



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

Konstruksjon av gassturbin til undervisningsformål

– En konstruksjonsoppgave –

av

Olav Johannes Bøe Finden

Mihails Panfilovs

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Mai 2019

**Godkjent for offentlig publisering**

---

## I. 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 kadettene har godkjent publisering.

Oppgaver 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"/> Nei

### Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt 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: 29 – 05- 2019**

Olav Johannes Bøe Finden  
Kadett, navn

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

Mihails Panfilovs  
Kadett, navn

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

---

## II. Forord

Bacheloroppgaven er et krav for bachelor i militære studier med fordypning i maskinfag ved Sjøkrigsskolen. Oppgaven har gitt oss muligheten til å ta i bruk et stort spekter av fagfeltet vårt. Vi har fått tilegnet oss bedre kompetanse på praktisk arbeid som metallbearbeiding, elektrisk oppkobling og konstruksjon. I tillegg har vi fått testet og utdypet vår teoretiske kompetanse innen termodynamikk, fluidmekanikk, systemdesign og elektroteknikk. Arbeidet startet i desember 2018 og sluttet i mai 2019.

Takk til UVB-verkstedet på Laksevåg for arbeidslokaler, verktøy og materialer.

En spesiell takk gis til Magnus og resten av skrogverkstedet for oppfølging, råd og støtte.

Takk til Alexander Sauter for programmering og sammensetting av Arduino-systemet.

Takk til Gisle Strand for turbolader, veiledning og konstruktive innspill.

Takk til Oliver Finden og Torgrim Odde for korrekturlesning.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 29-05-2019

---

Olav Johannes Bø Finden

---

Mihails Panfilovs

---

### **III. Oppgaveformulering**

Med bakgrunn i den kompetansen vi har opparbeidet oss i løpet av årene på Sjøkrigsskolen, ønsker vi å konstruere en gassturbin som kan brukes i undervisningsformål. Denne gassturbinen skal være enkel og oversiktlig. I tillegg skal det være mulig å videreutvikle gassturbinen slik at fremtidige maskinkadetter kan dra nytte av prosjektet. For at gassturbinen skal være forsvarlig å bruke til undervisning, må den også være sikker å operere.

Vårt fokus er derfor enkelhet, sikkerhet og læringsutbytte i undervisningssammenheng.

---

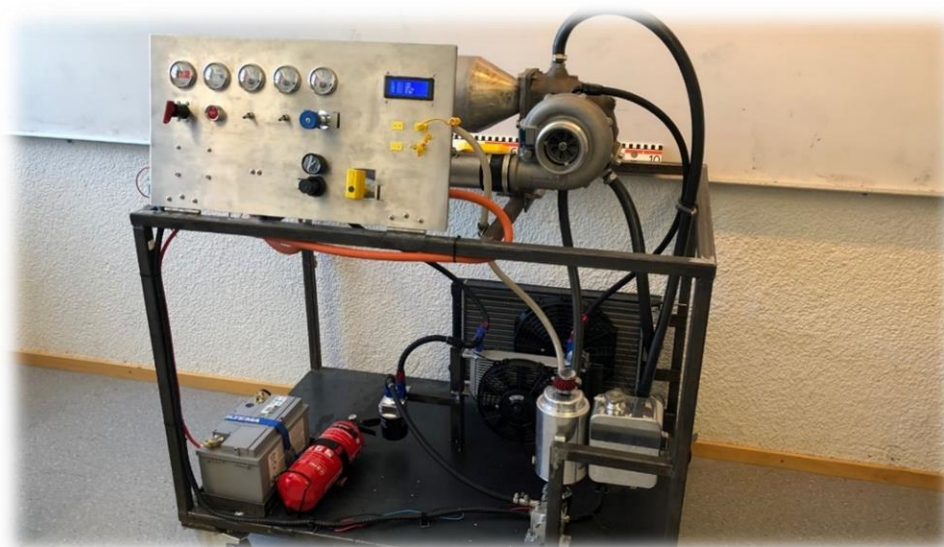
## IV. Sammendrag

Gjennom denne oppgaven er det konstruert, produsert og testet en gassturbin basert på en turbolader. Pensum ved maskiningeniørutdanningen er grunnlaget for både det praktiske og teoretiske arbeidet som er gjennomført i utredningen

Oppgaves kompleksitet gjør det nødvendig å avgrense oppgaven gjennom fire primærmål for den endelige gassturbinen: Gassturbinen skal være funksjonell, sikker å operere, være mulig å videreutvikle og den skal kunne benyttes i undervisning.

Til å løse oppgaven er det konstruert et brennkammer som sammen med turboladeren utgjør gassturbinen. I tillegg er det konstruert en ramme som bærer og stabiliserer gassturbinen. For å sørge for sikker drift av gassturbinen, er det laget systemer for kjøling, smøring og brennstoff. Til å drive disse systemene er det laget et elektrisk anlegg og et system for styring og overvåkning.

Måloppnåelsen til oppgaven er høy. Tester viser at gassturbinen starter enkelt og er selvgående. Turboladeren er konstruert for å minimere risiko ved drift og prosedyrer skrevet for å gi nye brukere nødvendig informasjon og opplæring for sikker drift av gassturbinen. Det romslige og intuitive designet av gassturbinen, sammen med konstruksjonstegninger og fullstendig liste over deler gjør gassturbinen tilpasset videre utvikling. Gassturbinen kan benyttes til undervisning slik den er, men vi anser ikke måloppnåelsen for dette målet til å være fullstendig. Likevel er det grunnlag for at dette målet oppnås gjennom videre utvikling av turbinen.



**Figur IV.1: Gassturbinen i sin helhet**

---

## V. Innholdsfortegnelse

<b>I.</b>	<b>Publiseringsavtale .....</b>	<b>2</b>
<b>II.</b>	<b>Forord .....</b>	<b>3</b>
<b>III.</b>	<b>Oppgaveformulering.....</b>	<b>4</b>
<b>IV.</b>	<b>Sammendrag.....</b>	<b>5</b>
<b>V.</b>	<b>Innholdsfortegnelse .....</b>	<b>6</b>
<b>VI.</b>	<b>Figurer .....</b>	<b>9</b>
<b>VII.</b>	<b>Tabeller .....</b>	<b>11</b>
<b>VIII.</b>	<b>Forkortelser .....</b>	<b>12</b>
<b>IX.</b>	<b>Begrepsliste .....</b>	<b>13</b>
<b>1.</b>	<b>Innledning.....</b>	<b>14</b>
1.1	Bakgrunn.....	14
1.2	Mål .....	15
1.3	Avgrensninger.....	16
1.4	Metode .....	17
1.5	Struktur .....	18
<b>2.</b>	<b>Teoretisk bakgrunn .....</b>	<b>19</b>
2.1	Gassturbinens virkemåte .....	19
2.2	Brayton-syklusen .....	20
2.3	Turboladerens virkemåte.....	21
2.4	Turbolader som gassturbin.....	21
2.5	Brennkammerets virkemåte .....	22
2.5.1	Flammerør.....	22
2.6	Turboladeren benyttet i oppgaven .....	24
<b>3.</b>	<b>Fremgangsmåte .....</b>	<b>27</b>
3.1	Rammen .....	27
3.2	Brennkammer.....	30
3.2.1	Innledning .....	30
3.2.2	Dimensjonering av flammerør .....	32
3.2.3	Dimensjonering av ytterkappen .....	34
3.2.4	Flenser og pakninger.....	36

---

3.2.5	Valg av materiale .....	36
3.3	Brennstoffsystem .....	37
3.3.1	Valg av brennstoff.....	37
3.3.2	Nedkjøling av tanken .....	38
3.3.3	Dyse .....	40
3.3.4	Slanger og koblinger .....	42
3.4	Smøreoljesystem .....	43
3.4.1	Lager .....	43
3.4.2	Filter .....	44
3.4.3	Kjøling av oljen.....	45
3.4.4	Pumpe .....	45
3.4.5	Slanger og koblinger .....	48
3.4.6	Valg av smøreolje .....	49
3.5	Kjølevannsystemet.....	51
3.6	Elektrisk anlegg .....	54
3.6.1	Sikringsboks.....	54
3.6.2	Smørølje- og kjølevannskretsen.....	56
3.6.3	Spenningskilde .....	56
3.6.4	Tenningsystem.....	56
3.7	Styre- og overvåkningssystem .....	57
3.7.1	Kontrollpanelet .....	58
3.7.2	Overvåkning av hjelpesystemer .....	59
3.7.3	Styring.....	60
3.7.4	Overvåkning av gassturbinen.....	61
<b>4.</b>	<b>Testing og resultat.....</b>	<b>63</b>
	<b>Testresultatene: .....</b>	<b>65</b>
<b>5.</b>	<b>Drøfting av resultat og måloppnåelse.....</b>	<b>67</b>
9.1	Funksjonalitet.....	67
9.2	Sikkerhet .....	68
9.3	Undervisningsformål.....	69
9.4	Muligheter for videreutvikling.....	70
<b>6.</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>71</b>
<b>7.</b>	<b>Forslag til forbedringer og videre arbeid .....</b>	<b>72</b>
	<b>Referanseliste .....</b>	<b>74</b>
	<b>Vedlegg .....</b>	<b>81</b>

---

A.	Merkeskilt for turbolader .....	81
B.	Kompressorkart K27 .....	82
C.	Budsjett .....	83
D.	Testfase .....	84
E.	Risikovurderings-skjema .....	87
F.	Kobling av sikringsboks .....	88
G.	Vektregnskap .....	89
I.	Arbeidslogg .....	91
J.	P-v og T-s diagram.....	92



---

## VI. Figurer

Figur 2.1: Skjematisk tegning av gassturbin (Høgskolen i Oslo og Akershus, 2014) ....	19
Figur 2.2: Den ideelle gassturbin syklus, p-v og T-s diagram (Basic Mechanical Engineering 2016) .....	20
Figur 2.3 Visualisering av hvordan en turbolader fungerer (Turbo 2019).....	21
Figur 2.4: Illustrasjon av brennkammer med ytterkappe (air casing) rundt flammerøret (flame tube) (Rolls-Royce 2005).....	23
Figur 2.5: KKK K27 Turbolader.....	24
Figur 2.6: Kompressorkart til MTU 183-serie. Rød merking er antatt driftsområde på vår turbo.....	25
Figur 2.7: Dimensjoner, kompressor.....	26
Figur 3.1: Rammen modulert i SolidWorks .....	27
Figur 3.2: Til venstre: Kontroll av størrelsen til rammen. Til høyre: Rammen, uten tverrbjelker .....	28
Figur 3.3 Oversikt over plassering av utstyr .....	29
Figur 3.4: Kadett Panfilovs under sveising av rammen .....	29
Figur 3.5: Illustrasjon av flammerør til bruk i ringformet brennkammer (Nuclearprojects 2004).....	32
Figur 3.6: Flammerøret, tegnet i SolidWorks .....	33
Figur 3.7: Flammerøret etter produksjon .....	34
Figur 3.8: Ytterkappen .....	35
Figur 3.9: Dimensjonering av trakten på dataprogrammet "Igems" .....	35
Figur 3.10: Trakt mellom ytterkappe og flens.....	36
Figur 3.11: Utkast for løsninger med kjølevann til oppvarming av tanken. Til venstre: (sett fra oven) «Varmekabel»-utkastet. Til høyre: «Vannbad»-utkastet .....	38
Figur 3.12: Til venstre: Propantank plassert i vannbad. Til høyre: Frostdannelse på utsiden av tanken ved kjøring uten vannbad .....	39
Figur 3.13: Trykkregulator med manomanometer og stengeventil med lås .....	40
Figur 3.14: Til venstre: Sveisegassdyse. Til høyre: Egenprodusert dyse.....	41
Figur 3.15: Konstruksjonstegning av egenprodusert dyse .....	41
Figur 3.16: Kadett Panfilovs under test av brennstoffsystemet .....	42
Figur 3.17: Illustrasjon av lagerhus i en turbolader .....	43
Figur 3.18 Oljefilteret brukt i oppgaven.....	44
Figur 3.19: «Spin-on»-filter sett fra innsiden.....	44
Figur 3.20 Platekjøler.....	45
Figur 3.21: «Amarine» oljepumpe .....	46
Figur 3.22: Fra venstre: Treveis-kobling, strupeventil, oljetrykksviser, bypass-slange ned i tanken .....	46
Figur 3.23 Raymarine Type 1, 12VDC .....	47
Figur 3.24: Olje system 2: Raymarine servopumpe.....	47

---

Figur 3.25: Olje system 1: Amarinepumpe .....	47
Figur 3.26: AN-slange og AN-kobling .....	48
Figur 3.27: AN-koblinger. Fra venstre: 90° bend, 45° bend, rettsvivel og sensoradapter	48
Figur 3.28: Oljetrykksensor og viser for oljetrykk.....	49
Figur 3.29: Viskositetskart for forskjellige typer oljer.....	50
Figur 3.30 Illustrasjonsbilde. Til venstre: Luftavkjølt turbolader. Til høyre: Vannavkjølt turbolader. De grønne områdene viser kjølekanalene. I vår turbolader er det ikke vannkjøling i kompressorhuset, slik som vist i illustrasjonen.....	51
Figur 3.31: Til venstre: Instrumentklokke for å måle temperatur. Til høyre: Temperaturgiver (midten nederst), gjennomsiktige slanger for visuell tilbakemelding .....	52
Figur 3.32: Til venstre: Flens og pakning satt sammen med turbin. Til høyre: Turboladeren. Under eksosinnløpet på turbinsiden kan man tydelig se kjølekanalen.....	53
Figur 3.33: Forenklet skjematisk tegning av hovedstrømkretsen. ....	54
Figur 3.34: Det elektriske anlegget .....	55
Figur 3.35: Tenningssystemet. Fra venstre: Tenningsbryter med LED-lys ved aktivering, coil (svart sylinder) og baksiden av bryter, tennplugg og gassinnføring .....	57
Figur 3.36: Kontrollpanelet .....	58
Figur 3.37: Beskrivelse av instrumentklokkene og brytere.....	59
Figur 3.38: Til venstre: Kus temperaturgiver. Til høyre: Kus/Wema trykkgiver. ....	60
Figur 3.39 Til venstre: Arduino-plattformen omsetter signalene fra temperaturgiverne og viser de som tallverdier på LCD-skjermen. I midten: Temperatursensor nedfelt i eksospotten. Til høyre: Arduino-plattformen (i midten av bildet) .....	62
Figur 4.1: Kadett Panfilovs og Finden under oppstart av gassturbin for første gang .....	63

---

## VII. Tabeller

<i>Tabell 1: Dimensjoner, kompressor .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabell 2: Dimensjonering av flammerør .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabell 3: Dimensjonering av soner til flammerør .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabell 4: Dimensjoner på flammerør .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabell 5: Dimensjoner til borehull i flammerør .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabell 6: Fordeler og ulemper ved propan .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabell 7: Fordeler og ulemper ved diesel .....</i>	<i>37</i>

---

## VIII. Forkortelser

- HMI - Human machine interface (menneske-maskin grensesnitt)
- HVL - Høgskulen på Vestlandet
- KKK - Kühnle, Kopp & Kausch
- KSR - Kimmit Sport Racing
- MTU - Motoren- und Turbinen-Union, tysk datterselskap av Mercedes
- NEK - Norsk elektroteknisk komite
- NTNU - Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
- PLS - Programmerbar logisk styring
- SAE - Society of Automotive Engineers
- T01 - Totaltemperatur ved inngang til kompressor
- T02 - Totaltemperatur ved utgangen av kompressorhuset
- T03 - Totaltemperatur ved inngang til turbin
- T04 - Totaltemperatur i eksospotten
- UVB - U-båt bunkeren, vedlikeholdsverksted for ubåter i Laksevåg

---

## IX. Begrepsliste

- |                |   |
|----------------|---|
| adiabatisk tap | - Tap av energi grunnet varme   |
| Arduino        | - Åpen kilde plattform som kan programmeres til å fungere som en PLS  |
| Igems          | - Dataprogram som brukes til å lage tegninger for vannjetskjærer  |
| MIG-sveising   | - Sveiseteknikk hvor elektroden også brukes som tilsett og tilføres arbeidsgodset løpende. MIG står for <i>Metal Inert Gas</i>  |
| SolidWorks     | - Dataprogram som brukes til å lage 3D-modeller og konstruksjonstegninger   |
| p-v diagram    | - Diagram som viser forholdet mellom trykk (p) og spesifikt volum (v)   |
| T-s diagram    | - Diagram som viser forholdet mellom temperatur (T) og entropi (s)  |
| termoelement   | - Et måleapparat bygd av to forskjellige metaller i en strømkrets. Ved temperaturendringer oppstår det elektromotorisk spenning mellom de forskjellige metallene som generer en strøm som kan måles |
| viskositet     | - Defineres ved et fluids (væske eller gass) motstand til at forskjellige lag i fluidet beveger seg med forskjellig hastighet. Det brukes som et mål på hvor tyktflytende væsken er                 |

---

# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn

I løpet av vår tid på Sjøkrigsskolen har vi gjennomgått både teoretisk og praktisk maskinfaglig undervisning. Vi ønsket å skrive en oppgave som er i tråd med fordelingen av teori og praksis som maskinlinjen på Sjøkrigsskolen tilbyr gjennom utdanningsløpet. Derfor ville vi gjøre en konstruksjonsoppgave som kombinerer praktisk arbeid med teoretiske undersøkelser fremfor en ren teoretisk oppgave. Vi undersøkte hva som var mulig å gjennomføre og ble inspirert av et prosjekt fra Høyskolen i Sør-Trøndelag (Lundgaard 2016). Der var det brukt en turbolader til å lage en gassturbin. Videre undersøkelser viste at det var en passende turbolader tilgjengelig til denne oppgaven. Etter samtaler med veileder kom vi frem til at det ville bli krevende, men svært interessant å lage en gassturbin ut av turbolader.

Før selve oppgaven startet diskuterte vi flere formål for gassturbinen i samråd med kolleger og veileder. Ideer som kom til tegnebordet under idéfasen var blant annet som strømgenerator eller drivkraft på et fartøy eller kjøretøy. Vi fastslo at en strømgenerator eller motor ikke var interessant. I samråd med veileder valgte vi en oppgave som kan være til nytte for skolen og maskiningeniørutdanningen. Oppgaven ble dermed å konstruere en gassturbin til undervisningsformål.

---

## 1.2 Mål

Oppgaven har som endelig mål å konstruere en gassturbin som er funksjonell og sikker å operere slik at den kan brukes i undervisningsformål med læringsutbytte for fremtidige maskinkadetter. For å oppnå dette har vi følgende mål i prioritert rekkefølge:

### 1. Gassturbinen må være funksjonell

- For at gassturbinen skal kunne benyttes til undervisningsformål må den være funksjonell. Med det mener vi at den må starte og være selvgående og ha nødvendige hjelpesystemer til driften av den

### 2. Gassturbinen må være sikker å operere

- Målgruppen for brukerne av gassturbinen er kadetter. Basert på personlige erfaringer kan kadetter ha en tendens til å være både nysgjerrige og overmodige. Vi vurderte derfor at gassturbinen må ha tilstrekkelige sikkerhetstiltak for å unngå ulykker og personellskader

### 3. Gassturbinen skal kunne brukes til undervisningsformål

- For at gassturbinen skal ha en praktisk nytteverdi, ønsker vi å gjøre den til en undervisningsplattform for fremtidige kadetter. Derfor ønsker vi en stor sensorpakke som kan kobles til PLS, PC eller lignende slik at data kan logges, hentes ut og sammenlignes. Med slike målinger kan virkningsgrader og effekter beregnes, og gi et godt grunnlag til bruk for praktisk-teoretisk undervisning

### 4. Gassturbinen skal være mulig å videreutvikle av fremtidige kadetter

- I tillegg til at gassturbinen skulle komme til nytte i undervisningen, er det også et mål at den kunne brukes til fremtidige oppgaver. Derfor ønsker vi å legge til rette for fremtidig utvikling.

