2012 ISO 15156.  Material has been PMI Tested.</p>
Anneal		Quench	
		AIR/SPRAY	
<p>Mit Schreiben WEI-33 vom 5.1.1972 hat der TÜV RHEINLAND e.v. auf eine Gegenzeichnung verzichtet. Für AD WOTTRB 100  In their letter WE 133 of 5.1.1972 TÜV RHEINLAND e.v. cancel the requirement of the countersigning. TO AD WOTRB 100 Werkstoff.  Herstellerzeichen- Stempel des Sachverständigen Material code.  Manufacturers Brand, Inspectors Stamp No weld repair.</p>			<p>Columbus Stainless is ISO 9001:2009 &amp; ISO 14001:2009 certified.</p>
<p>DER WERKS  SACHVERSTANDIGE</p>			<p>COLUMBUS STAINLESS IPtyl Ltd  Hendrina Road, Middelburg  Mpumalanga, South Africa</p>  <p>P.H. de Vos  DER WERKS  SACHVERSTANDIGE</p>

## Vedlegg C – Spesifikasjoner til TEP-series fra Thermonamic

For oppgaven ble det valgt to termoelektriske moduler fra nettsiden Thermonamic.

De to var:

TEP1-24156-2.4 Vismut Tellur - [http://www.thermonamic.com/pro\\_view.asp?id=802](http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=802)

TELP1-12662-0.9 Bly Tin Tellur - [http://www.thermonamic.com/pro\\_view.asp?id=839](http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=839)

Det vil nå bli vedlagt spesifikasjon og installasjons guide produsert av Thermonamic hentet fra nettsiden deres.

## Power Module Installation Notes

The power module has large thermal expansion. When the module is running and cycling over large temperature difference, the proper mounting to ensure even pressure applied on module is very important. Please read through below before installation.

### Hot Side and Cold Side Identification:

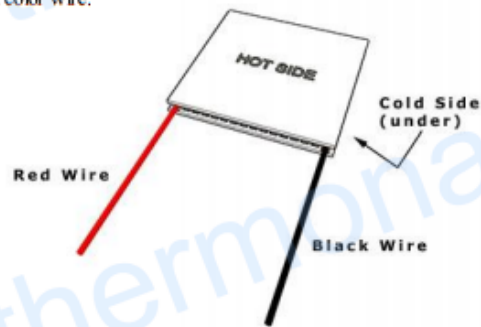
The modules will generate electricity only if there is a temperature difference across the modules. So, you need to attach one side of the modules to a heat source and the other side to a cool source like heat sink to dissipate the heat coming from heat source through the modules.

Our module is unique and different to others. The modules have cold and hot sides. You should attach the cold side to heat sink or heat exchanger, and hot side to heat source. Then the positive output is in red wire, if reversed, then in black color wire.

The temperature on the hot side of the module can work continuously at as high as 330 °C (626 °F) and intermittently up to 400 °C (752 °F). But the temperature at cold side of the module cannot work properly above 200 °C (392 °F). So, if the mounting is reversed, and the cold side of module is attached to heat source above 200 °C (392 °F), the module will degrade quickly or fail immediately. So, please ensure hot side attached to heat source is very important.

Below is the diagram to show which side of module is hot or cold one, where the wire direction faces you. ( Usually, you also can see a marking "Hot Side" on hot side ceramic plate)

The positive output will be on red color wire if the installation is correct. The reversed installation will lead to negative output from red color wire.



### Temperature Limits

Temperature range of the TEG Hot side: -60 °C ~ 330 °C, Maximum 400 °C

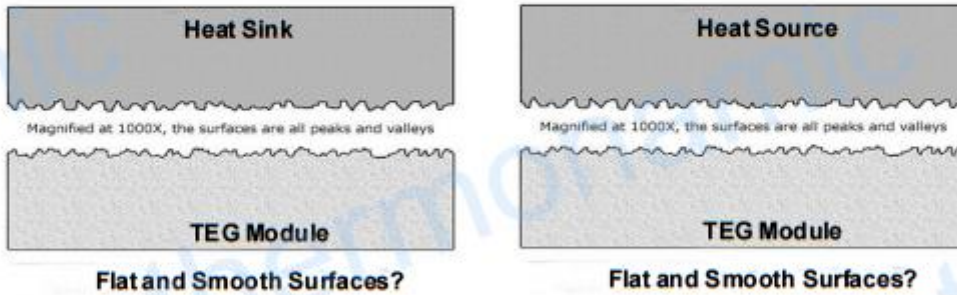
Temperature range of the TEG Cold side: -60 °C ~ 180 °C, Maximum 200 °C

Figur 68 Vismut Tellur modulinstallasjon side 1

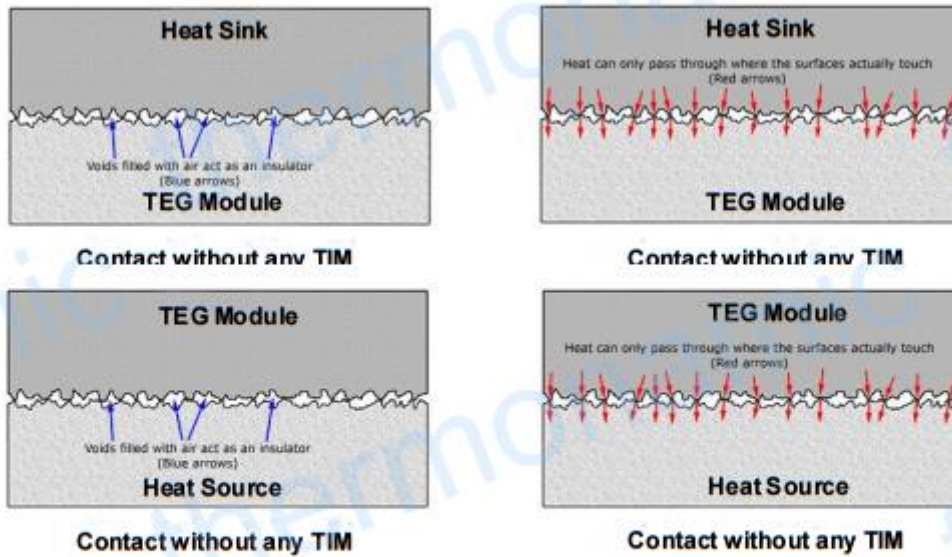
**Thermal Interface:**

**Microscopic Look at Surfaces**

Even when you have two “flat and smooth” surfaces, they are far from truly flat or smooth. The diagram below shows what’s really going on at a microscopic scale.