Disse fire målene er styrende for vurderinger og valg gjort gjennom oppgaven.

---

## 1.3 Avgrensninger

Denne oppgaven er blitt avgrenset innenfor et tidsrom på 5 måneder og har hatt en øvre budsjettgrense på kr 20 000. Omfanget til oppgaven er stort, men vi har avgrenset oppgaven til å skape et fungerende fundament, som kan være et undervisningsverktøy og som kan videreutvikles. Som følge av oppgavens begrensninger når det gjelder tid og ressurser, har vi dermed ikke krav til effekt eller virkningsgrad. Optimalisering av gassturbiner er et eget fagfelt som ikke er tatt hensyn til i denne oppgaven.

For å oppnå målene beskrevet i kapittel 1.2. er arbeidet basert på følgende krav:

1. Krav til gassturbinen
  - a. Den må starte og være selvgående
  - b. Det må være nødvendige hjelpesystemer til smøring og kjøling for sikker drift av gassturbinen
  - c. Smøreolje- og kjølevannstemperatur må være mulig å overvåke for å forhindre overoppheting. Oljetrykk til turboen må være mulig å overvåke og regulere for å unngå at lagrene til turboen havarer.
  - d. Det må være et sikkert og pålitelig tenningsystem
  - e. Pådraget til gassturbinen må være mulig å regulere
  
2. Krav til sikkerhet
  - a. Det må være en nødstoppsfunksjon av brennstoffet for hurtig nedstenging av gassturbinen
  - b. Fare for brann og eksplosjon av turbohuset må reduseres
  - c. Det elektriske anlegget må være sikret, isolert og godt jordet. Riktige ledere må brukes for å unngå varmeutvikling
  - d. Farer ved drift av gassturbinen må identifiseres og det må utvikles prosedyrer for å redusere disse
  
3. Krav til undervisning
  - a. Det må kunne måle temperaturer i T01, T02, T03 og T04
  - b. Den må kunne måle trykk i p1, p2, og p3
  - c. Den må kunne måle turtall



- 
- d. Den må kunne måle brennstoff- og luftstrømninger
  - e. Krav til logging av målinger og muligheter for å hente disse ut elektronisk til bruk i lab-øvelser
  - f. Den maksimale bredden kan ikke overstige 80 cm slik at det er mulig å passere gjennom klasseromsdører
  - g. Krav til hjul på rammen for å sikre enkel transport til og fra undervisning

#### 4. Krav til videreutvikling

- a. Rammen må bære en totalvekt på minst 250 kg for å sikre muligheter for fremtidige utvidelser
- b. Gassturbinen må være designet slik at den er tilrettelagt for fremtidige utvidelser og for enkel montering/demontering
- c. Det må være tilstrekkelig dokumentasjon av prosjektet for å sikre at arbeidet enkelt kan tas opp igjen. Til dette hører det med brukermanual for turbinen, liste over deler, konstruksjonstegninger og plan for vedlikehold og lagring.

## 1.4 Metode

Oppgaven er delt i flere faser. Første fase går ut på å innhente litteratur og opparbeide kunnskap til hvordan konstruere gassturbinen. Deretter følger designfasen, hvor det idémyldres og utvikles utkast til løsninger. Her undersøkes også hvilke komponenter som må anskaffes. Disse fasene består hovedsakelig av teoretiske undersøkelser ved skolen og kontakt med relevante fagmiljøer. Deretter starter selve produksjonsfasen. Denne gjennomføres ved UVB og er den mest omfattende delen av oppgaven. Til slutt gjennomføres testfasen for å verifisere funksjonaliteten til gassturbinen og innhente data om ytelse.

Alt praktisk arbeid gjennomføres i oppgaven av oss selv, med unntak av arbeid hvor vi ikke innehar nødvendig kompetanse. I dette inngår utskjæringer i vannjetskjærer, sveising av trykkfaste beholdere, herunder brennkammer, trakt, og programmering av Arduino-plattform. Anskaffelse av komponenter er tidkrevende arbeid, spesielt siden nødvendige data om ytelsene er vanskelig å få tak i fra leverandører. Derfor er det ikke lagt vekt på omfattende bereg-

---

ninger ved anskaffelse av de forskjellige enkeltkomponentene. Målet er å produsere en fungerende gassturbin, innenfor tiden til rådighet. Dermed baseres anskaffelser på empiri og tilgjengelighet.

## **1.5 Struktur**

Oppgaven tar først for seg relevant teori og grunnleggende materie som brukes i oppgaven (Teoretisk bakgrunn). Hensikten er å gi leseren grunnleggende forståelse av hvilke fysiske prinsipper og teorier som ligger bak arbeidet med oppgaven. Deretter beskrives fremgangsmåten for hvordan oppgaven er løst (Fremgangsmåte), med inndelinger på de forskjellige delsystemene. Her går oppgaven nærmere inn på kravene til de forskjellige systemene, hvordan de er satt sammen og hvilke vurderinger som ligger bak.

Videre kapitler er resultater, drøfting av resultater, konklusjon og forslag til videre arbeid. Avslutningsvis ligger referanseliste og vedlegg.

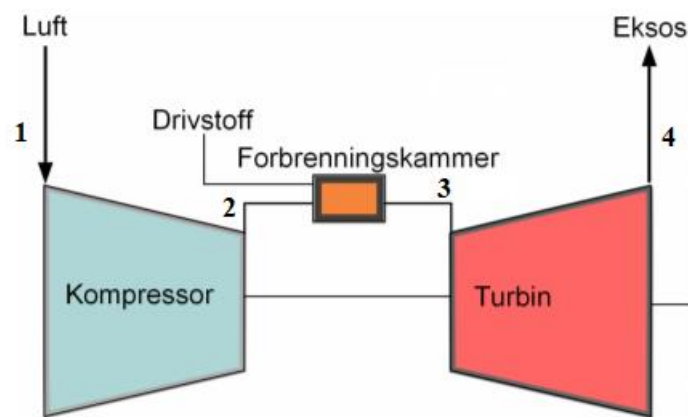
I tillegg er det lagt ved konstruksjonstegninger («Konstruksjonstegninger til gassturbin») og brukermanual («Brukermanual for gassturbin») som eget vedleggshefte.

---

## 2. Teoretisk bakgrunn

### 2.1 Gassturbinens virkemåte

Generelt finnes det to typer gassturbiner: åpen og lukket (Lund 2012, s. 92). I denne oppgaven er det konstruert en åpen gassturbin. I en åpen gassturbin blir luft fra atmosfæren sugd inn i en kompressor og komprimert slik at trykket heves. Deretter går luften videre til et brennkammer hvor brennstoff blir tilført og forbrent. De varme forbrenningsgassene ekspanderer deretter i en turbin, og avgassen føres så ut av turbinen, se Figur 2.1.



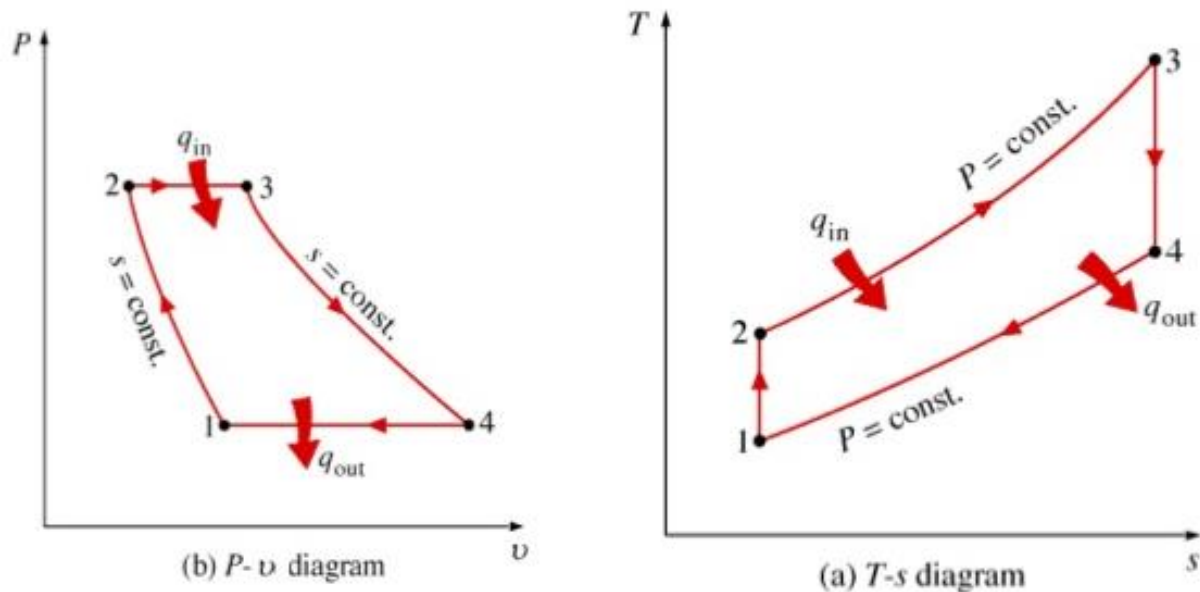
**Figur 2.1: Skjematisk tegning av gassturbin (Høgskolen i Oslo og Akershus, 2014)**

Turbinen drives av ekspansjonen til den oppvarmede gassen og er koblet til kompressoren ved en aksling. På den måten blir kompressoren drevet av turbinen, og kompressoren vil dermed komprimere mer luft inn til forbrenningskammeret dess forttere turbinen spinner. Alle brennstoff er avhengig av å reagere med oksygen for å forbrenne. Ved å komprimere en større mengde luft, er det dermed mulig å forbrenne en større mengde brennstoff. Dette vil igjen føre til at turbinen spinner raskere og mer luft blir komprimert.

For å hente effekt ut av gassturbinen kan man enten koble til et drivverk direkte på akslingen, eller man kan benytte seg av avgassens energi til å drive en kraftturbin. Man kan også benytte seg av en dyse på utgangen av turbinen slik at avgassen vil gi skyv direkte til fremdrift (som er tilfelle ved en turbojet-motor).

## 2.2 Brayton-syklusen

Alle gassturbiner fungerer etter det samme prinsippet og det kalles *Den ideelle gassturbinprosessen*. Den kalles også gjerne Brayton-syklusen etter arbeidet utført av den amerikanske fysikeren George Brayton i 1870-årene (Lund 2012, 93). Figur 2.2 viser en ideell gassturbinprosess i p-v- og T-s-diagram.



**Figur 2.2: Den ideelle gassturbin syklus, p-v og T-s diagram (Basic Mechanical Engineering 2016)**

Tilstandene 1-4 som vist på Figur 2.1 samsvarer med tilstandene 1-4 vist på Figur 2.2. Når det i oppgaven refereres til tilstander som T01 eller P2 så er det disse tilstandene det refereres til.

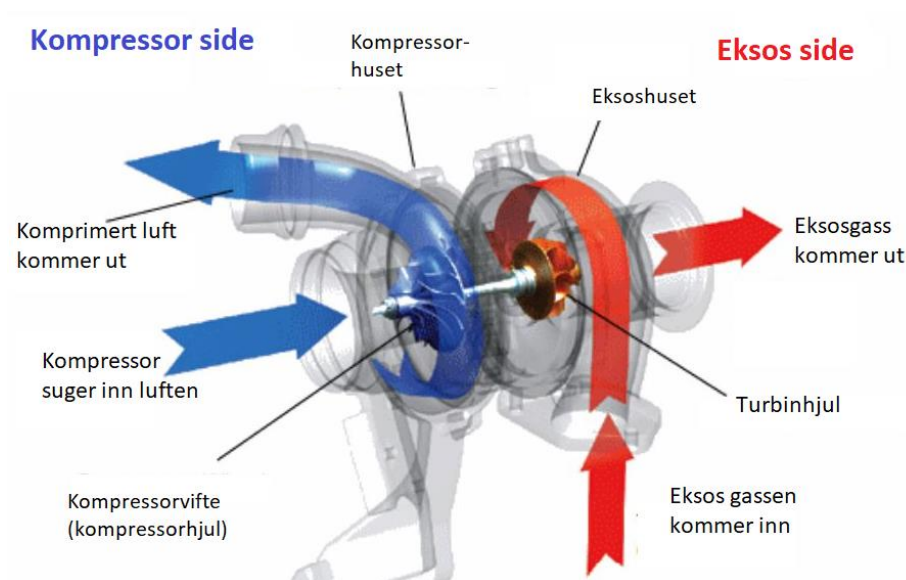
Basert på lignende oppgaver (Bergquist og Seth 2014, Leknes, Myklebust og Ellingsen 2013) antar vi at våre temperaturer kommer til å ligge på:

- T01: 25 °C
- T02: 150 °C
- T03: 860 °C
- T04: 700 °C

## 2.3 Turboladerens virkemåte

For å forstå hvorfor det er mulig å lage en gassturbin av en turbolader er det viktig å få et innblikk i hvordan en turbolader fungerer.

En turbolader brukes til mange formål. Alt fra en liten bilmotor til en stor skipsgenerator. En turbolader har som hensikt å øke ytelsen på en motor. Turboladeren er satt sammen av en kompressor og en turbin, koblet sammen på én felles aksling. Turbinen drives av avgassen til en forbrenningsmotor og roterer kompressoren. Kompressoren komprimerer luft inn i sylindren med høyt trykk. Dette gir mer oksygen i sylindren slik at mer brennstoff kan forbrennes. I tillegg gir det økte trykket på luften renere forbrenning slik at mer av den kjemiske energien i brennstoffet kan utnyttes. Tilsammen gir turboladeren både høyere effekt og høyere virkningsgrad for motoren den sitter på (Turbo 2019).



Figur 2.3 Visualisering av hvordan en turbolader fungerer (Turbo 2019)

## 2.4 Turbolader som gassturbin

Både turbolader og gassturbin fungerer etter det samme prinsippet med kompressor og turbin koblet på én aksling. Den hovedsakelige forskjellen ligger i at turboladeren er et hjelpesystem til en annen motor, mens gassturbinen er en selvstendig motor. Der turboladeren henter sin

---

avgass fra en annen motor, genererer gassturbinen sin egen avgass i et brennkammer. Ved å konstruere et brennkammer til turboladeren, vil det i prinsippet ikke være noen forskjeller og vi vil få en gassturbin som fungerer etter Brayton-syklusen. Dette er hovedprinsippet bak oppgaven vår.

## **2.5 Brennkammerets virkemåte**

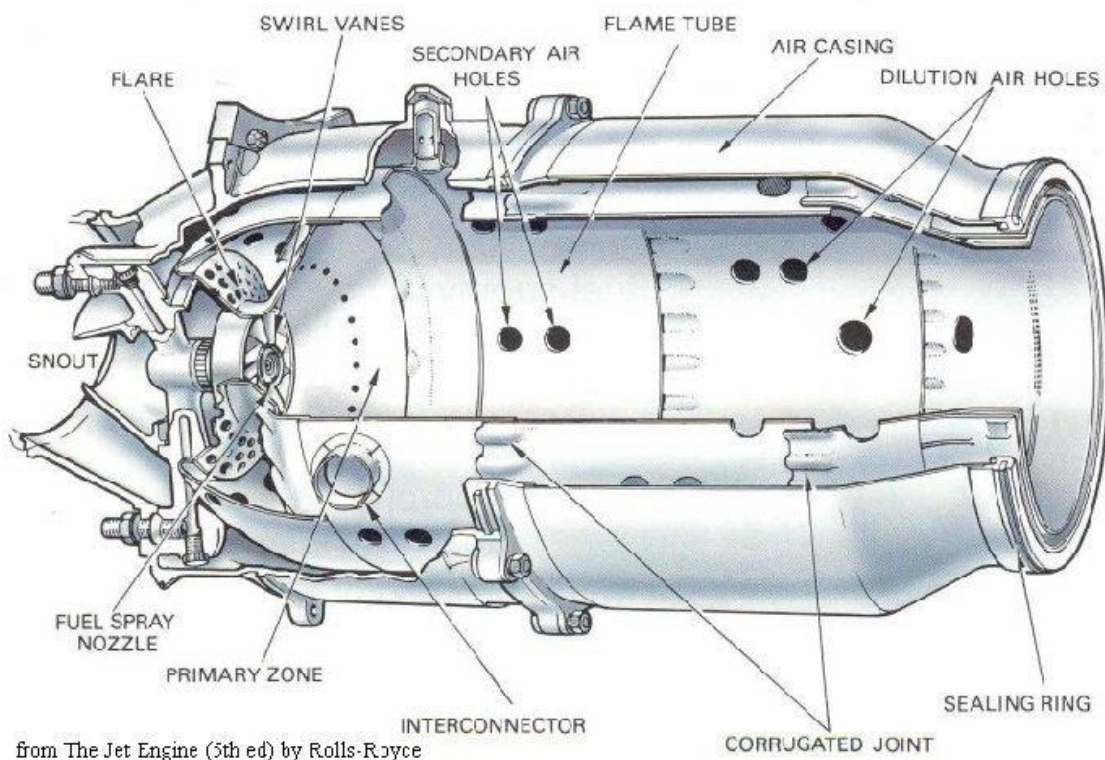
I brennkammeret forbrennes luft og drivstoff, som frigjør varme. Denne varmen overføres til avgassen. Ved å varme opp gassen vil den ekspandere. Det gir seg dermed at en høyere frigjørelse av varme i brennkammeret, vil gi en større ekspansjon av gassen. En større ekspansjon vil gi mer kraft over turbinen. I tillegg gir høyere temperaturer bedre forbrenningsreaksjoner (Saravanamuttoo, Rogers, Cohen og Straznicky 2009, s. 279). Derfor er det ønskelig å få så høy temperaturøkning som mulig i brennkammeret, uten at den høye temperaturen forårsaker materielle skader. Spesielt turbinen er utsatt siden den i tillegg til de høye temperaturene, også påvirkes av sterke sentrifugalkrefter. Den ønskede høye temperaturen må derfor balanseres med nødvendig kjøling. Måten man kan regulere temperaturen på er ved bruk av flammerør.

### **2.5.1 Flammerør**

Flammerøret er et perforert rør som går på innsiden av brennkammeret, se figur 2.5. Hullene i røret er delt inn i soner slik at man kan oppnå riktig fordeling av kjøling og forbrenning: Primær-sonen, sekundær-sonen og tertiær-sonen (også kalt uttynnings-sonen). (Saravanamuttoo, Straznick, Cohen og Rogers 2009, s.279).

I primærsonen ledes luft inn til forbrenningen. Til forbrenningen ønsker man å ha et støkiometrisk overskudd. Altså at hvert brennstoff-molekyl har mer enn nok tilgang til oksygen for å oppnå fullstendig forbrenning. Samtidig ønsker man ikke for mye luft inn til flammen, da det vil medføre mye kjøling som gir lav forbrenningstemperatur og dårlig forbrenningsgrad. Hvor stor andel av luften som skal inn i primærsonen varierer i forhold til hva slags brennstoff som blir brukt og hvor stor massestrømmen til luften er i forhold til brennstoffet. Likevel er forholdet nokså likt, uansett hvordan gassturbinen er bygd opp. Ulike kilder oppgir forskjellig verdi for hvor stor andel av luften som skal i primærsonen, men mellom 15-30% er optimalt (Saravanamuttoo et al., 2009, s. 279, Rolls-Royce 2005, s. 13, Furze 2013, Tech Ingredients 2019).