As you can see, the two surfaces may look flat and smooth, but in reality, when examined under magnification, they consist of “hills”, “peaks”, and “valleys”. When these two surfaces are brought into contact with one another, only the peaks make contact. It has been calculated that the average amount of contact between any two smooth surfaces is in reality only 5%. The other 95% are voids!



The above image shows how the remaining valleys create voids through which heat energy can barely pass through, in effect creating an insulated area – not the ideal thermal interface.

Figur 69 Vismut Tellur modulinstallasjon side 2



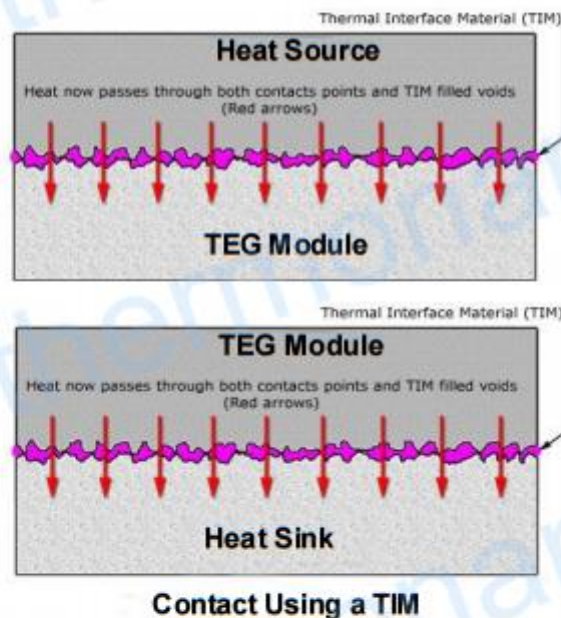
### Surface Finish and Preparation

As a minimum, any surface intended to be part of a thermal interface should be flat to  $\pm 0.001$  inches over the entire interface surface and smooth to a surface finish of 32 micro inches or better.

The interface surface must be thoroughly cleaned. Once all machining and polishing is completed, Do not touch the surface with bare hands (skin oils) or allow any contact with other materials. It is better to complete this final cleaning stage just before assembly so as to minimize any dust or contamination.

### Thermal Interface Materials (TIM)

A "third party" interface material is needed since it is all but impossible to achieve ideal flat and smooth surfaces. The purpose of the TIM is to fill the valleys and gaps with a compressible material that has a much higher thermal conductivity (ability to transfer heat) than the air gaps it replaces. This essentially makes the entire interface transfer heat instead of just where the peaks were contacting. The following image shows how the situation has been dramatically improved.

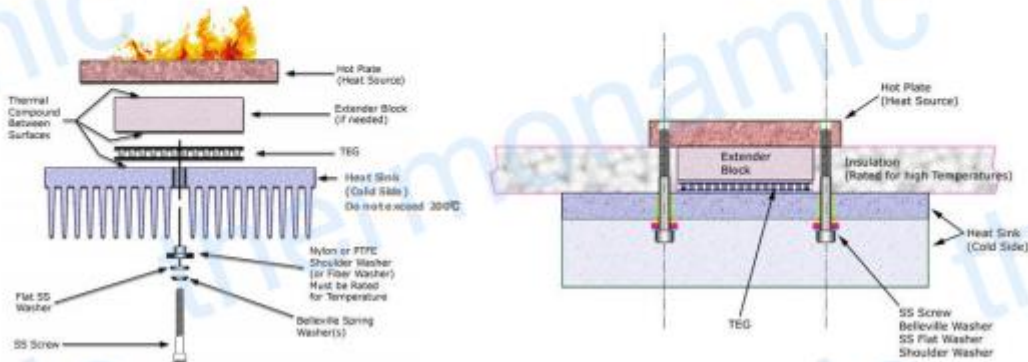


### Applying the TIM

Here we prefer to use the high thermal conductive graphite sheet which has high thermal conductivity and can operate from  $-40$  °C to  $400$  °C. Our TEG module is stuck with such the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other thermal interface materials when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature.

**TEG Mounting:**

TEGs should be mounted using the compression method. That is, the TEG is compressed between a hot plate and a heat sink (or water block) that will be cooler. The compression or clamping should be created with stainless steel machine screws on either side of the TEG. See Exploded View and Section View images below.



**Clamping Forces:**

The following table lists the clamping forces required for optimum power generation and thermal contact.