Temperaturen til gassene som kommer ut av primærsonen holder en svært høy temperatur på ca. 2100 °C (Rolls-Royce 2005, s. 116). Denne temperaturen er så høy at både brennkammeret og turbinen vil ta skade av det. Derfor må flammen kjøles ned ved hjelp av mer luft i sekundærsonen. I tillegg ønsker man å fullføre forbrenningen av eventuelle uforbrente brennstoffer og bi-stoffer av forbrenningsreaksjonen som f.eks. NO<sub>x</sub> og CO. Samtidig vil man også her unngå å slippe inn for mye luft, da for mye kjøling i sekundærsonen kan forverre forbrenningsreaksjonen. Det oppgis derfor at rundt 20-30% av luften bør gå inn i sekundærsonen (Saravanamuttoo et al., 2009, s. 279, Rolls-Royce 2005, s. 13).



**Figur 2.4: Illustrasjon av brennkammer med ytterkappe (air casing) rundt flammerøret (flame tube) (Rolls-Royce 2005).**

Til slutt, i tertiærsonen blandes den resterende delen av luften med avgassene slik at temperaturen senkes til et nivå som ikke skader turbinen. Det er viktig her å sørge for tilstrekkelig turbulens, slik at varme og kalde strømninger blandes tilstrekkelig godt. (Saravanamuttoo et al., 2009, s. 279). Det sørger for jevnere temperatur som unngår lokale opphetinger i turbinen.

Fra kompressoren kommer luften inn med svært høy hastighet som kan risikere å blåse ut flammen. For å redusere hastigheten brukes en diffusor. Diffusoren er i prinsippet en konisk

---

formet kanal med økende tverrsnitt i strømningsretning (Lund 2012, s. 89). Diffusoren sørger også for at trykket på luften øker i samsvar Bernoullis ligning om energikonservering i strømninger (Lund 2012, s. 180).

## 2.6 Turboladeren benyttet i oppgaven

Turboladeren som blir benyttet til i oppgaven er en KKK K27 turbolader (se «vedlegg A» for merkeskilt). Denne typen turbolader har vært brukt på en MTU 8V 183 TE 92 dieselgenerator bestående på Oslo-klasse fregatter. Motoren hadde en ytelse på 490 kW (Nautipedia 2011). Oslo-klassen fregattene gikk ut av drift i 2007. Dermed kan man anta at turboladeren er minst 12 år gammel, men sannsynligvis enda eldre. Turboladeren ble gitt til oss av veileder på vegne av Sjøkrigsskolen.



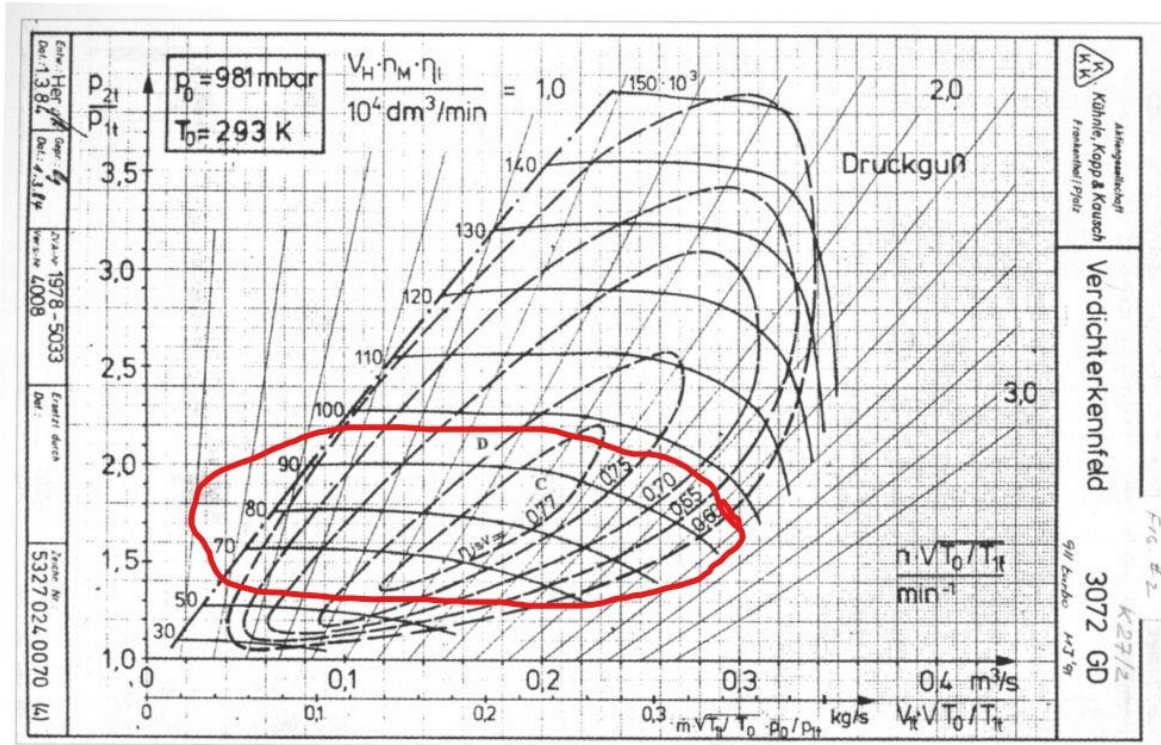
**Figur 2.5: KKK K27 Turbolader**

Godset er av støpejern og meget robust. Selv om den er mange år gammel er den i meget god stand, muligens fordi den har vært på lager som reservedel. Turbinen er vannavkjølt, mens kompressoren er luftkjølt.

Siden turboen er gammel er det vanskelig å oppdrive konkret informasjon om dens ytelser. Veileder anbefalte et kompressorkart som tilhørte MTU183 serien (se «vedlegg B»), men det tilhørte ikke denne modellen K27 turbolader. Likevel gir kompressorkartet en god pekepinn på hvilket turtall, trykkforhold og masseflyt som denne turboladeren kan operere med. Med



forbehold om at kompressorkartet er unøyaktig i forhold til modellen i oppgaven, baserer oppgaven seg på kompressorkartet etter anbefaling fra veileder.



**Figur 2.6: Kompressorkart til MTU 183-serie. Rød merking er antatt driftsområde på vår turbo.**

Kompressoren er radiell med en åpen impeller. Empirien tilsier at maksimal tipp-hastighet for slike impellere er  $\sim 500$  m/s (Science Direct 2019). Ved å måle impellerens tipp-radius til 42,5 mm, beregnes fra formel 2.1 dermed maksimalt turtall på vår turbolader til 112 344 rpm.

$$U_{tip,maks} = \omega_{maks} * r_{tip} = \frac{60n_{maks}}{2\pi} * r_{tip}$$

$$n_{maks} = \frac{30}{\pi} * \frac{U_{tip}}{r_{tip}}$$

(formel 2.1)

$U_{tip,maks}$  = Maksimal tipp – hastighet for impeller

$\omega_{maks}$  = Maksimal vinkelhastighet

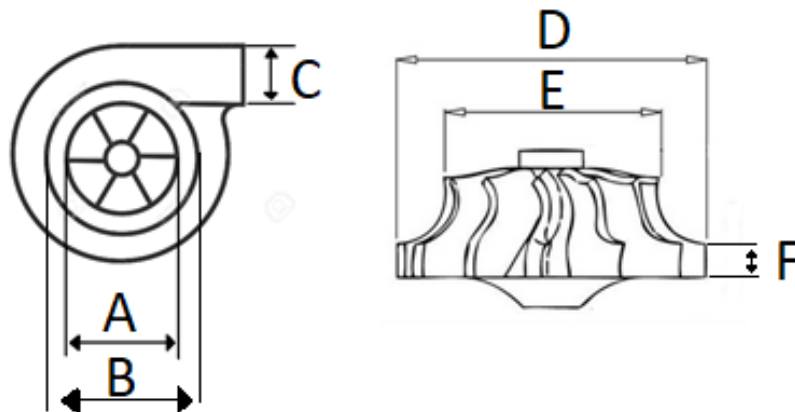
$r_{tip}$  = Ytre radius impeller

$n_{maks}$  = Turtall på impeller

Det maksimale turtallet fra kompressorkartet ligger derimot på 150 000 rpm. Det er vanskelig å vite hvilke av disse tallene man skal ta til etterretning, men det tryggest er å anta det laveste, altså 112 000 rpm. Vi antar videre at gassturbinen kommer til å ha vesentlig lavere effekt enn dieselgeneratoren. Dette gjør at vi antar at turboladeren kommer til å holde et lavere turtall enn maksimal begrensning, som gjør oss trygge på at turboladeren ikke vil kjøres i stykker av gassturbinen.

Dermed antar vi at driftsturtallet vil ligge på rundt 70 000 ~ 90 000 rpm, se figur 2.7.

Aktuelle dimensjoner på kompressorsiden er målt til:



**Figur 2.7: Dimensjoner, kompressor**

*Tabell 1: Dimensjoner, kompressor*

Bokstav	Navn	Mål
A	Indre diameter, innsug	63.3 mm
B	Ytre diameter, innsug	91 mm
C	Diameter, utløp	76 mm
D	Ytre diameter, rotor	85 mm
E	Indre diameter, rotor	61 mm
F	Høyde, ytre rotorblad	5 mm

---

## 3. Fremgangsmåte

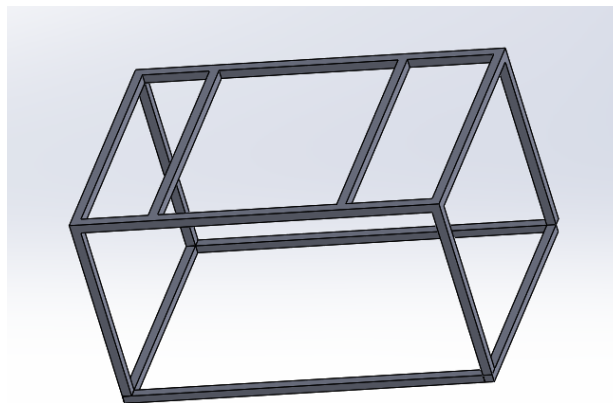
### 3.1 Rammen

Rammen til gassturbinen skal være fundamentet i prosjektet. Ifølge mål 4, skal maskinen ha plass til å videreutvikles samt være solid nok til å tåle nye komponenter. Det er derfor viktig at valg av materialet og utformingen gjør rammen robust. Siden produksjonsfasen skulle gjennomføres på UVB er materialvalget begrenset til de materialer som UVB har tilgjengelig.

Det sto mellom to materialer, stål og aluminium. Stål er enklere å bearbeide og sammenføre, mens aluminium veier mindre. Med begrensningen i tid, anser vi enkel bearbeiding som den viktigste egenskapen og vurderte at firkantør i stål var best egnet til å produsere rammen. Til bearbeiding av stålet ble det brukt båndsaag for grove kutt og vinkelsliper for fine kutt.

I tillegg til kravet om maksimal bredde på 0.80 m, burde den også ha en passende arbeidshøyde. For å finne det, undersøkte vi arbeidsbenker både på UVB og på skolen. Vi kom frem til at en høyde på  $1,0 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$  var passende. Basert på arealplanlegging, se figur 3.3, ble lengden bestemt å være 1.2 meter. Det ga mye rom for fremtidige utvidelser, uten at den ble uhensiktsmessig stor som er i samsvar med krav 4.2.

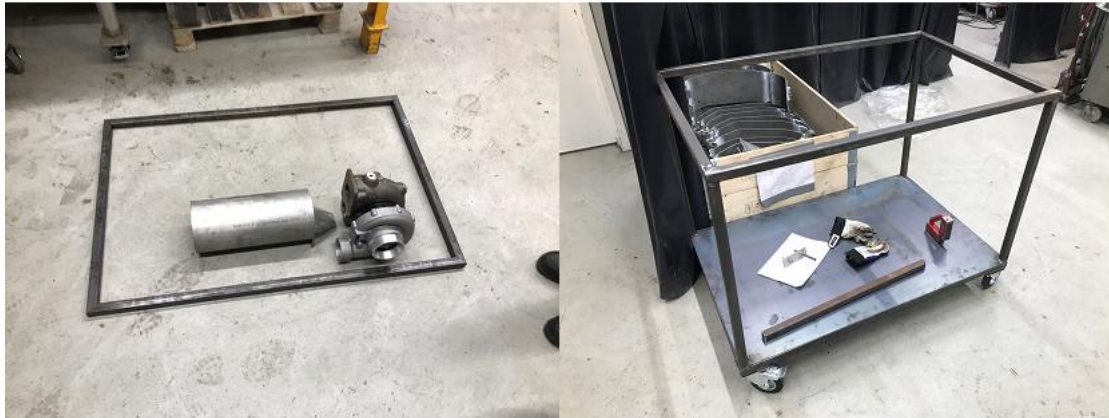
Med de overnevnte dimensjonene ble en modell av rammen konstruert i 3D-modelleringsprogrammet SolidWorks. Dette ble gjort for å få gode konstruksjonstegninger som økte nøyaktigheten og bidro til å redusere produksjonstiden, disse ligger i eget vedleggshefte (se «Konstruksjonstegninger for gassturbin»).



**Figur 3.1: Rammen modulert i  
SolidWorks**

Selve rammen består av 4x800mm, 6x740mm, og 4x1200mm firkanttrør med dimensjon 30x30x3 mm.

For sammenføyningen av rammen ble firkanttrørene MIG-sveiset, og i bunn ble det satt inn en 3 mm stålplate til plassering av utstyr.



**Figur 3.2:** Til venstre: Kontroll av størrelsen til rammen. Til høyre: Rammen, uten tverrbjelker

For å estimere vekten av rammen ble følgende beregner brukt:

- Materiale: Svartstål
- Dimensjon: 30x30x3 mm
- Tetthet: 7870 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Total lengde (firkanttrør)} = 4 * 0.8m + 4 * 1.2m + 6 * 0,74m = 12.44m$$

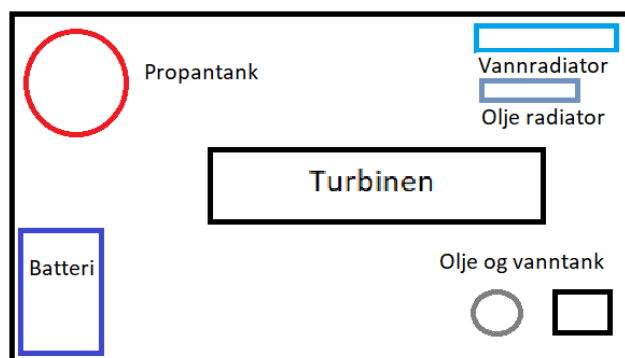
$$\begin{aligned} \text{Volum av godset} &= V_{firkanttrør,ytre} - V_{firkanttrør,indre} + V_{bunnplate} \\ &= 0.030m * 0.030m * 12.44m - 0.024m * 0.024m * 12.44m + 0.80 m \\ &\quad * 1.20 m * 0.003 m = 0.00692m^3 \end{aligned}$$

$$\text{Vekt}_{ramme} = \text{Volum} * \text{Tetthet} = 0.006924m^3 * 7870 \frac{kg}{m^3} = 54.46 kg$$

Etter at samtlige deler ble produsert ble de veid til 53.96 kg, litt under 1% av estimert vekt og godt innenfor feilmarginen.

Til å gjøre rammen mobil, ble den plassert på 4 dreibare hjul med innebygget brems. Det gjorde rammen lett å transportere samtidig som den kunne stå stabilt under testkjøringen.

Hjulene er oppgitt til å tåle 140 kg belastning per hjul. Til sammen kan hjulene bære en vekt på 560 kg. Overslagsberegninger fastslo vekten til resten av utstyret på å være ca. 130 kg. For å balansere rammen og utjevne belastningen på hjulene, ble utstyret fordelt etter estimert tyngde. Figur 3.3 viser plasseringen av utstyret sett ovenfra.



**Figur 3.3 Oversikt over plassering av utstyr**

Da alle delene var anskaffet, totalvekten, inkludert rammen, veid til 169 kg. Dette gir en mulighet for å utvidelser på opptil 391 kg, som anses å være tilfredsstillende i henhold til mål 4. Se «vedlegg G» for fullstendig vektregnskap. De endelige dimensjonene for rammen ble 1195 mm lang, 800 mm bred og 960 mm høy.



**Figur 3.4: Kadett Panfilovs under sveising av rammen**

---

## 3.2 Brennkammer

Dette kapittelet utdyper konstruksjonen av brennkammeret. Konstruksjonen besto av beregninger, tegning, produksjon og montering. Med brennkammer mener vi flammerør og ytterkappen rundt, samt flenser og pakninger tilknyttet disse.

Kravene til brennkammeret er:

- Brennkammeret skal drive turbinen og sørge for at turbinen er selvgående
- Brennkammeret må være mulig å demonteres fra rammen
- Flammerøret og ytterkappen må kunne separeres for fremtidig utvikling
- Brennkammeret må være fri for lekkasjer

### 3.2.1 Innledning

På grunn av materialer og produksjonsmidler tilgjengelig vil det være stor forskjell på utformingen av brennkammer til industrielt bruk og brennkammeret oppgaven skal konstruere. Den tilgjengelige pensumlitteraturen beskriver hvordan brennkammer til industrielle gassturbiner dimensjoneres, men lite om dimensjonering av brennkammer til gassturbiner på liten skala. I tillegg er det store usikkerheter knyttet til turboladerens data som nevnt i kapittel 2.6. For å oppfylle målet om at gassturbinen skal være funksjonell, besluttet vi derfor å støtte oss på empiri for å dimensjonere brennkammeret.

Derfor ble det gjort en grundig undersøkelse av lignende prosjekter for å finne en pålitelig metode for dimensjoneringen av brennkammeret. Undersøkelsen fant at både HVL (Ellingsen, Leknes og Myklebust 2013), HiOA (Håheim, Fredrik, Mir Imran og Sven Greger) og NTNU (Lundgaard 2013) har erfaringer med tilsvarende oppgaver. Deres erfaringer understøttes av en rekke lignende prosjekter utført av privatpersoner (se egen liste i [referansen](#)).

Resultatet fra undersøkelsen var en empirisk bevist fremgangsmåte for dimensjonering av brennkammer til bruk på turbolader. Fremgangsmåten som benyttes, tar utgangspunkt i diameteren til turboladerens luftinntak ( $d_{inntak}$ ) og dimensjonerer brennkammeret i forhold til det. Forholdstallene som er brukt ble anbefalt av både HVL og NTNU og er mest i tråd med pensumlitteraturen (se kapittel 2.5).