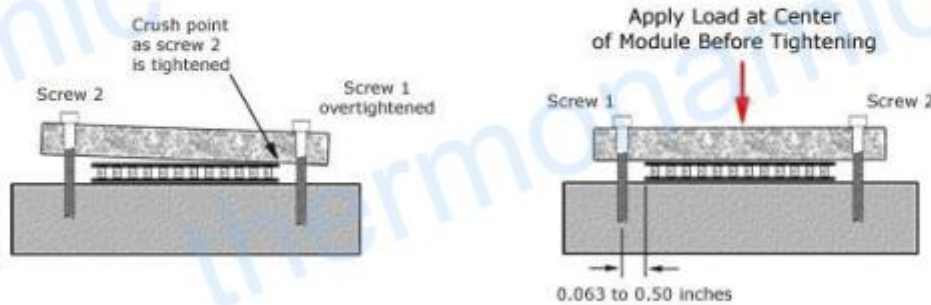
Part Number	Size in mm	Clamping Force	Screw Diameter/Number of Screws / Torque Per Screw
TEP1-1263-3.4	30 mm × 30 mm	120 Kgs/260 Pounds	4 mm/2/0.072 kg × m
TEP1-12635-3.4	35 mm × 35 mm	170 kgs/370 Pounds	4 mm/2/0.098 kg × m
TEHP1-12635-1.2	35 mm × 35 mm	170 kgs/370 Pounds	4 mm/2/0.098 kg × m
TEP1-1264-1.5	40 mm × 40 mm	230 kgs/500 Pounds	4 mm/2/0.128 kg × m
TEP1-1264-2.0	40 mm × 40 mm	230 Kgs/500 Pounds	4 mm/2/0.128 kg × m
TEP1-1264-3.4	40 mm × 40 mm	230 Kgs/500 Pounds	4 mm/2/0.128 kg × m
TEHP1-1264-0.8	40 mm × 40 mm	230 Kgs/500 Pounds	4 mm/2/0.128 kg × m
TEHP1-12656-0.3	56 mm × 56 mm	430 Kgs/920 Pounds	5 mm/2/0.3 kg × m
TEP1-12656-0.6	56 mm × 56 mm	430 Kgs/920 Pounds	5 mm/2/0.3 kg × m
TEP1-12656-0.8	56 mm × 56 mm	430 Kgs/920 Pounds	5 mm/2/0.3 kg × m

Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com Web Site: [www.thermonamic.com/](http://www.thermonamic.com/)  
Innovative design and fine manufacture to provide first-class products and services for customers.

Figur 71 Vismut Tellur modulinstallasjon side 4

**Screw Position:**

Locate bolt holes in your assembly such that they are at opposite sides of the center of the TEG between 1.0 mm to 12.7 mm (0.04 to 0.5 inches) from the sides of the TEG. [See first image below] The bolt holes should be in the same plane line as the fins to minimize any heat sink bowing (bending) that might occur.

**Clamping Procedure:**

Before tightening the screws, apply a light load/force in line with the center of the TEG by using a clamp or weights. Make sure the clamp or weights apply the force evenly and at the center. Bolt carefully, by applying torque (tightening the screws) in small increments, and alternating between screws. It is of the utmost importance that the screws are tightened evenly in small increments back and forth. If one screw is over tightened, then the tightening of the second screw may crush the TEG. [See 2nd image above] Use a torque limiting screwdriver for best accuracy.

**Note:**

If a torque screwdriver is not available, a reasonably accurate pull spring scale attached to the end of an L-shaped hex (Allen) wrench (this is a good reason to use socket head cap screws) can be used to determine when the screw torque is reached. Make sure the spring scale is pulled perpendicular ( $90^\circ$ ) to the Allen (Hex) Wrench at all times.



## Specification of Thermoelectric Module

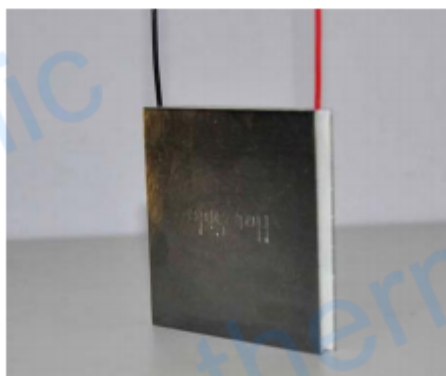
### TEP1-24156-2.4

#### Description

The power module is designed and manufactured by our unique technology for converting heat source directly into electricity. The module is Bi-Te based thermoelectric module that can work at the temperature of as high as 330 °C (626 °F) heat source continuously and up to 400 °C (752 °F) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase therefore. The module is stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides of the ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature.

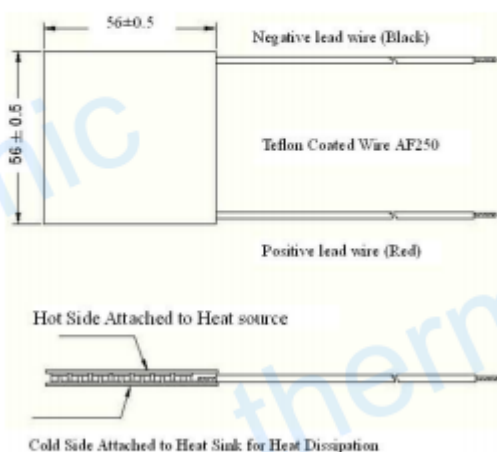
Patent NO.: ZL 2010 1 0193517.9

#### Specification of the Module

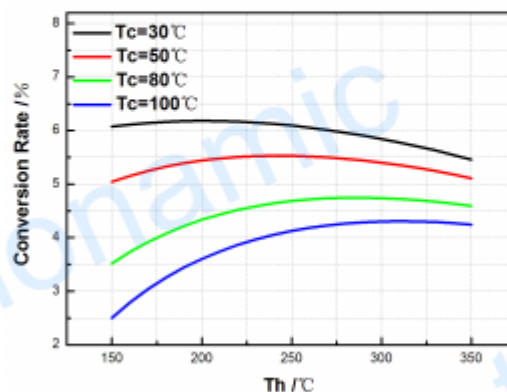


Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	17.7
Matched Load Resistance (ohms)	4.4
Matched load output voltage (V)	8.8
Matched load output current (A)	2.0
Matched load output power (W)	17.6
Heat flow across the module (W)	≈ 301
Heat flow density (W cm <sup>2</sup> )	≈ 9.6
AC Resistance(ohms) Measured under 27 °C at 1000Hz	2.3 ~ 2.5

#### Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



#### Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc



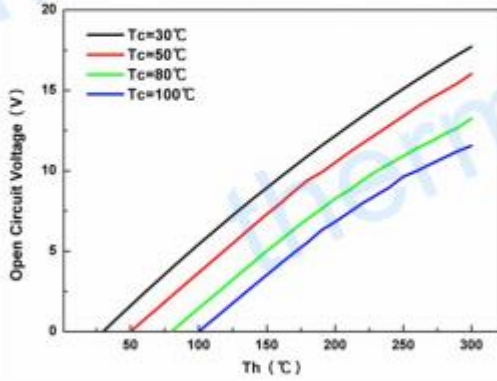
Noted: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products  
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) WebSite: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)

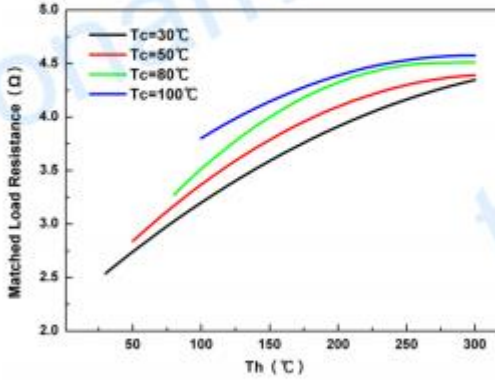
Figur 73Vismut Tellur spesifikasjoner side 1

Performance Curves of the Module

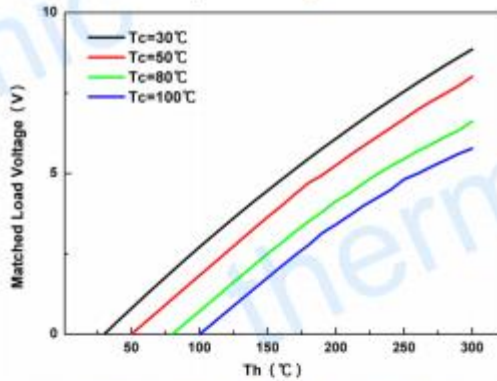
TEP 1-24156-2.4



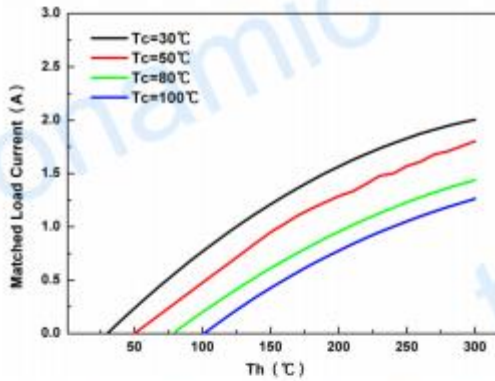
The chart for open circuit voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



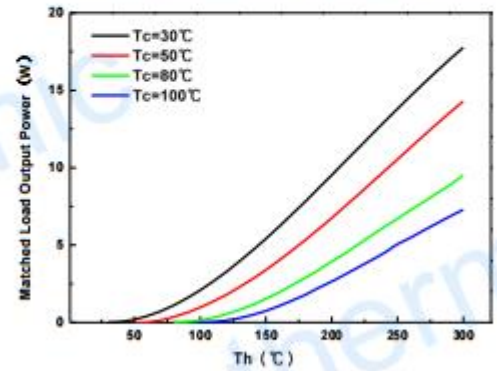
The chart for matched load resistance Vs  $T_h$  under various  $T_c$



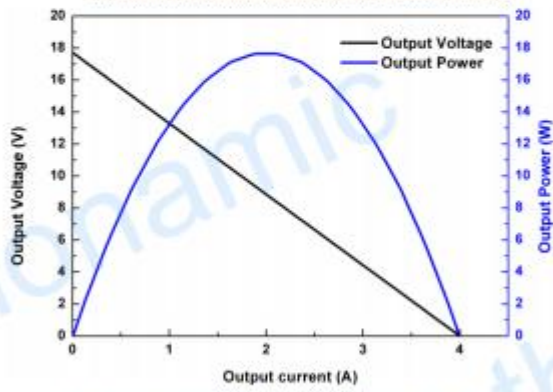
The chart for matched load voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for matched load current Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for output voltage and output power Vs output current



The chart for matched load output power Vs  $T_h$  under various  $T_c$  under  $T_h=300^\circ\text{C}$  and  $T_c=30^\circ\text{C}$

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products  
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) WebSite: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)

Figur 74 Vismut Tellur spesifikasjoner side 2

## Power Module Installation Notes for TELPI-12662-0.9 Series

The power module has large thermal expansion. When the module is running and cycling over large temperature difference, the proper mounting to ensure even pressure applied on module is very important. Please read through below before installation.

### Hot Side and Cold Side Identification:

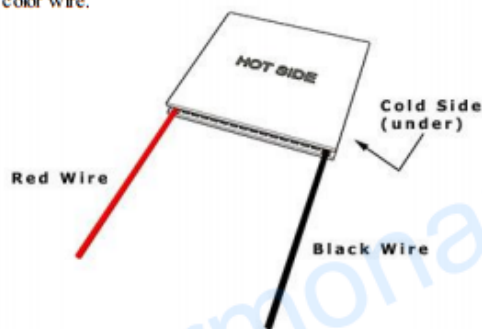
The modules will generate electricity only if there is a temperature difference across the modules. So, you need to attach one side of the modules to a heat source and the other side to a cool source like heat sink to dissipate the heat coming from heat source through the modules.

Our module is unique and different to others. The modules have cold and hot sides. You should attach the cold side to heat sink or heat exchanger, and hot side to heat source. Then the positive output is in red wire, if reversed, then in black color wire.