Flammerøret dimensjoneres dermed på følgende måte:

*Tabell 2: Dimensjonering av flammerør*

Lengde	$6 * d_{inntak}$
Diameter	$2 * d_{inntak}$

Til å dimensjonere de forskjellige sonene i flammerøret tar man utgangspunkt i arealet til luftinntaket,  $A_{inntak}$ . Deretter fordeler man gjennomstrømningsarealet til de forskjellige sonene med en sonfaktor  $f$  som vist i *Tabell 4: Dimensjoner på flammerør*:

*Tabell 3: Dimensjonering av soner til flammerør*

Sone	Sonefaktor $f$	Gjennomstrømningsareal, $A_{sone}$
Primærsonen	0.3	$0.3 * A_{inntak}$
Sekundærsonen	0.2	$0.2 * A_{inntak}$
Tertiærsonen	0.5	$0.5 * A_{inntak}$

Dimensjonen på borehullene i de forskjellige sonene skal være slik at summen av alle borehullarealene blir lik det beregnede arealet til sonen. Antall hull  $n$  som skal bores henger dermed sammen med borediameteren  $d_{bor}$  slik (formel 3.1):

$$A_{sone} = f * A_{inntak}$$

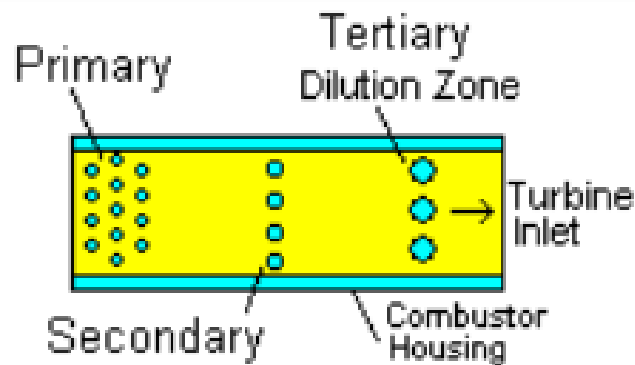
$$n * \frac{\pi}{4} * d_{bor}^2 = f * \frac{\pi}{4} * d_{inntak}^2$$

$$d_{bor}^2 = \frac{f}{n} * d_{inntak}^2$$

$$d_{bor} = d_{inntak} \sqrt{\frac{f}{n}}$$

Formel 3.1

Ytterkappen dimensjoneres ved å legge til 25 – 38 mm på diameteren til flammerøret slik at det etterlates et mellomrom på mellom 12,5 – 14 mm for luften til å strømme igjennom. Lengden på ytterkappen skal være slik at det tetter fullstendig rundt flammerøret.



**Figur 3.5: Illustrasjon av flammerør til bruk i ringformet brennkammer (Nuclearprojects 2004)**

### 3.2.2 Dimensjonering av flammerør

Av praktiske årsaker var det ikke mulig å produsere flammerøret etter de eksakte målene som beregnet. Det kom av tilgjengelig materiell og verktøy. Forskjellen fra de beregnede verdiene og faktiske verdiene var derimot så små, at vi anser resultatet til å være akseptabelt.

Diameteren på luftinntaket til turboladeren er målt til 63,3 mm. Ved å bruke verdiene fra *Tabell 2*, gis følgende mål til flammerøret:

*Tabell 4: Dimensjoner på flammerør*

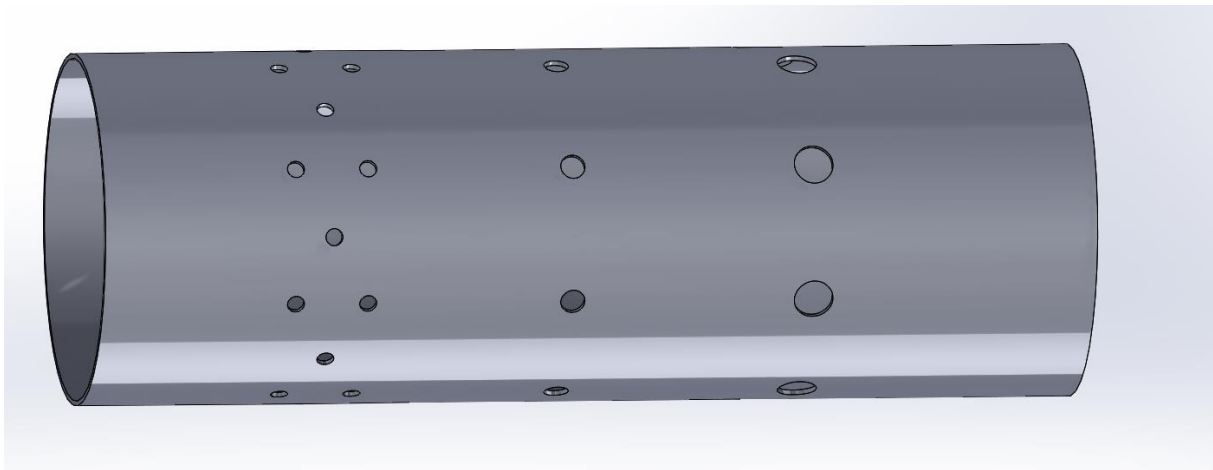
Dimensjon	Beregnet størrelse	Faktisk størrelse
Lengde	405 mm	412 mm
Indre Diameter	135 mm	140 mm

Fra undersøkelsen viser empirien at primærsonen skal ha flere små hull, mens sekundærsonen og tertiærsonen skal ha færre og større hull (Furze 2013, Nuclearprojects 2004). Dette gjøres for å skape turbulens slik at oksygenet og brennstoff blandes tilstrekkelig i primærsonen og for at kalde luftstrømmer bryter opp de varme i tertiærsonen (Saravanamuttoo et al. 2009,



s.279, Rolls-Royce 2005, s. 116). Undersøkelsen viste også at antall hull i hver sone varierte stort og ga ingen svar om hva som er mest optimalt.

Basert på de beregnede verdiene og det teoretiske grunnlaget, tegnet vi flammerøret i SolidWorks. Hensikten var å bruke SolidWorks til flow-simulering for å se hvilke løsninger som ga mest turbulens og minst strømmingstap. På grunn av teknisk problemer, lot dette seg ikke gjøre innenfor rimelig tid, og vi valgte å ikke prioritere mer tid på det.



**Figur 3.6: Flammerøret, tegnet i SolidWorks**

For å forenkle produksjonen og samtidig oppfylle kravene til turbulens, fant vi at det mest hensiktsmessige er 8 hull for tertiærsonen, 8 hull i sekundærsonen og 24 hull i primærsonen. På grunn av omfanget til oppgaven, ble det ikke prioritert å bruke mer tid på optimalisering av flammerøret. Med formel 3.1 fikk vi følgende borediametere:

*Tabell 5: Dimensjoner til borehull i flammerør*

Sone	Beregnet borediameter	Faktisk borediameter
Primærsonen	7.55 mm	7.5 mm
Sekundærsonen	10.67 mm	10 mm
Tertiærsonen	16.88 mm	16 mm

Alle hullene er slipt med gradekniv for å unngå unødvendige strømmingstap.

---

Forbrenningen fører til at innsiden av røret får en svært høy temperatur, mens utsiden av stålet blir kjølt ned av luftstrømmen. Ettersom stål utvider seg i varme fører dette til større utvidelser på innsiden enn på utsiden som gir spenninger i stålet. Dette kalles termiske spenninger. Ved større tykkelse i materialet vil temperaturforskjellen være større, og dermed vil de termiske spenningene bli større. Høyere termiske spenninger vil føre til mer slitasje på materialet. Basert på dette ønsket vi 1 mm tykkelse på flammerøret, men ettersom dette materialet ikke var tilgjengelig, ble tykkelsen på flammerøret 2 mm.



**Figur 3.7: Flammerøret etter produksjon**

I enden av flammerøret er det sveiset på et lokk hvor det er boret opp hull til gassdyse og tennplugg. Rundt ytterkanten av lokket er det boret og gjenget opp 12 hull slik at flammerøret kan monteres til ytterkappen med skruer. Imellom ytterkappen og lokket er det en pakning. Dette er vurdert til å være tilstrekkelig for å forhindre lekkasjer og dermed trykkfall i brennkammeret.

### **3.2.3 Dimensjonering av ytterkappen**

Diameteren til ytterkappen skal ifølge empirien være 25 – 38 mm større enn diameteren til flammerøret (Nuclearprojects 2004). Det vil si mellom 165 og 178 mm. Vi har brukt et rør

---

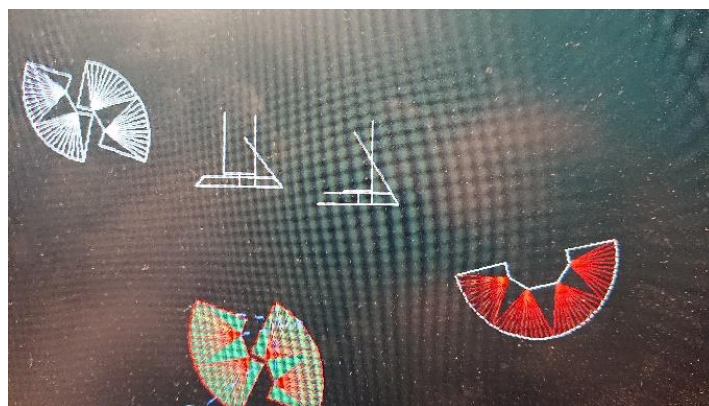
som måler 168 mm med en tykkelse på 2 mm til å produsere ytterkappen. Siden ytterkappen ikke er like utsatt for termiske spenninger som flammerøret, er 2 mm en passende tykkelse.



**Figur 3.8: Ytterkappen**

Ytterkappen er festet med en flens som kan skrus fast på turbinen. Mellom ytterkappen og flensen er det sveiset på en trakt. Den har som funksjon å tette for luftstrømmen mellom flammerøret og ytterkappen. Etersom det er svært krevende å lage trakten har vi benyttet ressurser ved UVB til å gjennomføre dette arbeidet.

Trakten er tegnet på dataprogrammet «Igems» for så å kuttes ut i to identiske deler med en vannjetsskjærer. Deretter er de knekt 12 ganger med overlappende knekk. Til slutt ble de sveiset sammen til ytterkappen og klemt på plass slik at luften ikke kan strømme mellom ytterkappen og flammerøret.



**Figur 3.9: Dimensjonering av trakten på dataprogrammet "Igems"**

---

I ytterkappen er det kuttet et hull til luftforsyning fra kompressoren. Hullet er kuttet litt før primærsonen på flammerøret. Luftforsyningsrøret er sveist fast i ytterkappen og koblet til kompressoren med silikonslange og slangeklemmer. Luftforsyningsrøret har en større diameter enn utløpet på kompressoren, slik at den også virker som en diffusor.

### 3.2.4 Flenser og pakninger

Pakningene er eksospakninger til U-båt og vi anså de dermed som gode nok til vårt formål. Både flensene og pakningene er skåret ut med vannskjærer. Flensene har en tykkelse på 5 mm.

Flensene og pakningene er brukt til å tette alle åpninger for kjølevann, luft og eksos. I tillegg er flensene brukt som festepunkter for å montere brennkammer og turbolader til rammen.

### 3.2.5 Valg av materiale

Til flammerøret, ytterkappen og alle flenser ble det brukt Rustfritt 316 L Syrefast Stål. Dette materialet er valgt siden det har gode sveiseegenskaper, høy motstand mot korrosjon og høy varmebestandighet (Astrup (a) 2019), egenskaper som vi vurderte som praktiske.

Alle skruer og gjenger samt dysen er smurt inn med monteringspasta av typen Chesterton 785(E). Dette er gjort for å forenkle montering og demontering, som kan være et problem ved høye temperaturer og trykk (Ahsell 2019).



**Figur 3.10: Trakt mellom ytterkappe og flens**

---

### 3.3 Brennstoffsystem

Brennstoffsystemet er utformet etter følgende krav:

- Må være sikkert for å unngå risiko for brann og eksplosjon
- Må levere tilfredsstillende mengder brennstoff
- Må være regulerbart for å justere pådraget på gassturbinen

#### 3.3.1 Valg av brennstoff

Det er mange forskjellige typer brennstoff som kan brukes i en gassturbin blant annet diesel, parafin, propan og F34 <sup>1</sup>. Vi vurderte propan opp mot diesel, da disse er mest tilgjengelig:

*Tabell 6: Fordeler og ulemper ved propan*

<b>Propan</b>	
<b>Fordeler</b>	<b>Ulemper</b>
Krever ikke forvarming eller forstøving for å antenne	Lav energitetthet (lite energi per volum)
Tanken er trykksatt så det trengs ikke eget pumpesystem for levering	Gass under trykk utgjør eksplosjonsfare
Høy brennverdi på 46,1 MJ/kg (Gasnor 2019)	Ekspanderende gas gir temperaturfall og dermed trykkfall ved lengre kjøring
Enkelt å lagre over tid	Vanskeligere å oppdage lekkasjer

*Tabell 7: Fordeler og ulemper ved diesel*

<b>Diesel</b>	
<b>Fordeler</b>	<b>Ulemper</b>
Enkelt å anskaffe	Krever eget leveringssystem
Høy energitetthet	Må forstøves og forvarmes for å antenne
Lav brannfare og ingen eksplosjonsfare	Ved lagring over tid dannes det slam i tanken

---

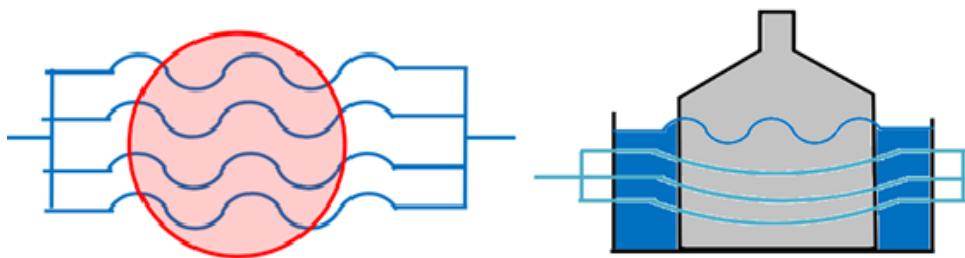
<sup>1</sup> F34 er en parafin/dieselblanding som er mye brukt i Forsvaret, alt fra stridsvogner til primus

Vi vurderte eksplosjonsfare som den største ulempen med propan. Det strider direkte mot vårt krav om sikkerhet. Likevel vurderte vi det som sikkert hvis gassturbinen ble kjørt utendørs. På den måten unngår man opphoping av eventuell gasslekkasje. Innsprøytingen var den største ulempen med diesel. Det hadde krevd et leveringssystem med en høytrykkspumpe og egen dyse til forstøvning. I tillegg måtte dieselen også ha forvarming. Med tanke på omfanget av oppgaven, var det ønskelig å gjøre alt så enkelt så som mulig. Derfor bestemte vi oss for å benytte propan som brennstoff.

### 3.3.2 Nedkjøling av tanken

En annen utfordring ved propan er at tanken blir svært kald ved lengre bruk. Det skyldes at gass som ekspanderer mister sin indre kinetiske energi og får dermed et temperaturfall. Dette medfører en betydelig trykkreduksjon på tanken, noe som gjør at muligheten for å levere mye brennstoff over tid, reduseres (Bergquist og Seth 2014, s. 49).

Under planleggingsfasen så vi på muligheter for å bruke kjølevannet til å motvirke nedkjøling av propantanken. Kjølevannet får en høy temperatur som må reduseres og propantanken får en lav temperatur som bør økes. Dette ville dermed gi en god symbiose-effekt. Vi kom opp med to utkast: Et hvor tanken stod direkte eller indirekte oppå metallrør som fraktet kjølevann, tilsvarende varmekabler på et bad. Dette var den enkleste løsningen, men kunne gi høye lokale temperaturer på propantanken. Det andre utkastet gikk på å sette tanken i et vannbad og la kjølevannsslanger gå gjennom vannet. Med å bruke vann som varmeveksler mellom propantanken og kjølevannet, unngår man at de kommer i direkte kontakt. Dette ville gi en jevnere varmeveksling.



**Figur 3.11: Utkast for løsninger med kjølevann til oppvarming av tanken. Til venstre: (sett fra oven) «Varmekabel»-utkastet. Til høyre: «Vannbad»-utkastet**

Utfordringen med denne løsningen var å lage et kar som passet på rammen, med muligheter for drenering samtidig som det ikke lakk. I tillegg var vi også usikre på om ikke kjølevannet

---

ville bli for varmt. Fra driftsmanualen til dieselgeneratoren som turboladeren opprinnelig hørte til, står det at vanlig driftstemperatur for kjølevannet er mellom 85-90 °C (MTU Friedrichshafen GmbH 2002 Group A: Subgroup050: Page 01). AGA oppgir at sikkerhetsventilen til propantanken åpner seg ved 60 °C (AGA 2010). Dermed kunne en slik vannbad-løsning føre til utløsning av sikkerhetsventilen og lekkasje av propan. Med tanke på sikkerheten og tidspresset, vurderte vi ikke denne løsningen som prioritet, men anbefaler det til fremtidig arbeid, se. Kapittel 7.6.

Den endelige løsningen ble et eksternt vannbad, fylt med vann på ca. 40 °C. Det var enklest og tryggest, samtidig som det bevarer muligheten for videreutvikling.

Tanken har kapasitet på 11 kg og makstrykk på 7 bar.



**Figur 3.12: Til venstre: Propantank plassert i vannbad. Til høyre: Frostdannelse på utsiden av tanken ved kjøring uten vannbad**

### **Regulering av pådrag**

Pådraget til turbinen reguleres ved å regulere masseflyten av propan inn til brennkammeret. For å få gode tallverdier på flyten, var det ønskelig med en volumstrøms-regulator med tilhørende volumstrøms-måler. I samtale med Gass Service AS skulle det vise seg å være svært kostbart og vanskelig å oppdrive. Dermed ble det besluttet å gå for en trykkregulator med manometer for å regulere pådrag. Sistnevnte er hylleware og dermed rimelig og enkelt å anskaffe.



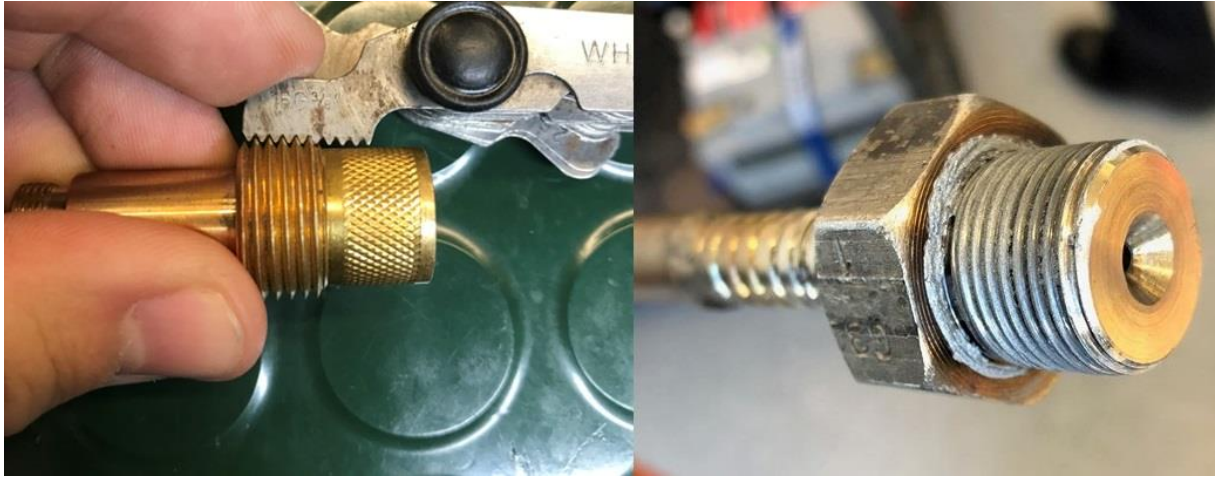
**Figur 3.13: Trykkregulator med manomanometer og stengeventil med lås**

Manometeret vi har valgt gir en god visuell referanse på hvor stort pådrag man ligger på. Dette anser vi som viktig for å utføre nøyaktige tester. I tillegg til manometeret er det mulig å måle masseflyten ved å veie propantanken før og etter en bestemt tid. Denne løsningen gir ikke momentan måling av masseflyten, men vil gi presis informasjon om gjennomsnittsforkonsumet.