The temperature on the hot side of the module can work continuously at 500 °C (932 °F) or below and intermittently up to 600 °C (1112 °F). But the temperature at cold side of the module can work only at 250 °C (482 °F) or below. So, if the mounting is reversed, and the cold side of module is attached to heat source above 250 °C (482 °F), the module will degrade quickly or fail immediately. So, please ensure hot side attached to heat source is very important.

Below is the diagram to show which side of module is hot or cold one, where the wire direction faces you. ( Usually, you also can see a marking "Hot Side" on hot side ceramic plate)

The positive output will be on red color wire if the installation is correct. The reversed installation will lead to negative output from red color wire.



### Temperature Limits

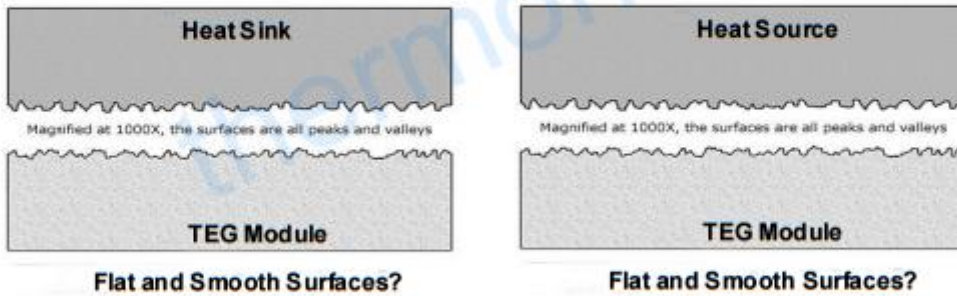
Temperature range of the TEG Hot side:  $-60\text{ °C} \pm 500\text{ °C}$ , Maximum 600 °C

Temperature range of the TEG Cold side:  $-60\text{ °C} \pm 250\text{ °C}$ , Maximum 270 °C

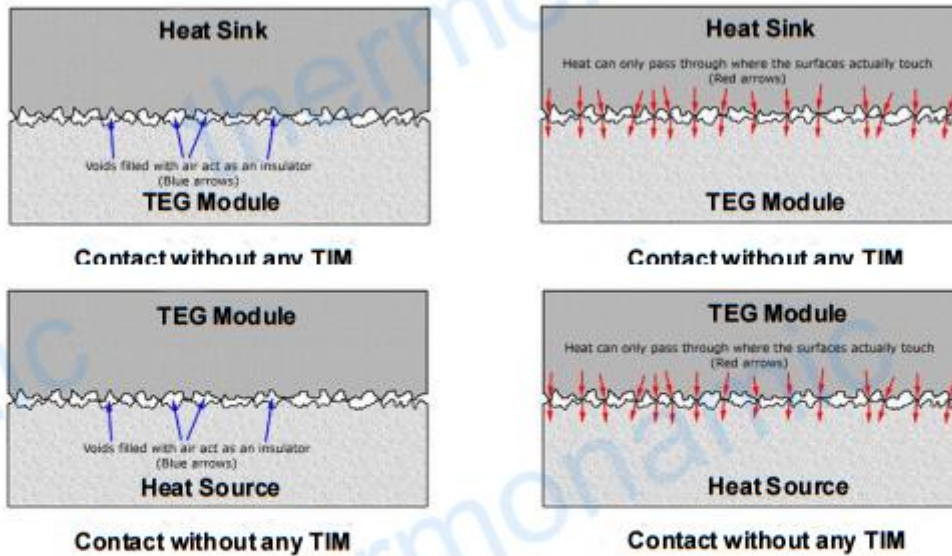
**Thermal Interface:**

**Microscopic Look at Surfaces**

Even when you have two “flat and smooth” surfaces, they are far from truly flat or smooth. The diagram below shows what’s really going on at a microscopic scale.



As you can see, the two surfaces may look flat and smooth, but in reality, when examined under magnification, they consist of “hills”, “peaks”, and “valleys”. When these two surfaces are brought into contact with one another, only the peaks make contact. It has been calculated that the average amount of contact between any two smooth surfaces is in reality only 5%. The other 95% are voids!



The above image shows how the remaining valleys create voids through which heat energy can barely pass through, in effect creating an insulated area – not the ideal thermal interface.

Figur 76 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 2

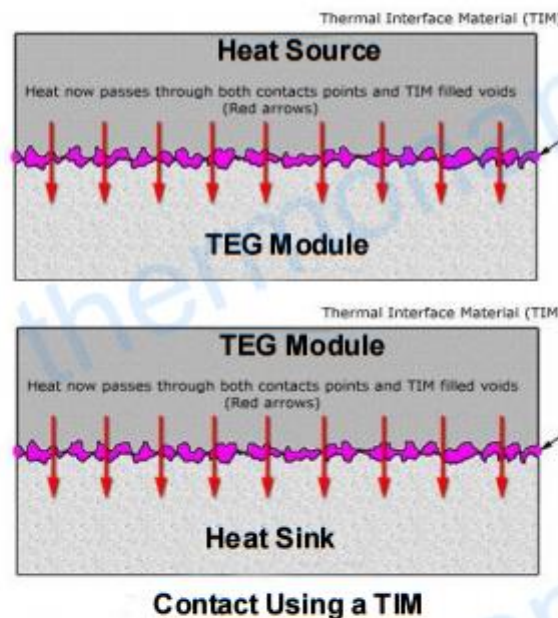
### Surface Finish and Preparation

As a minimum, any surface intended to be part of a thermal interface should be flat to  $\pm 0.001$  inches over the entire interface surface and smooth to a surface finish of 32 micro inches or better.