### **3.3.3 Dyse**

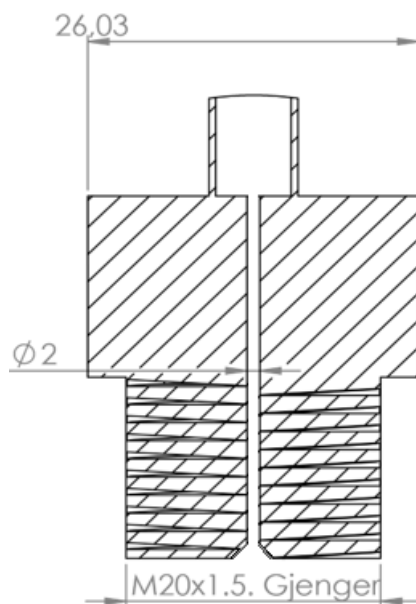
Til å sprøyte gassen inn i brennkammeret kreves en dyse. Dysen har som formål å gi motstand til trykket i tanken. Uten en dyse, vil masseflyten være for høy i forhold til luftgjennomstrømmingen og dette vil føre til dårlig forbrenning. I tillegg gir mottrykket en forstøvende effekt som øker forbrenningsgraden. Under planleggingsfasen ble det vurdert å bruke en sveisegassdyse. Disse finner man i alle sveiseapparater som bruker gass og er dermed forbruksvare. I tillegg tåler de høy temperatur og er allerede gjenget opp for enkel montering. Ved testing av brennstoffsystemet viste det seg derimot at sveisegassdysen ga dårlig forbrenning. Resultatet var mye sot og lave temperaturer, så derfor besluttet vi å produsere en egen dyse.





**Figur 3.14: Til venstre: Sveisegassdysen. Til høyre: Egenprodusert dyse**

Dysen er dreiet ut av sekskant-stål og boret opp med 2 mm åpning. Basert på sammenligninger med andre dyser til gassbrennere, vurderte vi 2 mm til å skape tilstrekkelig mottrykk. Ytterst la vi inn en forsenkning som er tiltenkt å gi gassen en spredning ut i brennkammeret. I tillegg la vi inn en forlengelse på utsiden slik at gasslangen skulle få litt avstand fra brennkammeret og unngå varmeskader. Den egenproduserte dysen leverte langt bedre resultater enn sveisegassdysen og vi anså den som tilfredsstillende.



**Figur 3.15: Konstruksjonstegning av egenprodusert dyse**

---

### 3.3.4 Slinger og koblinger

Slangene som er brukt er standard, oransje propanslanger levert av Gass Service AS, og er vurdert som tilfredsstillende. For å unngå lekkasjer brukte vi gjengeteip og slangeklemmer i alle koblinger. Deretter testet vi med trykkluft for å verifisere at det var tett, før vi prøvde med propan.



**Figur 3.16: Kadett Panfilovs under test av brennstoffsystemet**

## 3.4 Smøreoljesystem

Smøreoljesystemet er et vitalt system i gassturbinen. Den har som hensikt å smøre, kjøle og rensse lageret og akslingen i gassturbinen. Vi estimerte gassturbinen til å operere på svært høye turtall og dermed er det spesielt viktig at lagrene får tilstrekkelig med smøring og kjøling, samt nødvendig oljetrykk.

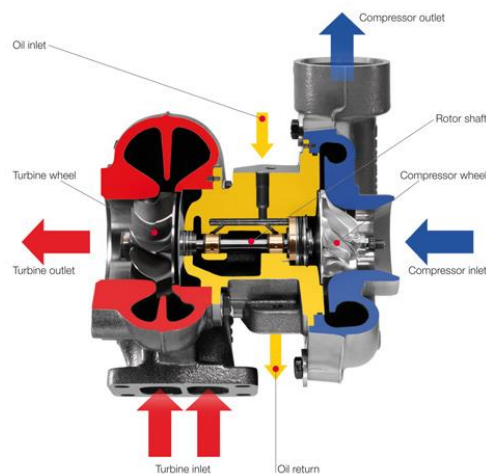
Krav til smøreoljesystemet:

- Må sørge for at lagrene blir tilstrekkelig smurt
- Skal være lett å justere trykket, slikt at faren for utblåsning fra lagerhuset reduseres
- Skal være enkelt å bytte oljefilter

### 3.4.1 Lager

Siden turboladere roterer med meget høyt turtall er det høye krav til lager. Vanligvis benyttes det spesielle presisjonslager, i dette tilfelle benyttes glidelager.

Glidelager er lager som overfører krefter mellom flater som glir mot hverandre. I et glidelager oppstår det høye temperaturer. For å redusere varmedannelse som oppstår mellom de glidende overflatene, benyttes det trykksmøring. Trykksmøring er et smøresystem som leverer et oljetrykk mellom 1-5 bar, inn i lagerhuset.



**Figur 3.17: Illustrasjon av lagerhus i en turbolader**

Ved hjelp av trykket tvinges oljen inn mellom flatene som glir mot hverandre og danner en tynn oljefilm. Denne oljefilmen gjør at lageret ikke er i kontakt med selve akslingen, og redu-

serer friksjonen betraktelig. Oljen leder også varmen vekk fra lageret, samtidig som det smører og renser flatene. Som nevnt tidligere er glidelageret et presisjonslager. Det betyr at det stilles strenge krav til renhet, da en liten ripe kan føre til at lageret utvikler høye temperaturer som igjen vil føre til havari.

### 3.4.2 Filter

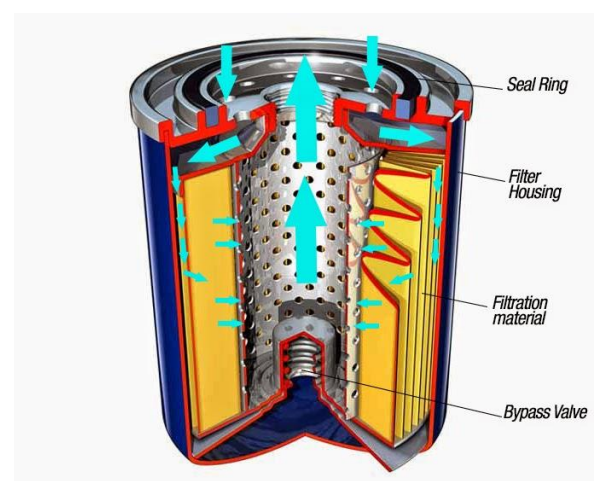
For å unngå urenheter i oljen er det montert et oljefilter. Filteret har som hensikt å ta opp smuss og småpartikler som kan ødelegge glidelageret. Filteret som er brukt i denne oljekretsen er et «spin-on»-filter. Filteret monteres enkelt ved å skru på en hylse som har samme gjenger som filterhuset. Filteret er lett å bytte ved å skru den av og montere et nytt filter.

Et «spin-on»-filter består primært av tre deler: En forseglingsring, et filterhus og fibermaterialet. Forseglingsringen sitter i toppen av filterhuset og er utformet som en o-ring. Den sørger for at oljen flyter inn til fibermaterialet. Filterhuset består av metall og er utformet sylindrisk. Inni filterhuset sitter fibermaterialet.

På figuren til høyre kan man se hvordan fibermaterialet ser ut i filteret. Den er utformet som et «trekkspill». Et gjennomsnittlig bilfilter klarer å ta partikler med størrelse på 25-30  $\mu\text{m}$  (Synlube 2019). Gassturbinen vår er langt mindre kompleks enn en bilmotor, med færre bevegelige deler og mindre slitasje. Den vil dermed produsere langt færre partikler i oljen enn en bilmotor og vi anser et biloljefilter som tilfredsstillende.



**Figur 3.18 Oljefilteret brukt i oppgaven**



**Figur 3.19: «Spin-on»-filter sett fra innsiden**

### 3.4.3 Kjøling av oljen

Gassturbiner utvikler mye varme og det er dermed viktig at oljen blir avkjølt. For å kjøle ned oljen brukte vi en radiator. Siden denne gassturbinen er utradisjonell var det viktig å få god nok kunnskap om hvilken radiator som passet best til oppgaven. Etter rådgivning med Turbo Service AS, som er autorisert importør av KKK-turbo, ble vi anbefalt at platekjøler vil være det beste alternativet. Platekjølere er kompakte og var dermed også godt egnet til våre krav.

Platekjøleren består av rader med hule kanaler. Mellom hver kanal er det mange små plater med et åpent rom imellom slik at luft kan strømme igjennom. Platene leder varmen vekk fra oljen som renner i kanalene. Ved å ha mange tynne plater får man stor overflate slik at mye varmeveksling kan skje på en gang (Hansheinrich & Bernhardt 2009 s.337). Figuren til høyre gir et bilde på hvordan en platekjøler er bygd opp.

På radiatoren ble det plassert en vifte som sørger for luftgjennomstrømningen. Denne viften kan både blåse og suge. Etter å ha testet hva som ga best gjennomstrømning, installerte vi den slik at den suger.

For å overvåke oljetemperaturen er det montert en temperaturmåler i oljetanken. Vi fant det mest hensiktsmessig å plassere giveren i tanken siden dette er utløpet fra turbinen. Det vil dermed gi en god indikasjon på hva smøreoljetemperaturen i selve turbinhuset er. Giveren ble koblet opp med en instrumentklokke på kontrollpanelet.

### 3.4.4 Pumpe

For at oljen skal avkjøle og smøre turboladeren må oljen sirkulere. I tillegg til sirkulasjon er det viktig at det er trykk i lagerhuset. Det finnes ikke noen fasit på hvor høyt trykket skal være. Det kommer an på bruksområdet. Er det hyppige endringer i belastningen, ved f.eks. bilkjøring må trykket være relativt høyt så det ikke faller for lavt ved pådrag. Er turboen plassert på en generator for eksempel, vil belastningen være stabil over tid slik at det ikke trenger å være så høyt. I vårt tilfelle vil gassturbinen operere på relativt stabile turtall.

K27-turboladeren er mye brukt innenfor bilracing. QWT Bergen er et firma som spesialiserer seg innen racing, og etter rådgivning med de ble vi anbefalt et oljetrykk på 1,5-3,0 bar. Denne



**Figur 3.20** Platekjøler

anbefaling samstemte med driftsdata fra den opprinnelige dieselgeneratoren (Nautipedia 2011) og dermed danner anbefaling grunnlaget for bestemmelsen av smøreljetrykket til oppgaven.

For å oppnå dette ble det anskaffet en «Amarine» forsyningspumpe som var oppgitt til å levere 14 liter olje per minutt. I systemet vårt anslo vi å ha rundt 4 liter olje, så pumpen var med vilje overdimensjonert. Årsaken til en overdimensjonert Pumpe er for å sirkulere oljen hyppig (opptil 3,5 ganger i minuttet) for å sikre god kjøling. Det vil også sørget for at trykket når anbefalt verdi på 3,0 bar. I tillegg vil pumpen ha et arbeidsoverskudd som er nødvendig ved eventuell videre utvikling av gassturbinen. Med så stor levering av olje er det viktig å unngå flaskehals. Det kan fører til at pumpen overbelastes. Måten vi løste det på er med et bypass-system.

Bypass-systemet fungerer som en «over-flow» kanal, ved at den overflødig oljen blir sendt tilbake til tanken. Bypass-systemet har også som funksjon å regulere oljetrykket.

Dette var viktig siden driftstrykket skulle være mellom 1,5 og 3,0 bar. Bypassen bestod av en treveis-splitter som får olje fra filteret og sender det videre til tanken via en strupeventil på den ene siden og til radiatoren på den andre. Ved å lukke strupeventilen, øker motstanden i bypassen og mer av oljen strømmer til lagerhuset og øker trykket der. Ved å åpne strupingen, reduseres motstanden, helt til oljen strømmer uten motstand til tanken og trykket til lagerhuset forsvinner. For visuell tilbakemelding på at oljen renner gjennom bypassen er det montert en gjennomsiktig slange ved utløpet av strupeventilen.



**Figur 3.21: «Amarine» oljepumpe**



**Figur 3.22: Fra venstre: Treveis-kobling, strupeventil, oljetrykksviser, bypass-slange ned i tanken**

Under testfasen ble det funnet at pumpen likevel leverte for mye olje, som førte til stagnasjon. Selv med bypass-systemet helt åpent ble oljetrykket for høyt. I pumpen er det et innebygget termisk vern, som gjør at pumpen slår seg av automatisk når belastningen blir for høy. Resultatet var at pumpen enten leverte for høyt trykk eller ikke noe trykk. Dermed måtte pumpen byttes ut med en annen som var bedre dimensjonert.

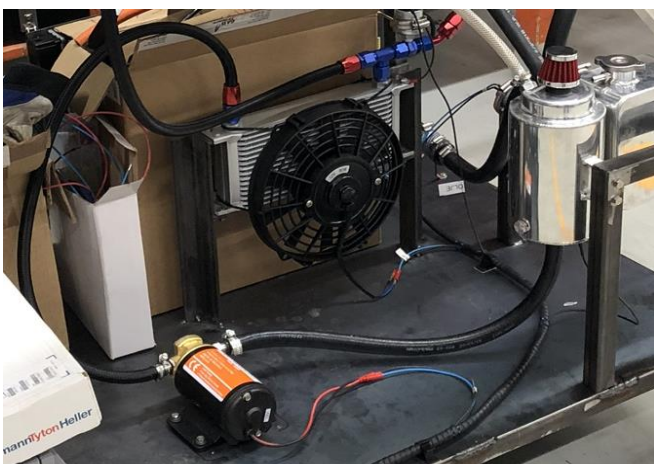
Etter grundige undersøkelser fant vi at en hydraulisk servopumpe ville være bedre egnet.

Denne typen tåler å gå på høyere trykk samtidig som de leverer lavere flow (Engine Basics 2019). De fleste servopumper er mekaniske som vil si man må ha en ekstern motor for å drive pumpen. For oss var det derimot mest gunstig å ha en servopumpe som ble drevet på 12V DC. Etter å ha vært i dialog med Maritim Bergen ble det anskaffet en Raymarine TYPE 1 servopumpe. Data fra produsenten oppgir kapasiteten til å være 50 bar stagnasjonstrykk og maksimal levering på 1,0 l/min (Raymarine 2019). 50 bar trykk er for høyt og ville definitivt føre til utblåsning i lagerhuset. Likevel er vår vurdering at bypass-systemet skal klare å håndtere en maksimal levering på 1,0 l/min, slik at det ikke ligger fare for stagnasjon og dermed utblåsning.

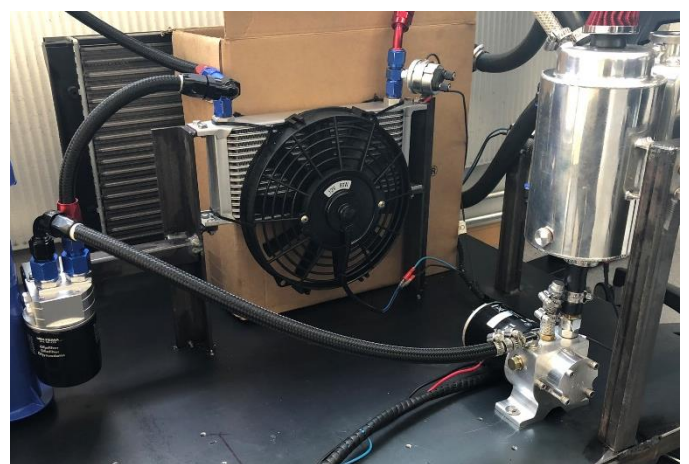
Ved test av den nye pumpen så vi at bypassen fungerte som tiltenkt og oljetrykket kunne reguleres mellom 0-5 bar uten at pumpen stanset.



**Figur 3.23 Raymarine Type 1, 12VDC**



**Figur 3.25: Olje system 1: Amarinepumpe**



**Figur 3.24: Olje system 2: Raymarine servopumpe**

---

### 3.4.5 Slanger og koblinger

Til å transportere oljen med opptil 5 bar trykk måtte riktige slanger anskaffes. Med vanlige gummislanger kunne man risikert lekkasjer. Derfor måtte det anskaffes stivere slanger og AN-slange ble valgt. AN-slanger består av gummislanger som er spunnet med stål rundt og trukket med nylon ytterst (KangaMotorsport 2019). Slangene vi anskaffet tåler trykk opptil 50 bar, og var beregnet for olje og drivstoff. For å montere AN-slange på en korrekt måte krevdes det egne koblinger. AN-koblinger er solide og lett anvendelige, som gjør oljesystemet enkelt å videreutvikle.



**Figur 3.26: AN-slange og AN-kobling**

For å sørge for tilstrekkelig flyt av olje er det brukt AN-8 slanger. Slangene har en indre diameter på 12.7 mm, som gir god flyt, samtidig som riktig trykk opprettholdes (QWT Bergen). Det er ønskelig å unngå knekk i slangene da det kan føre til strømningsstop og kavitasjon. Derfor ble det kjøpt inn koblinger med bender.



**Figur 3.27: AN-koblinger. Fra venstre: 90° bend, 45° bend, rettsvivel og sensoradapter**



---

Til å overvåke oljetrykket ble det montert en oljetrykksensor med tilhørende viser.

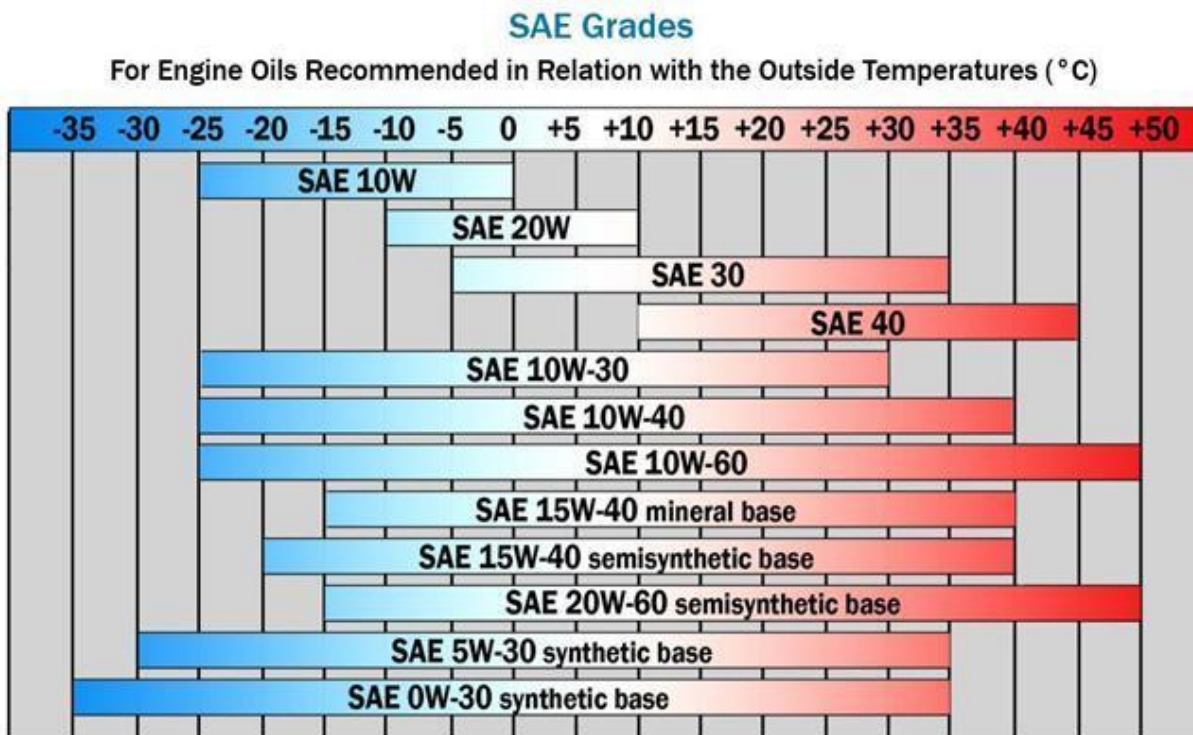


**Figur 3.28: Oljetrykksensor og viser for oljetrykk**

### 3.4.6 Valg av smøreolje

For at turboen skal fungere optimalt er det viktig å bruke riktig olje. Oljens egenskaper til smøring og avkjøling bestemmes av blant annet oljens viskositet og varmekapasitet. Når oljen varmer seg opp blir viskositeten lavere, og det reduserer oljens evne til å danne den nødvendige oljefilmen.