The interface surface must be thoroughly cleaned. Once all machining and polishing is completed, Do not touch the surface with bare hands (skin oils) or allow any contact with other materials. It is better to complete this final cleaning stage just before assembly so as to minimize any dust or contamination.

### Thermal Interface Materials (TIM)

A "third party" interface material is needed since it is all but impossible to achieve ideal flat and smooth surfaces. The purpose of the TIM is to fill the valleys and gaps with a compressible material that has a much higher thermal conductivity (ability to transfer heat) than the air gaps it replaces. This essentially makes the entire interface transfer heat instead of just where the peaks were contacting. The following image shows how the situation has been dramatically improved.



### Applying the TIM

Here we prefer to use aluminum foil and high thermal conductivity graphite sheet for heat transfer. The aluminum foil which sticks on the hot side of the module can operate from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $600^{\circ}\text{C}$ . Our TEG module is also stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on cold side to provide low contact thermal resistance. So, you do not need to apply thermal grease or other thermal interface materials when you install the module. The aluminum foil can work well in extremely high temperature.

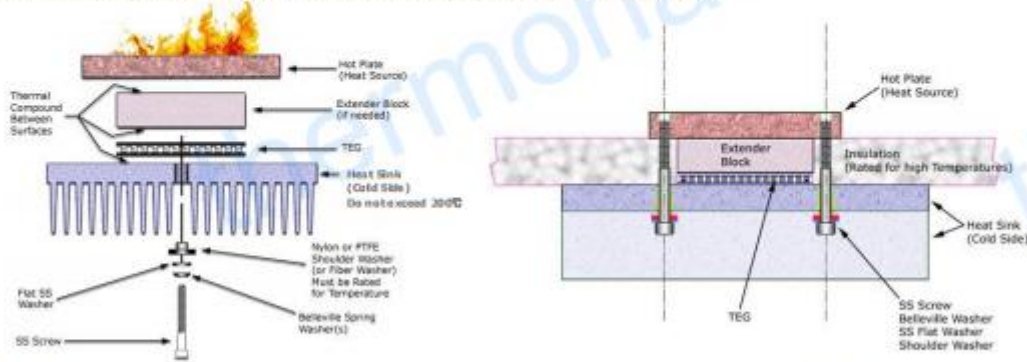
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) Web Site: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)  
Innovative design and fine manufacture to provide first-class products and services for customers.

Figur 77 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 3



**TEG Mounting:**

TEGs should be mounted using the compression method. That is, the TEG is compressed between a hot plate and a heat sink (or water block) that will be cooler. The compression or clamping should be created with stainless steel machine screws on either side of the TEG. See Exploded View and Section View images below.



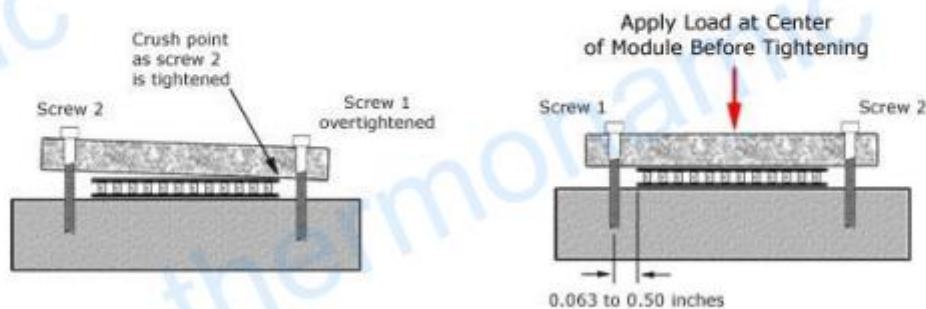
**Clamping Forces:**

The following table lists the clamping forces required for optimum power generation and thermal contact.

Part Number	Size in mm	Clamping Force	Screw Diameter/Number of Screws / Torque Per Screw
TELP1-12662-0.9	90 mm × 80 mm	480Kgs/1050 Pounds+/-10%	5mm/2/0.335 kg × m

**Screw Position:**

Locate bolt holes in your assembly such that they are at opposite sides of the center of the TEG between 1.0 mm to 12.7 mm (0.04 to 0.5 inches) from the sides of the TEG. [See first image below] The bolt holes should be in the same plane line as the fins to minimize any heat sink bowing (bending) that might occur.



Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) Web Site: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)  
Innovative design and fine manufacture to provide first-class products and services for customers.

Figur 78 Bly Tin Teullur modulinstallasjon side 5

**Clamping Procedure:**

Before tightening the screws, apply a light load/force in line with the center of the TEG by using a clamp or weights. Make sure the clamp or weights apply the force evenly and at the center. Bolt carefully, by applying torque (tightening the screws) in small increments, and alternating between screws. It is of the utmost importance that the screws are tightened evenly in small increments back and forth. If one screw is over tightened, then the tightening of the second screw may crush the TEG. [See 2nd image above] Use a torque limiting screwdriver for best accuracy.

**Note:**

If a torque screwdriver is not available, a reasonably accurate pull spring scale attached to the end of an L-shaped hex (Allen) wrench (this is a good reason to use socket head cap screws) can be used to determine when the screw torque is reached. Make sure the spring scale is pulled perpendicular ( $90^\circ$ ) to the Allen (Hex) Wrench at all times.