Ettersom gassturbinen kan nå svært høye temperaturer er det derfor viktig å benytte olje som beholder smøreegenskapene sine selv ved høye temperaturer. Samtidig kan man heller ikke ha for tykk olje (høy viskositet). Ved for tykk olje, vil den være seig og ha dårlige smøreegenskaper. Dette er spesielt farlig ved oppstart når turbinen er kald siden oljen da kan være for tykk til å legge seg mellom lageret og akslingen.



**Figur 3.29: Viskositetskart for forskjellige typer oljer**

Som nevnt tidligere stammer turboladeren i denne oppgaven fra dieselgeneratoren til en Oslo-klasse-fregatt. Dieselgeneratoren er produsert for å operere i et maskinrom der den atmosfæriske temperaturen varierte mellom 10-30 °C. MTU anbefaler å bruke olje med viskositetsgrad 40 (SEA-grade) (MTT- online 2019). Siden denne turbinen ikke skal stå i et maskinrom, vil den operere i et miljø med lavere atmosfæriske temperaturer. Basert på dette valgte vi en olje med større spenn i temperaturområde. Oljen som brukes i gassturbinen er en halv-syntetisk 10W-40 olje med temperaturspenn fra -25° C til +40° C. Den syntetiske oljen har bedre levetid enn den konvensjonelle, men med tanke på pris mente vi at halv-syntetisk er tilstrekkelig (Cars 2016).

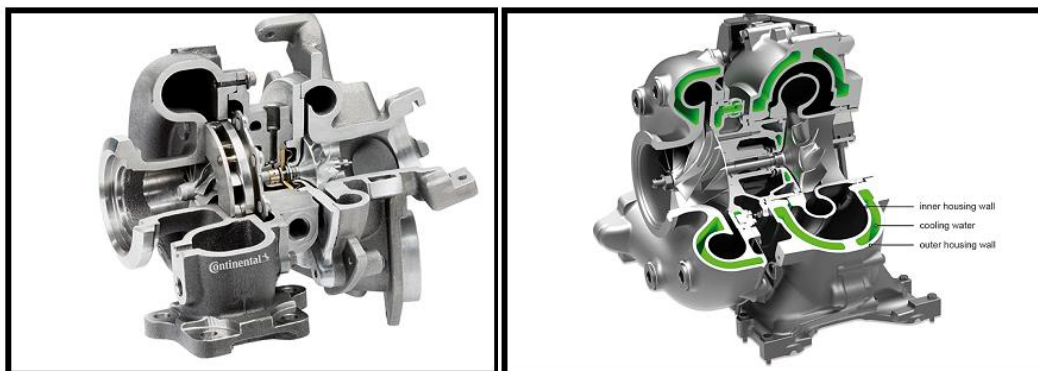
### 3.5 Kjølevannsystemet

Eksosen som ledes inn i turbinen holder svært høye temperaturer, opptil 868°C (Bergquist og Seth 2014, s. 48). Ved så høye temperaturer vil materialet til turbinbladene svekkes. Kombi- nert med store sentrifugalkrefter fra høyt turtall, er derfor turbinbladene særlig utsatt for mate- riellsvikt (Meier-Peter og Frank 2009, s. 234, Callister, Jr og Rethwisch 2015, s. 321). Derfor er det svært viktig med kjøling av turboladeren.

K27 Turboladeren som er brukt er vannavkjølt. Det vi si at det går kjølekanaler gjennom tur- binhuset. Disse kanalene transporterer kjølevann som leder varme vekk fra turbinhuset. Vi- dere må varmen ledes vekk fra kjølevannet for å opprettholde god varmeveksling med turbi- nen og unngå at væsken koker. Skulle væsken begynne å koke i turbinhuset, kan ekspansjon av dampen føre til store materielle skader. Kjølevannet får sin varme ledet vekk gjennom en varmeveksler. Til å sørge for sirkulasjonen av væsken bruker man en kjølevannspumpe.

For kjølevannssystem har vi stilt følgende krav:

- Turbinhuset må ikke lekke kjølevann
- Må sikre tilstrekkelig kjøling og unngå kjølevannstemperaturer over 90° C



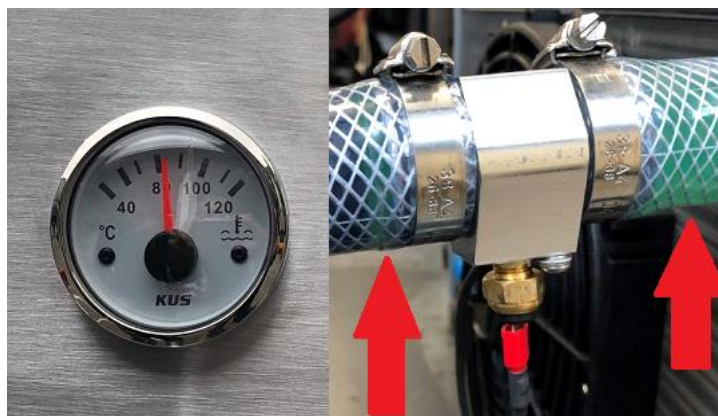
**Figur 3.30** Illustrasjonsbilde. Til venstre: Luftavkjølt turbolader. Til høyre: Vannavkjølt turbolader. De grønne områdene viser kjølekanalene. I vår turbola- der er det ikke vannkjøling i kompressorhuset, slik som vist i illustrasjonen.

## Varmeveksler

Turboladeren var opprinnelig påmontert på en MTU 8V 153. Denne motoren hadde en driftstemperatur på 87-95 °C (MTU Friedrichshafen GmbH 2002, A050 s. 1). Temperaturen holder til sammenligning tilsvarende nivåer som i en vanlig personbil. Til varmeveksling anskaffet vi derfor en luft-til-vann-radiator som var beregnet for en Volkswagen Golf Jetta. Dimensjonen på radiatoren er 52.5 cm x 32.2 cm x 3.4cm. Denne radiatoren er beregnet for et kjølesystem med total kapasitet på 9 liter. (Volkswagen Part 2005). Det ble anslått at vårt system ville være på rundt 6-7 liter. Til gjennomstrømning av luft er det montert en 12 tommer vifte med volumstrøm på 13.3 m<sup>3</sup>/min, som ble vurdert til å være tilstrekkelig. Viften ble montert slik at den sugde luft gjennom radiatoren. Dette gir bedre effekt om viften skulle blåse luft gjennom radiatoren. (CGJ 2013)

## Overvåkning

For å overvåke at vanntemperaturen ikke blir for høy er det montert en temperatursensor mellom utløpet av turbinen og innløpet til radiatoren. Det gjør det mulig å overvåke at temperaturen ut av turbinen, ikke overstiger den nominelle temperaturen på kjølevæsken som skulle være mellom 87-95°C. Sensoren er plassert imellom to gjennomsiktige slanger for visuell tilbakemelding.



**Figur 3.31: Til venstre: Instrumentklokke for å måle temperatur. Til høyre: Temperaturgiver (midten nederst), gjennomsiktige slanger for visuell tilbakemelding**

---

## Kjølevannspumpe

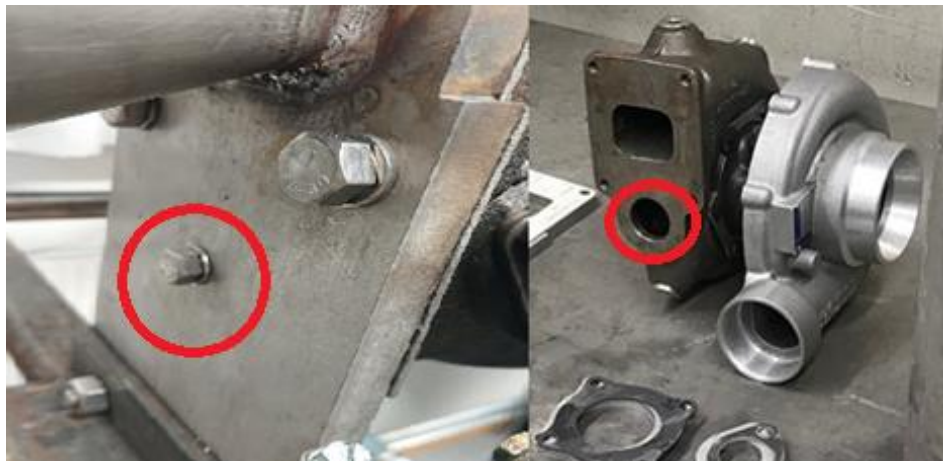
Kravene til kjølevannspumpen er at den skal tåle varmt vann (87-95 °C), gå på 12V DC og gå uten stans. En sirkulasjonspumpe ment for kupevarmer til bil er derfor anskaffet. Denne pumpen var beregnet til å sirkulere varm væske og passet derfor meget bra til vårt formål. Kapasiteten til pumpen er oppgitt til 8.8 l/min (Bosch, årstall ukjent).

## Tank

Når kjølevæsken blir varm vil den utvide seg. For å unngå at utvidelsen skal gjøre skade på systemet, er det anskaffet en kjølevæsketank som med ekspansjonslokk fra KSR. Lokket åpner seg når trykket i tanken når 1.3 bar. Dette er et sikkerhetstiltak som forhindrer at kjølevannssystemet blir skadet.

## Flenser

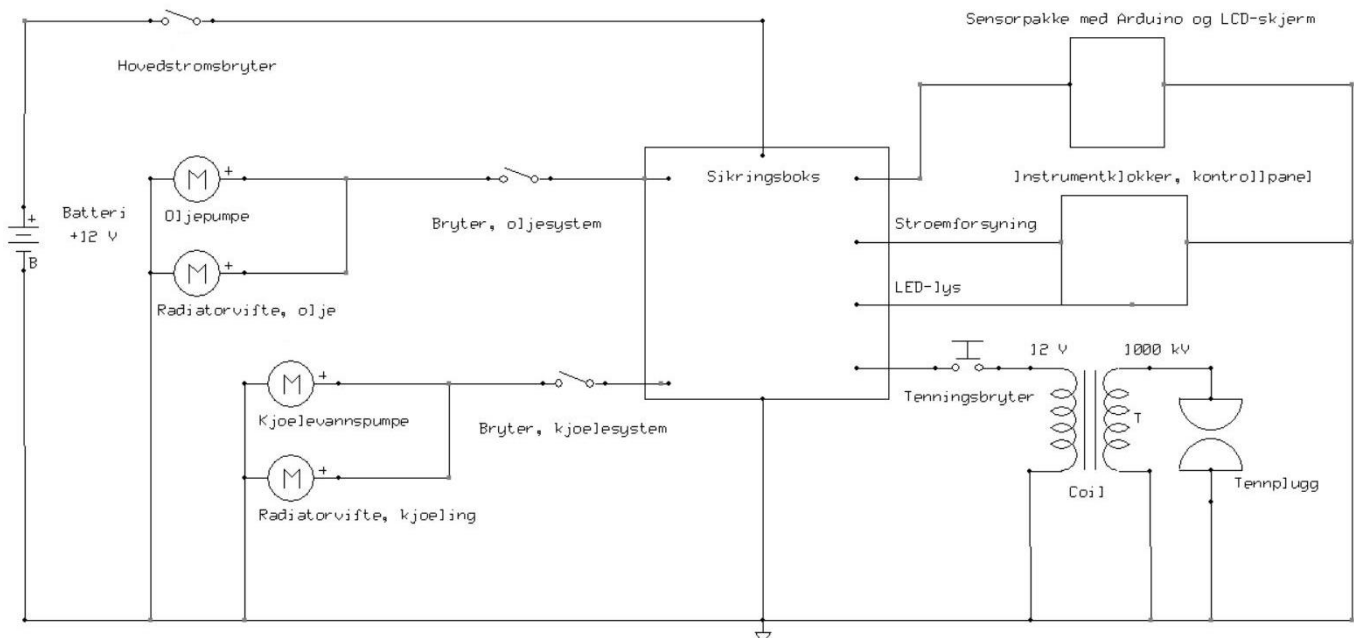
Turbinhuset er designet slik at den har en åpen kjølekanal rett under eksosinnløpet. For å forhindre lekkasje herfra, er det boret og gjenget et hull i under kjølekanalen. På den måten kan flensen til brennkammeret skrues inn i turbinhuset både over og under kjølekanel. Mellom flens og turbinhus er det satt inn en pakning. Tester har vist at denne pakningen holder tett, slik at kjølevæske ikke lekker fra turbinhuset.



**Figur 3.32: Til venstre: Flens og pakning satt sammen med turbin. Til høyre: Turboladeren. Under eksosinnløpet på turbinsiden kan man tydelig se kjølekanalen.**

## 3.6 Elektrisk anlegg

Til å drive hjelpesystemene kreves det et elektrisk anlegg. Det består av et 12V-båtbatteri som spenningskilde og sikringsboks med fordeling til kontrollpanel, tenning, sensorer, pumper og radiatorer. Koblingsskjemaer ligger vedlagt i «Brukermanual for gassturbin».



Figur 3.33: Forenklet skjematisk tegning av hovedstrømkretsen.

Under designfasen kom det frem at det elektriske anlegget måtte levere til følgende krav:

Krav til det elektriske anlegget:

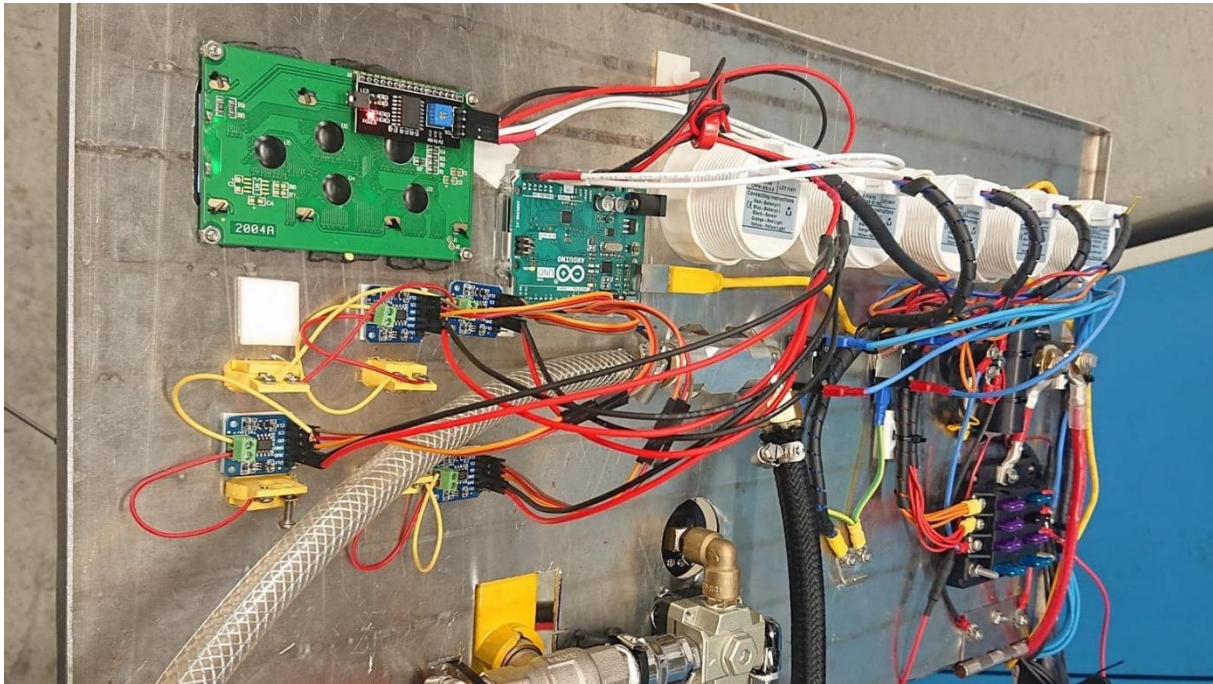
- Det må være sikkert
- Det må forsyne alle pumper og vifter
- Det må ha et tenningsystem for gassturbinen
- Det må forsyne sensorer og instrumenter

For å oppfylle kravet om sikkerhet, ble det besluttet å bruke en sikringsboks som hovedtavle. Utfra denne ble spenning fordelt ut til alle resterende kretser og dermed er det naturlig å starte her.

### 3.6.1 Sikringsboks

Sikringsboksen har plass til 6 flatstiftsikringer som enkelt kan byttes ut og settes til den styrken man trenger. Det ble anslått på bakgrunn av salgsinformasjon til relevante vifter og pumper at anlegget kom til å trekke rundt 15 A totalt. Sikringsboksen som ble valgt tåler opp til 32 V DC og 30 A per terminal som gjør den skikket til anlegget. I designfasen vurderte vi at 6

kretser skulle være nok til å drive de systemene nødvendige for vårt formål. Med tanke på fremtidige utvidelser har sikringsboksen også en minusskinne som gjør det mulig å koble til enda en boks av samme type for totalt 12 kretser.



**Figur 3.34: Det elektriske anlegget**

Når det gjelder ledninger er det brukt 1,5 mm<sup>2</sup> utfra sikringsboksen, med unntak av instrumentklokkene og Arduino-systemet der det er brukt mindre ledninger siden de trekker lite strøm. Antatt høyeste strøm på én enkelt leder var 10 A til kjølevannspumpen. I henhold til NEK-standarden, anså vi dermed 1,5 mm<sup>2</sup> som tilfredsstillende. I vurderingen ble det tatt med at ledningene var korte (den lengste ledningen er omtrent 1,5 m) og spenningen lav, slik at varmgangen og motstanden i lederne ville bli minimale. Samtidig var alle kretsene tilknyttet stiftesikringer. Fagkyndig elektropersonell ved UVB var enig i denne vurderingen.

Flatstiftesikringene som benyttes har en kapasitet mellom 3 og 30 A, slik at det ble mulig å velge sikringer som passet hver krets. Flatstiftesikringene slår ut momentant ved strømmen over sine verdier. Vi ønsket å bruke lavest mulig sikringer på hver krets, i den hensikt å beskytte anlegget. Måten vi gikk frem på var å teste forskjellige sikringer på hver krets. Vi startet med sikringer på 3 A og gikk gradvis opp helt til sikringene overlevde startstrømmen. På den måten ble alle kretser satt inn med sikringer med lavest mulig tillat strøm. Se «vedlegg F» for oppsett av sikringsboksen.