## Specification of Thermoelectric Module

TE LP 1-12662-0.9

### Description

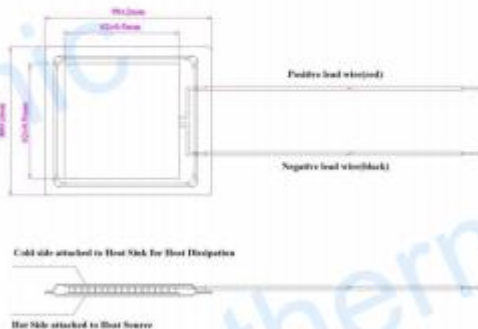
The power module is designed and manufactured by our unique technology for converting heat source directly into electricity. The module is a lead tin telluride based thermoelectric module that can work at the temperature of as high as 500 °C (932 °F) heat source continuously, and up to 600°C (1112 °F) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase. It can achieve much higher efficiency than Bismuth Telluride module if heat source temperature can go up to 500 °C (932 °F) due to its larger temperature difference. The module is enclosed in a metal casing for preventing oxidation in high temperature and poor environment.

### Specification of the Module

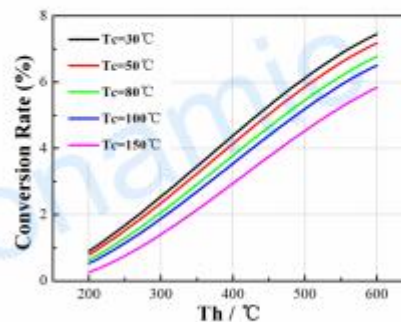


Hot Side Temperature / Th (°C)	600
Cold Side Temperature / Tc (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	13.3
Matched Load Resistance (ohms)	2.05
Matched load output voltage (V)	6.65
Matched load output current (A)	3.27
Matched load output power (W)	21.7
Heat flow across the module(W)	≈ 290
Heat flow density(W cm <sup>-2</sup> )	≈ 7.6
AC Resistance (ohms) Measured under 27 °C at 1000 Hz	0.7-1.1

### Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



### Conversion Rate of the module Vs Th under various Tc



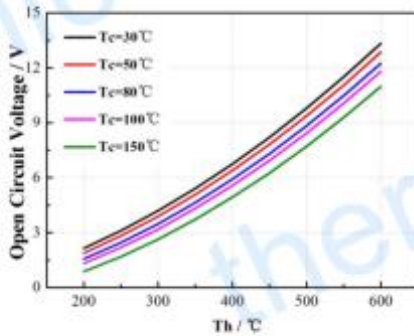
Noted: Conversion rate = Matched load output power/heat flow through the module

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products  
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) Web Site: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)

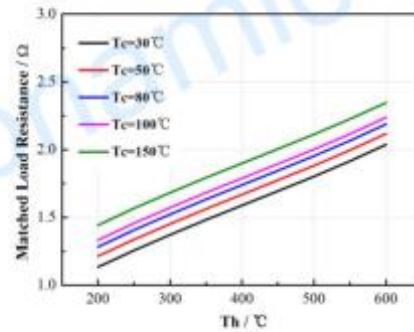
Figur 80 Bly Tin Tellur spesifikasjoner side 1

## Performance Curves of the Module

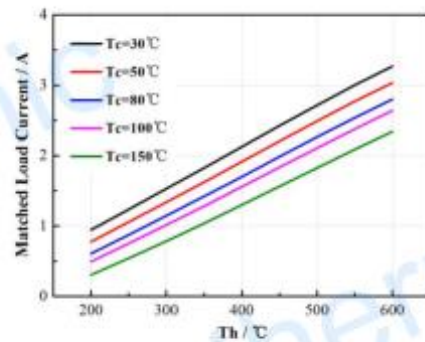
### TELP1-12662-0.9



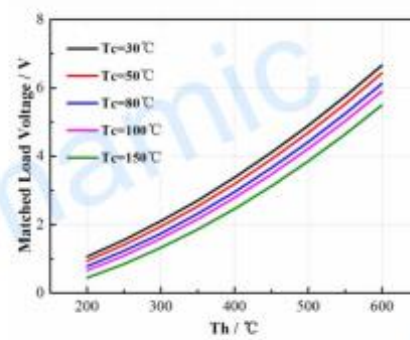
The chart for open circuit voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



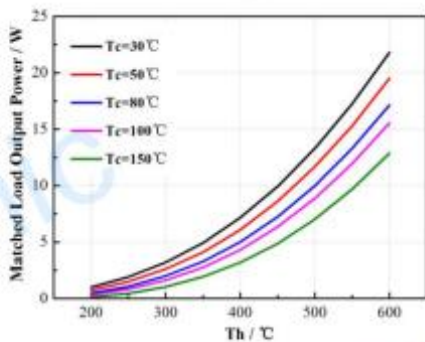
The chart for matched load resistance Vs  $T_h$  under various  $T_c$



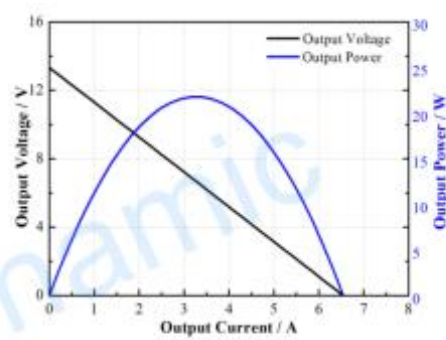
The chart for matched load voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for matched load current Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for matched load output power Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for output voltage and output power Vs output current under

$T_h = 600^\circ\text{C}$  and  $T_c = 30^\circ\text{C}$

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products  
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: [sales@thermonamic.com.cn](mailto:sales@thermonamic.com.cn) Web Site: [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)

Figur 81 Bly Tin Tellur spesifikasjoner side 2

## Vedlegg D - Beregninger gjort i Excel

Forklaring til Excel dokument:

Excel dokumentet består av syv deler:

- 1) Data (1)
- 2) Potensialet til lyddemperen (1)
- 3) UA (1)
- 4) U. Om m. i. På e. lyddemper (1) (utredning om mulig installasjon på eksisterende lyddemper)
- 5) Effekt (1)
- 6) Alternativ VV konfigurasjon (2)
- 7) Operativ betydning og kostnadsbesparelser

Det er på hvert ark en tekstboks med beskrivelse av det som ikke er helt selvsagt

### Data:

Data hentet fra tekniske tegninger, forsøk, bøker og maskindagbøker, og beregnede verdier av massestrøm.