---

### 3.6.2 Smørolje- og kjølevannskretsen

Smøroljekretsen og kjølevannskretsen er i prinsippet koblet likt. Fra sikringsboksen går ledere til en bryter på kontrollpanelet. Etter bryteren går ledere parallelt til radiatorviften og pumpen, før den ender i jord. I bryteren er det også koblet til et LED-lys som lyser grønt når den er lagt inn. Dette har en praktisk verdi slik at man får en visuell bekreftelse på at kretsen er lagt inn, som kan være vanskelig å få med seg ettersom gassturbinen produserer mye støy.

I både smøroljekretsen og kjølevannskretsen er pumpene parallellkoblet med radiatorviftene. Dette er gjort for at de enkelt kan slås på med samme bryter. Tanken bak var at det ville være naturlig å kjøre radiatorviftene samtidig med pumpene under drift, og at det derfor ikke var nødvendig med egen bryter for viftene. Siden de er parallellkoblet vil det derfor gå høyere strøm, enn om viftene og pumpene hadde blitt kjørt på separate kretser. Et alternativ til dette er å seriekoble kretsene, men tester viste at det førte til for lav spenning og var ineffektivt.

### 3.6.3 Spenningskilde

Vi ønsket å benytte oss av batteri som spenningskilde. Dette er enklere, sikrere og mer mobilt enn å koble opp til 230 V stikkontakter. Som nevnt tidligere ble det anslått at anlegget kom til å trekke 15 A. Til valg av batteri måtte det dermed anskaffes et batteri med tilstrekkelig kapasitet. Vi vurderte dermed et batteri på 75 Ah som tilfredsstillende til prosjektets formål. Valget falt på kalsium/kalsium start-batteri. Det ville gi tentativt 5 timers drift. Av erfaring varer en lab-øvelse mellom 2-3 timer. Dermed mente vi 5 timer burde holde.

Fra batteriet brukes 16 mm<sup>2</sup> ledninger, som er standard for bilbatterier. Batteriet er koblet til sikringsboksen gjennom en hovedstrømsbryter og jordet i rammen.

### 3.6.4 Tenningsystem

I designfasen ble det initialt vurdert å gå for en tenner som benyttes på gassgriller. Dette ble vurdert som effektivt siden den kan gå utenom hovedstrømskretsen og er svært enkelt å koble opp. Etter nærmere undersøkelser ble det derimot fastsatt at en slik løsning er upraktisk, siden det er vanskelig å montere en slik tenner i brennkammeret og det var uvisst om den var robust nok til de krevende forholdene som er på innsiden av brennkammeret. Det ble dermed avgjort at det skulle brukes en vanlig tennplugg.

Under valget av tennplugg ble det lagt mest vekt på lengden på tennpluggen ettersom vanlige tennplugger tilfredsstiller oppgavens krav. Propandysen steg 11 mm inn i brennkammeret og



---

det var ønskelig at tennpluggen steg forbi dysen for å sørge for at gnisten kom i kontakt med propanen.

Til å generere høyspenning for tennpluggen brukes en coil. Coilen som er benyttet i oppgaven er kompakt og enkel å montere, samtidig som den leverer spenning opptil 1000 kV



**Figur 3.35: Tenningsystemet. Fra venstre: Tenningsbryter med LED-lys ved aktivering, coil (svart sylinder) og baksiden av bryter, tennplugg og gassinnføring**

Resterende av det elektriske anlegget består av de to kretsene som går til instrumentklokkene samt kretsen til Arduino-systemet. Disse er dekket i kapittel 3.7.

### 3.7 Styre- og overvåkningssystem

Ethvert fungerende maskineri må ha et styre- og overvåkningssystem for å kunne drives trygt og effektivt. Vitale tilstander som trykk, temperatur og turtall må overvåkes for å unngå motorhavari. Pådrag og hjelpesystemer må styres for å optimalisere ytelsen. Datainnhenting og logging er også viktig for å se hvordan ytelsen påvirkes over tid eller til beregninger av effekt og forbruk.

Styre- og overvåkningssystemet til gassturbinen består av trykk- og temperatursensorer samt kontrollpanelet med instrumentklokker, brytere, reguleringsventiler og Arduino-plattform.

Kravene til styre- og overvåkningssystemet:

- Må være i stand til å regulere driften av gassturbinen
- Må overvåke hjelpesystemene til gassturbinen
- Bør overvåke relevante ytelser som temperatur, trykk, turtall, massestrøm
- Bør være brukervennlig

- Bør å ha mulighet for logging av data til bruk ved undervisningsformål som f.eks. lab øvelser
- Bør ha mulighet for å kobles til PC for øyeblikks-avlesning av informasjon

### 3.7.1 Kontrollpanelet

Kontrollpanelet er bindeleddet mellom mennesket som styrer og maskinen som arbeider, altså vår HMI. Fra kontrollpanelet overvåkes og styres alle gassturbinens funksjoner. Et mål med prosjektet var å gjøre operasjonen av gassturbinen brukervennlig. Spesielt med tanke på undervisningsformål og muligheten for å kunne driftes av kadetter. Undersøkelser av lignende prosjekter viste at kontroll- og styringssystemet ofte fremstår vilkårlig, og dermed vanskelig å forstå. Basert på dette prioriterte vi derfor å gjøre kontrollpanelet så intuitivt som mulig. For å oppnå dette, ble kontrollpanelet designet med analoge klokker som er enkle å lese. Brytere og reguleringsventiler er satt slik at de hører til sine respektive klokker, f.eks. ved at oljetrykksregulatoren står rett under oljetrykksviseren.



**Figur 3.36: Kontrollpanelet**

Kontrollpanelet er laget i børstet aluminium som er et materiale som veier lite og enkelt å jobbe med. Kantene er brettet for å øke stivheten til panelet. Det er montert hengsler slik at panelet kan legges ned og gir enkel tilgang til det elektriske anlegget. Dette er brukervennlig og gir gode muligheter for å videreutvikles eller studeres i undervisningsformål.

### 3.7.2 Overvåking av hjelpesystemer

På kontrollpanelet sitter instrumentklokker som overvåker batteriets spenning, timeteller for maskinen, temperatur for kjølevann og smøreolje samt trykk til oljen. Alle klokkene er hylle-  
vare kjøpt på Maritim Laksevåg.



**Figur 3.37: Beskrivelse av instrumentklokkene og brytere**

For å unngå at batteriet skulle gå tomt under drift, vurderte vi det som nødvendig å montere en spenningsmåler på kontrollpanelet. På den måten kan man verifisere spenningen før oppstart og være sikker på at spenningen holder gjennom planlagt operasjon. Siden spenningsforskjellene varierer på desimalen vurderte vi det som mer gunstig å benytte en digital klokke. Timetelleren har som funksjon å logge antall driftstimer i den hensikt å kunne vurdere vedlikeholdsbehovet. For å unngå motorhavari brukes termurmålere til å overvåke kjølevanns-

---

og smøreoljetemperaturen. Oljetrykksmåleren overvåker trykket inn til lagerhuset i turboladeren. Ved gassreguleringsventilen er det montert et manometer som viser trykket inn til brennkammer. Dette brukes for å vise pådraget av gass til brennkammeret, og dermed pådraget til turbinen.

Til måling av smøreolje- og kjølevannstemperatur benyttes en Kus vanntemperaturgiver. Denne kan brukes til både olje og vann og måler temperaturer opp til 150 °C. For målingen av oljetrykket benyttes en Kus/Wema oljetrykkgiver. Denne måler mellom 0-5 bar, og som er innenfor driftstrykket på 1,5 – 3,0 bar.



**Figur 3.38: Til venstre: Kus temperaturgiver. Til høyre: Kus/Wema trykkgiver.**

### 3.7.3 Styring

Til å drive pådraget på gassturbinen, er det montert en reduksjonsventil på kontrollpanelet. Denne er koblet direkte på gasslangen. Ved behov for hurtig nedstengning, er det også montert en kuleventil som stenger gasstilførsel direkte. Kuleventilen er også sikret med en lås som krever nøkkel for å åpnes, i den hensikt å hindre uvedkommende å starte opp gassturbinen. Videre er det brytere for styring av smøreolje- og kjølevannsystemene. Disse er kun av/på, ettersom vi ikke ser behovet for å operere systemene på noe annet enn fullt pådrag. Tenningsbryteren er en enkel push-bryter for tennpluggen. Denne lyser ved aktivering for å verifisere at den går. Oljetrykket styres ved en strupeventil som reduserer eller øker oljeflyten gjennom bypass-slangen. Til sist er hovedstrømsbryteren som legger inn spenning til det elektriske anlegget fra batteriet.

---

### 3.7.4 Overvåkning av gassturbinen

Som beskrevet i kapittel 1.3 ønsket vi en stor sensorpakke til gassturbinen slik at den kan benyttes i undervisning. Undersøkelser viste derimot at sensorer som passet til oppgaven vår var vanskelig å oppdrive. Sensorer for turtallmåling var veldig kostbare, svært vanskelig å montere eller ikke i stand til å måle våre estimerte turtall (se kapittel 2.6). Trykkmålere viste seg å ikke tåle temperaturene som var estimert (se kapittel 2.2). Volumstrømssmålere var svært dyre og krevende å montere. Vi besluttet derfor å ikke bruke ressurser på anskaffelse av sensorer som ikke passet til formålet. Temperaturmålere er derimot anskaffet.

Til overvåkingen av gassturbinen brukes en Arduino-plattform. Arduino er en åpen-kilde plattform basert på brukervennlighet (Arduino 2019). Den omsetter elektriske signaler fra sensorer til programmerbare verdier. I vårt tilfelle får den signaler fra K-type termoelement temperaturmålere. Strømsignalene generert i termoelementene blir omsatt via Arduino-plattformen til lesbare temperaturverdier. Disse vises i en LCD-skjerm på kontrollpanelet.

For å montere temperatursensorene, boret vi opp skruer slik at sensorene kunne tres igjennom. På eksospotten (T04) og i røret fra kompressoren til ytterkappen (T02), ble det boret hull og sveiset på mutter. Temperatursensorene kunne dermed skrues ned i de påsveisete mutterne. Planen var opprinnelig også å måle T03 i trakten mellom brennkammer og turbin. Men vi ble frarådet å sveise i trakten fra fagkyndig personell på UVB. Risikoen for vridninger i materialet fra sveising kunne føre til at det måtte produseres på nytt. Da monteringen av målesondene var noe av de sist som ble gjort, hadde vi ikke tid til å eventuelt produsere en ny ytterkappe. Vår vurdering var derfor å ikke ta risikoen så sent i prosjektet, og målepunktet i T03 ble dermed ikke montert. T01 måles fra kontrollpanelet.

Sensorene har et temperaturspenn på  $-50\text{ °C}$  til  $1200\text{ °C}$ . Antatt høyeste temperatur i T03 på maksimalt  $1100\text{ °C}$  (Bergquist og Seth 2014, s. 48).

---

Arduino-plattformen var viktig for å oppnå målet om å benytte gassturbinen til undervisning. Ved å måle de respektive temperaturene i Brayton-syklusen er det mulig å gjennomføre lab-øvelser for test av ytelse. I tillegg har Arduino-plattformen store muligheter til videreutvikling, da den kan programmeres til å gjøre det aller meste (Open Electronics 2014).



**Figur 3.39** Til venstre: Arduino-plattformen omsetter signalene fra temperaturgiverne og viser de som tallverdier på LCD-skjermen. I midten: Temperatursensor nedfelt i eksospotten. Til høyre: Arduino-plattformen (i midten av bildet)

---

## 4. Testing og resultat

Testfasen ble gjennomført når hele systemet var satt sammen. Likevel ble løpende tester gjort underveis i utarbeidelsen av de enkelte delsystemene. Utarbeidelsene av testene ble gjort med tanke på hvilke tilgjengelige måleutstyr som var til rådighet, samt hvilke parametere vi mente var viktig å få testet. Testfasen er nøyere beskrevet i «vedlegg D».



**Figur 4.1: Kadett Panfilovs og Finden under oppstart av gassturbin for første gang**

Observasjoner som ble gjort var at gassturbinen var enkel å få start på. Tenningsystem fungerte som planlagt. Det var ikke nødvendig å spole opp kompressoren mer enn 10-15 sekunder etter tenning før gassturbinen var selvgående. Gassturbinen var også svært responsiv og reagerte umiddelbart til endringer i pådraget. Videre ble det observert at gassturbinen klarte å være selvgående på så lite som 0,2 bar pådrag.

Oljetrykksregulatoren fungerte også planlagt. Oljetrykket falt noe etter oppstart, sannsynligvis på grunn av turtall og temperatur. Men oljetrykket lot seg fint justere opp ved hjelp av bypass-reguleringen. Temperaturene til oljen og kjølevannet holdt seg også stabilt lave, rundt 55-60 °C etter 13 minutter.

Temperatursensorene til Arduino-systemet fungerte ikke som tiltenkt. De klarte å måle lufttemperatur, men klarte ikke å måle temperaturen når de var plassert i målepunktene på gassturbinen. Med vannbadet greide propantanken å opprettholde gasstrykket til minimum 3,5 bar

---

gjennom hele testfasen. Etter å ha kjørt i ca. 19 minutter, begynte oljetrykket å falle. Oljeflyten var derimot god, men på grunn av at oljetrykket lå på under 1,0 bar, ble det bestemt å avslutte testfasen. Oljetemperaturen var da målt til 60°C.



---

## Testresultatene:

Forbruk propan og termisk effekt:

Tid i drift	Pådrag	Endring i vekt	Massestrøm propan	Termisk-Effekt <sup>2</sup>
6 min	2 bar	1,0 kg	2,778 g/s	128,1 kW
13 min	Mellom 0,2 og 3,5 bar	1,5 kg	1,923 g/s	88,65 kW

Temperaturer T01, T02, T03 (utside), T04 på varierende pådrag:

Tid	Pådrag	T01	T02	T03	T04
6 min	2 bar	21,5 °C	103 °C	264 °C (utside)	350 °C
2 min	2,5 bar	20,0 °C	131 °C	305 °C (utside)	370 °C

Smøreolje- og kjølevannstemperatur ved kjøring over lengre tid:

Tid	Pådrag	Temperatur, smøreolje	Temperatur, kjølevann
0 min	0 bar	21,5 °C	21,5 °C
6 min	2 bar	56 °C	63 °C
13 min	0,2 – 3,5 bar	60 °C	62 °C

---

<sup>2</sup> Her er det brukt en brennverdi på 46,1 MJ/kg (Gasnor 2019)

---

Spenningsfall over batteri ved drift over tid:

<b>Tid</b>	<b>Spenning</b>
Start	12,8 V
6 minutter	12,5 V
19 minutter	12,4 V

Strøm for hele systemet:

<b>Oppstart</b>	<b>Drift</b>
Minimum 24 A	17,1 A

P-v og T-s diagram:

Det ble også utarbeidet p-v og T-s diagrammer basert på testdataene. Disse ligger i «Vedlegg J» «P-v og T-s diagram». De tar utgangspunkt i en rekke antagelser grunnet manglende måleutstyr, og tilegnes derfor ikke nok vekt til å diskuteres videre i oppgaven.

---

## 5. Drøfting av resultat og måloppnåelse

Resultatet drøftes opp mot de 4 målsetningene fra kapittel 1.2.

### 9.1 Funksjonalitet

I løpet av testfasen kunne vi fastslå at gassturbinen er funksjonell. Den starter enkelt og er selvgående. Den krever også mindre oppspoling enn forventet, basert på observasjoner av gassturbinene til HVL og NTNU. Gasspådraget fungerer og turbinen er svært responsiv til endringer i pådraget. Kjøle- og smøresystemene er også funksjonelt, men med forbehold.

Ved test av kjøring over lengre tid (19 minutter), falt oljetrykket betraktelig. Siden flyten fortsatt var meget høy, kunne vi fastslå at pumpen ikke var problemet. Våre undersøkelser viste at oljen sannsynligvis hadde for lav viskositet. Dermed ble den for tyntflytende ved høyere temperaturer som førte til at strømningsmotstand gikk ned slik at også oljetrykket gikk ned. Dette kunne eventuelt ført til at den nødvendige oljefilmen ikke ble bygd opp, som ville ført til høy friksjon mellom lager og aksling. Oppgavens tidsbegrensinger førte til at vi ikke kunne gjennomføre tester av oljer med forskjellig viskositet. Vi anbefaler at videre undersøkelser av forskjellige typer olje gjennomføres for å bekrefte dette.

Vi observerte også at spenningen falt raskere enn forventet. Driftsstrømmen ble målt til 17,1 A som var høyere enn våre forventete 15 A. Allikevel falt spenningen mye raskere enn det som kan skyldes den høyere strømmen alene. Det er dermed stor tvil om at batteriet vil holde i våre planlagte 5 timer. Dette må studeres nærmere.

Likevel anser vi testene av funksjonaliteten som en suksess, ettersom gassturbinen tilfredsstiller krav 1.a, 1.c, 1.d og 1.e beskrevet i kapittel 1.3. Batteriet og oljen er komponenter som er enkelt å erstatte og skal dermed ikke være en begrensning for videre arbeid.

Vi anser måloppnåelsen for mål 1 som høy, men ikke fullkommen.

---

## 9.2 Sikkerhet

For å tilfredsstille kravet om sikkerhet er det gjort flere tiltak for å redusere risikoelementer. Vi vurderer de alvorligste farene til å være brann, elektriske støt og splintfare ved en eventuell eksplosjon (se «vedlegg E» for risikovurderings-skjema). Dette er hensyntatt gjennom fysiske tiltak og prosedyrer som reduserer risikoen for uønskede hendelser.

Brann kan oppstå dersom en gasslange løsner eller ved lekkasjer fra smøreoljen. I så fall er det viktig å kunne stenge ned gasstilførselen hurtig. Derfor er det påmontert en kuleventil for gassen i tillegg til pådraget. Kuleventilen er også utstyrt med nøkkel, som låser ventilen i lukket posisjon. Dette er et tiltak for å redusere faren for at personell uten opplæring skal kunne starte gassturbinen. I tillegg er det en lukkeventil på gassflasken for å stenge ned gasstilførselen til hele systemet.

I tilfelle brann er det påmontert et ABC-brannslukkingsapparat på gassturbinen beregnet til bruk på gassbranner (Trygg og sikker 2019). Denne skal alltid være lett tilgjengelig når gassturbinen er i drift.

For å redusere risikoen for uønskede hendelser ved oppstart og drift av gassturbinen er det laget en grundig oppstartsprosedyre, se eget vedleggshefte «Brukermanual for gassturbinen». Denne er alltid påhengt gassturbinen slikt at den er lett tilgjengelig. Brukermanualen beskriver hvordan brukeren skal starte opp, drifte og stenge ned gassturbinen på en sikker måte.

Som følge av begrensede ressurser og tidsbegrensinger valgte vi å prioritere det vi anser å være de viktigste sikkerhetstiltakene. Til videre utvikling av gassturbinen anbefaler vi å vurdere å følgende tiltak: beskyttelse foran kompressoren for å unngå klemskader, isolasjon av brennkammer og turbin for å unngå brannskader og turtallsmåler for å unngå å kjøre turboladeren over maksimal verdi.