### Potensialet til lyddemperen (1):

Beregninger av: varme eksos/saltvann, samlet varmeoverføringsevne (UA) og varmeoverføringskoeffisient (U) til lyddemperen.

### UA (1):

Beregning av: samlet varmeoverføringskoeffisient og varmeoverføringsevne til ytre og indre eksoskammer, og temperaturfordelingen fra senter av eksosstrømmen gjennom eksosylinderveggen i ytre eksoskammer.

### U. Om m. i. På e. lyddemper (1):

Beregning av: UA ytre eksosylinder med tillegg av TEG, Temperatur ut av sylinder og temperaturfordelingen fra senter av eksosstrømmen gjennom eksosylinderveggen i ytre eksoskammer med tillegg av TEG.

### Effekt (1):

Beregning av: effekt å hente fra TEG med installasjon av TEG, varme resistans og peltiereffekt

### Alternativ VV konfigurasjon (2)

Beregning av: UA, temp ut og effekt for alternativ konfigurasjon.

### Operativ betydning og kostnadsbesparelser

Beregninger på fiktivt eksempel og da totale kostnadsbesparelser

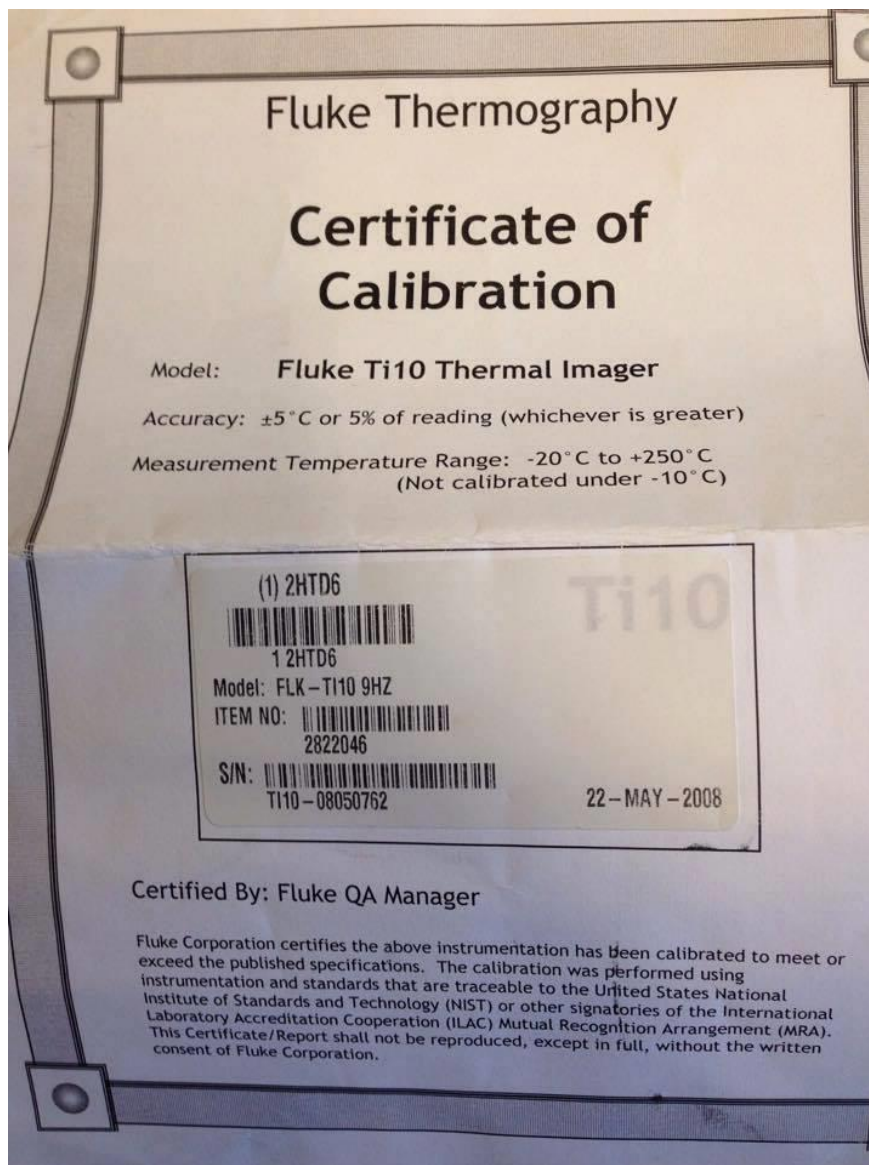
## Vedlegg E - Solidworks

For oppgaven er 2016 utgaven av tegneprogrammet Solidworks brukt.

Vedlagt på CD fins mappen med Solidworks filene. Det er en fil for hvert legeme som er blitt konstruert, som er sammensatt til en konstruksjon.

## Vedlegg F - Rapport lyddemper

Vedlagt på CD ligger en rapport om overhaling av lyddemperen til ULA-klassen som vi fikk utlevert av ubåtvåpenet.



Figur 82 Kalibreringssertifikat for Fluke



## Vedlegg H - Sertifikat sjøvannspumpe

<b>2.5.2</b>	<b><u>Sjøvannspumpe (sjøkjølevann)</u></b>	
Produsent	:	Motoren- und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH Postfach 20 40 D-7990 Friedrichshafen
Produsentkode	:	D8266
Antall	:	1
Leveringsmengde	:	ca. 18 l/s ved motorturtall på 1500 min <sup>-1</sup>
Omsettingsforhold	:	1 : 1,53
Tyngde	:	ca. 55,5 kg

Figur 83 Sjøvannspumpe