Basert på gjennomførte tester og installerte sikkerhetstiltak vurderer vi sikkerheten som ivaretatt på en god måte og anser derfor måloppnåelsen som høy.

---

### 9.3 Undervisningsformål

Et mål med oppgaven er å ha en stor sensorpakke med muligheter for logging av data. Som følge av tidsbegrensinger og vanskeligheter med riktig anskaffelser, ble færre sensorer enn ønsket anskaffet.

Likevel er det anskaffet sensorer for temperaturmålinger og det er montert muligheter for temperaturmålinger av T01, T02 og T04. Det ble ikke montert målepunkt til T03 ettersom det ikke fantes tid til å sørge for sikker montering.

Til temperaturmålingene er det montert en Arduino-plattform. Plattformen har i teorien mulighet til å brukes som en PLS og kobles mot PC for loggføring av data. Arduino-plattformen er koblet til temperatursensorene og kan vise disse en LCD-skjerm som vist på Figur 3.39. Som følge av jordingsproblematikk vises ikke T02 og T04 når de er i kontakt med godset. Vi antar at dette kan løses ved å isolere sensorene.

Kontrollpanelet er oversiktlig og innehar alle de grunnleggende funksjonene som kreves for å kjøre gassturbinen.

Basert på dette anser vi måloppnåelsen som delvis. Grunnlaget er lagt, og det er lite som skal til før systemet er fullkomment.

---

## 9.4 Muligheter for videreutvikling

I tillegg til at gassturbinen skal komme til nytte i undervisningen, er det målsatt at den kan brukes i fremtidige bacheloroppgaver. Vår ambisjon er å tilrettelegge for videre utvikling ved å designe konstruksjonen enkel og åpen.

Selve rammen er designet for å tåle flere oppgraderinger. Ved å velge stål kan det enkelt kuttes, sveises, borres og gjenges i rammen for utvidelser og tilpasninger. Rammen er også robust og har plass til utvidelser. I tillegg er gassturbinen kompakt og mobil slik at den er enkel å transportere. Gassturbinen er dimensjonert slikt at den er tilpasset dører og åpninger på Sjøkrigsskolen.

Selve gassturbinen og hjelpesystemene kan enkelt demonteres og monteres. Dette gjør det enkelt å gjøre endringer som å modifisere flammerøret eller gjennomføre tester med forskjellige kjølesystemer. Plattformen er romslig og åpen slik at det er tilrettelagt for å undersøke de forskjellige komponentene.

Når det gjelder mål fire fungerer bacheloroppgaven som et supplement til gassturbinen ved at fremgangsmåte, litteratur, delelister og brukermanual er tilgjengelig for alt personell ved Sjøkrigsskolen. Alle komponentene fra delelisten er merket med referansenummer (se vedleggshefte «Brukermanual for gassturbin») slik at disse kan anskaffes eller studeres nærmere. Videre er kapittel 7 dedikert til forslag for videre arbeid slik at kadetter kan finne inspirasjon til å videreutvikle gassturbinen. Dette, i tillegg til designet av gassturbinen legger grunnlaget for at fremtidige kadetter kan skape innovasjoner, utføre videre forskning og videreutvikle gassturbinen.

Basert på dette anser vi måloppnåelsen som høy.

---

## 6. Konklusjon

Oppgaven har et stort omfang og involverer både teoretisk og praktisk arbeid. Prosessen fra tegnebrettet til oppstart av ferdig konstruert gassturbin har vært spennende og lærerik. Vi har tilegnet ny kompetanse innen gassturbinteori og testet våre praktiske ferdigheter. I henhold til oppgavens avgrensinger har vi holdt oss til våre konkrete målsetninger.

Oppgavens første mål er å produsere en funksjonell gassturbin. Dette har vi lyktes med etter som gassturbinen er selvgående og enkel å starte. Vi konkluderer dermed med at dette målet er oppnådd.

Oppgavens andre mål er at gassturbinen skal være sikker å operere. Her har det blitt gjort fysiske tiltak i tillegg at prosedyrer for sikker bruk er skrevet. Dermed konkluderer vi med at også dette målet er oppnådd.

Oppgavens tredje mål er å konstruere gassturbinen slik at den kan brukes i undervisningssammenheng. Gitt tidsbegrensingene til oppgaven anså vi det som lite hensiktsmessig å prioritere den ambisiøse sensorpakken som vi ønsket på gassturbinen. Likevel er det montert målepunkter som fungerer med eksterne instrumenter, og Arduino-plattformen kan kobles til digitale systemer som gjør det mulig å loggføre resultatene fra sensorene. Videre mener vi basert på våre erfaringer som maskinkadetter at gassturbinens fysiske konstruksjon tilbyr et interessant supplement til den teoretiske undervisningen på Sjøkrigsskolen. Vi konkluderer dermed med at målet er delvis oppnådd.

Oppgavens fjerde mål er at gassturbinen skal være mulig å videreutvikle. Gassturbinen er romslig, solid og består av enkle komponenter. Det medfølger bruker- og vedlikeholdsmanual slik at gassturbinen enkelt kan overtas av fremtidige kadetter. I tillegg følger en liste med konkrete forslag til videre arbeid. Vi konkluderer med dette at målet er nådd og håper å se gassturbinen i nye bacheloroppgaver i fremtiden.

---

## 7. Forslag til forbedringer og videre arbeid

Listen er skrevet i prioritert rekkefølge basert på våre anbefalinger.

### 1. Turtallsmåling

Måling av turtall er svært viktig både for sikkerhet og til undervisning. Derfor anser vi det som øverst prioritet. Mot slutten av semesteret kom vi over en mulig løsning som ikke er alt for dyr. Garrett er en annen turboleverandør som har en utstyrspakke som i tillegg til å måle turtall svært nøyaktig, også kan kobles til PC for logging av data. Med noen modifikasjoner på kompressorhuset skal det være mulig å montere et slikt sett, eller eventuelt et annet.

Eksempel på utstyrspakke:

Produsent: Garrett

Del-nummer: 781328-0001

### 2. Test av oljer med forskjellige egenskaper

Under testfasen ble dette oppdaget at olje ble svært tyntflytende ved høyere temperaturer. Da gikk trykket på oljesystemet drastisk ned, men det var fortsatt gjennomstrømming. For å unngå for tynn olje, anbefaler vi å bytte olje til en mer viskøs olje. Å bytte olje er ikke særlig krevende i forhold til hvilke konsekvenser det kan føre til å ikke bytte oljen. Derfor anbefaler vi å bytte til en mer egnet olje som andre prioritering.

### 3. Utbedring av sensorpakke

Måling av temperatur og trykk er viktig for å kunne analysere gassturbinen. Dermed anbefaler vi å montere trykkmåling i P2 og P3 og festepunkt for måling av temperatur i T03. I tillegg anbefaler vi å anskaffe trykkmålere til p1, p2, og p3 som tåler temperaturene i disse punktene. Samt utbedre jordingsfeilen hos Arduino-pakken for måling av T02, T03 og T04.

Dette er nesten helt klargjort, og burde ikke være særlig tidkrevende å få til.



---

#### **4. Montering av kraftturbin**

Under prøvekjøringen og testfasen noterte vi oss at gassturbinen hadde en markant skyvekraft. For å utnytte denne skyvekraften er en kraftturbin et alternativ. En slik turbin kan brukes til å måle levert effekt og ville være et godt tilskudd til videre arbeid med f.eks. optimalisering.

#### **5. Optimalisering av brennkammer**

Det finnes mange metoder å konstruere et brennkammer på. Ved installasjon av en større sensorpakke og en kraftturbin kan man gjøre mange termodynamiske beregninger. Det kan man bruke til å kartlegge ytelser til forskjellige typer brennkammer og hvordan optimalisere disse. Dette anser vi som en spennende oppgave, men krever videre arbeid av gassturbinen for å være gjennomførbart.

#### **6. Varmeveksler mellom propantank og kjølevann**

Som nevnt under kapittel 3.3. vurderte vi muligheter for å benytte kjølevannet til oppvarming av propantanken. Dette anbefaler vi å undersøke videre.

#### **7. Startmotor**

For å starte gassturbinen slik som den er per 29. mai 2019, trenges det hjelp fra en ekstern vifte. Vi vurderte to mulige løsninger for å starte gassturbinen uten å bruke en ekstern vifte. Den første muligheten vi undersøkte var ved å bruke en slipemaskin som går på luft. Disse maskinene kan nå et turtall på 25 000 rpm.

Den andre løsningen var å montere en el-motor. Ideen var å montere en aksling mellom motoren og kompressorhjulet for å overføre kraften. På markedet finnes det RC-motorer som har turtall helt opp til 100 000 rpm. Disse motorene er ikke så store så de trenger ikke mye plass for å monteres.

Et eksempel på en slik motor er *CASTLE 1406*.

Produkt nr: 060-0058-00

---

## Referanseliste

### Litteratur

**Callister, Jr, William D. og David G. Rethwisch**

2015. *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-118-31922-2

**Bergquist, Espen og Magnus Seth**

2014. *Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin*. Høyskolen i Bergen.

**Hansheinrich Meier-Peter & Bernhardt Frank**

2009. *Compendium Marine Engineering*. Hanmburg: Seehafen Verlag 2009 ISBN: 978-3-87743-822-0

**Hartvigsen, Hartvig, Rolf Lorentsen, Knut Michelsen, Sverre Seljevoll**

2012. *Verkstedhåndboka Norge*: Gyldendal forlag. ISBN:13 978-82-0535707-5

**Leknes, Erik, Mats Myklebust, og Øystein Ellingsen**

2013. *Prosjektering og videreutvikling av gassturbin*. Høyskolen i Bergen

**Lund, Ansgar**

2012. *Termodynamikk og strømningslære*. Norge: Fagbokforlaget. ISBN:82-7674-551-2

**MTU Friedrichshafen GmbH**

2002. *GmbH :Techical Publication Series 183 Engines* .Tyskland MTU Friedrichshafen GmbH

**Rolls-Royce**

2005. *The Jet Engine*. England Rolls-Royce. ISBN: 0-902121-2-35

**Saravanamuttoo, Herb, Paul Straznicky, Henry Cohen og Gordon Rogers**

2009. *Gas Turbine Theory*. England:Pearson Education Limited. ISBN: 978-0-13-222437-6

---

# Nettsider

## **AGA**

2010. Propan guide. Hentet 18.05.2019

[https://www.aga.no/no/images/AGA%20Propan%20Safety%20brochure%20100x210%20NO\\_tcm639-142238.pdf](https://www.aga.no/no/images/AGA%20Propan%20Safety%20brochure%20100x210%20NO_tcm639-142238.pdf)

## **Ahlsell**

2019. Monteringspasta Chesterton 785. Hentet 22.05.2019

<https://www.ahlsell.no/33/forbruksmateriell/kjemisk-teknisk-og-hygiene/oljer---fett---skjareveske/smorefett/10093846/>

## **Arduino**

2019. What is Arduino? Hentet 22.05.2019 fra

<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

## **Astrup (a)**

2019. Egenskaper og anvendelsesområder for rustfrie stålkvaliteter. Hentet 21.052019 fra

<https://astrup.no/content/download/4804/16993/version/1/file/Egenskaper+og+anvendelsesomr%C3%A5der+for+rustfrie+st%C3%A5lkvaliteter.pdf>

## **Astrup (b)**

2019. *Materialkategorier og egenskaper*. Hentet 18.05.2019 fra

<https://astrup.no/Materialer-Produkter/Materialer/Rustbestandig-staal/Rustbestandige-sveise-sede-roer>

## **Basic Mechanical Engineering**

2016. Gas Turbine Power Plant With Regeneration, Reheating and Intercooling. Hentet 21.05.2019 fra

<https://basicmechanicalengineering.com/gas-turbine-power-plant-with-regeneration-reheat-intercooling/>

---

## **Cars**

2016. Does My Car Need Synthetic Oil. Hentet 18.05.2019 fra

<https://www.cars.com/articles/does-my-car-need-synthetic-oil-1420684417536/>

## **CGJ**

2013. Why you need a radiator fan an how to choose right one. Hentet 22.05.2019 fra

<https://www.cgj.com/2013/09/06/why-you-need-a-radiator-fan-and-how-to-choose-the-right-one/>

## **Engine Basics 2019**

2019. Power Steering Pump hente 20.05.19 fra

<http://www.enginebasics.com/Engine%20Basics%20Root%20Folder/Power%20Steering.html>

## **Furze Collin**

2013. How to build a TURBOJET ENGINE -The Maths. Hentet 21.05.2019 fra

[https://www.youtube.com/watch?v=6GywwbhqR\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=6GywwbhqR_o)

## **Gasnor**

2019. Typiske data. Hentet 19.05.2019 fra

<https://gasnor.no/naturgass/typiske-data-energi/>

## **Håheim, Fredrik, Mir Imran og Sven Greger.**

2014. Ingeniør Lages gassturbin hentet 18.05.2019 fra

[https://fagarkivet-hioa.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12199/913/Haheim\\_Fredrik.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://fagarkivet-hioa.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12199/913/Haheim_Fredrik.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

## **KangaMotorsport**

2018. AN hoses and fitting guide. Hentet 21.05.2019 fra

[www.kangamotorsports.com/blog/2018/an-hoses-fittings-guide](http://www.kangamotorsports.com/blog/2018/an-hoses-fittings-guide)

---

## **Learn Thermo**

2018. Deviations from the Ideal AS Brayton Cycle. Hentet 25.05.2019 fra

<https://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch09/lesson-E/pg13.php>

## **Lundgaard, Johannes**

2016. Jet car story Discovery channel. Hentet 19.05.2019 fra.

<https://www.youtube.com/watch?v=3iLFphjSLOg>

## **MTU Online**

2016. Fluids and Lubricants Specifications. Hentet 21.05.2019 fra

[https://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/fluids\\_and\\_lubricants\\_specifications/2018/A001061/A001061\\_37E.pdf](https://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/fluids_and_lubricants_specifications/2018/A001061/A001061_37E.pdf)

## **Nautipedia**

2017. MTU 8V/12V.183 TE 52/62/72/92/93 hentet 21.05.2019 fra

[https://www.nautipedia.it/index.php/MTU\\_8v/12v.183\\_TE\\_52/62/72/92/93\\_\(BASIS:MER-CEDEC-BENZ\\_OM\\_400\)](https://www.nautipedia.it/index.php/MTU_8v/12v.183_TE_52/62/72/92/93_(BASIS:MER-CEDEC-BENZ_OM_400))

## **NEK**

2019. Beregning av vern og kabelverrsnitt14. Hentet 21.05.2019 fra

[https://efbr.nelfo.no/UploadFiles/Books/311/53/634182538123171250\\_kapelenergi.pdf](https://efbr.nelfo.no/UploadFiles/Books/311/53/634182538123171250_kapelenergi.pdf)

## **Nuclearprojects**

2004. <https://nuclearprojects.com/jetspecs/>

(02.02.2019)

## **Open electronics**

2014. Arduino as a programmable logic controller (PLC). Hentet 21.05.2019 fra

<https://www.open-electronics.org/arduino-as-a-programmable-logic-controller-plc/>

## **Raymarine**

2013. Hydraulic Pump Installation Guide. Hentet 21.05.19

<https://raymarine.app.box.com/s/rvhycb6x1brzo64921k5tsqwv2ica3j6/file/15857083519>

---

## **Rosvold, Knut A**

2018. Diffusor hentet 20.05.2019

<https://snl.no/diffusor>

## **Science Direct**

2019. Impeller Tip Speed. Hentet 24.05.2019 fra

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/impeller-tip-speed>

## **Smartdraw**

<https://www.smartdraw.com/> (21.05.2019)

## **Synlube**

2014. All about oil filters. Hentet 20.05.2019

<http://www.synlube.com/oilfilters.htm>

## **Tech Ingredients**

2019. The Turbojet! Hentet 21.05.2019 fra

<https://www.youtube.com/watch?v=JzwfzgfJiJ4&fbclid=IwAR3KmIfUoFVIV-jmElV9ih-RWTKYPTugT5e5gW9LYPHHV827rrBcPgXrGzpk>

## **Trygg og sikker**

2019. Brannklasser og effektivitet. Hentet 23.05.2019 fra

<https://www.tryggogsikker.no/brannklasser-og-effektivitet/>

## **Turbo Service AS**

2019. Hvordan virker en turbo. Hentet 21.05.2019 fra

<https://turbo.no/aktuelt/turbocharger-explained/>

## **Turbokraft**

2019 Turbocharger: Torg Warner. Hentet 21.05.2019 fra

<https://parts.turbokraft.com/products/turbocharger-borg-warner-kkk-k27-7200>

---

## **Volkswagen Part**

2005. FLUID CAPACITY CHART. Hentet 22.05.2019 fra

<http://www.vwparts.com/pdf/VW-fluid-capacity-chart-2005.pdf>

## **Yachbits 2019**

2019. Raymarine Type 1 Hydraulic Pump. Hentet 21.05.2019

<https://www.yachtbits.com/raymarine-type-1-12v-hydraulic-pump-m81120>

## **Zakupka**

Ukjent Boch Pumpekart. Hentet 21.05.2019 fra

<http://avtoteploholod.zakupka.com/p/1952680-dopolnitelnyy-vodyanoy-nasos-bosch-0-392-020-039/>

# Kilder brukt til empirisk undersøkelse av brennkammer

## **Bergquist, Espen og Magnus Seth**

2014. *Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin*. Høgskolen i Bergen.

## **Furze, Collin**

2013. *How to build a TURBOJET ENGINE -The Maths*. (21.05.2019)

[https://www.youtube.com/watch?v=6GywwbhqR\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=6GywwbhqR_o)

## **Giandomenico, Don**

2004. *GR-1 Turbojet Project*. (15.01.19)

[http://www.rcdon.com/html/gr-1\\_turbojet\\_project\\_3\\_8\\_04.html?fbclid=IwAR3g4FF6aKWBgGWdFf\\_czyGKIF4DTWJpRF-dMpg8tdb2qJmAVAoIxJCjSRI](http://www.rcdon.com/html/gr-1_turbojet_project_3_8_04.html?fbclid=IwAR3g4FF6aKWBgGWdFf_czyGKIF4DTWJpRF-dMpg8tdb2qJmAVAoIxJCjSRI)

## **Håheim, Fredrik, Mir Imran og Sven Greger.**

2014. *Ingeniør Lages gassturbin*. Høgskolen i Oslo og Akershus

[https://fagarkivet-hioa.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12199/913/Haheim\\_Fredrik.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://fagarkivet-hioa.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12199/913/Haheim_Fredrik.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

---

**Instructables**

<https://www.instructables.com/id/Homemade-Turbojet-Engine/> (14.01.19)

<https://turbojets.weebly.com/detail-of-components.html>

**Lee, Han Ju, Nick Strahan og Emily Boyd**

2016. *Turbocharger Jet Engine Build and Engineering Analysis*. Washington University Open Scholarship

<https://pdfs.semanticscholar.org/1dfd/aec8ebf1315fe8c81525ce93af71788476d1.pdf>

(14.01.19)

**Leknes, Erik, Mats Myklebust, og Øystein Ellingsen**

2013. *Prosjektering og videreutvikling av gassturbin*. Høgskolen i Bergen

**Lundgaard, Johannes**

Telefonsamtale. 08.01.19

**Nuclearprojects**

2004. <https://nuclearprojects.com/jetspecs/> (02.02.2019)



---

## Vedlegg

### A. Merkeskilt for turbolader



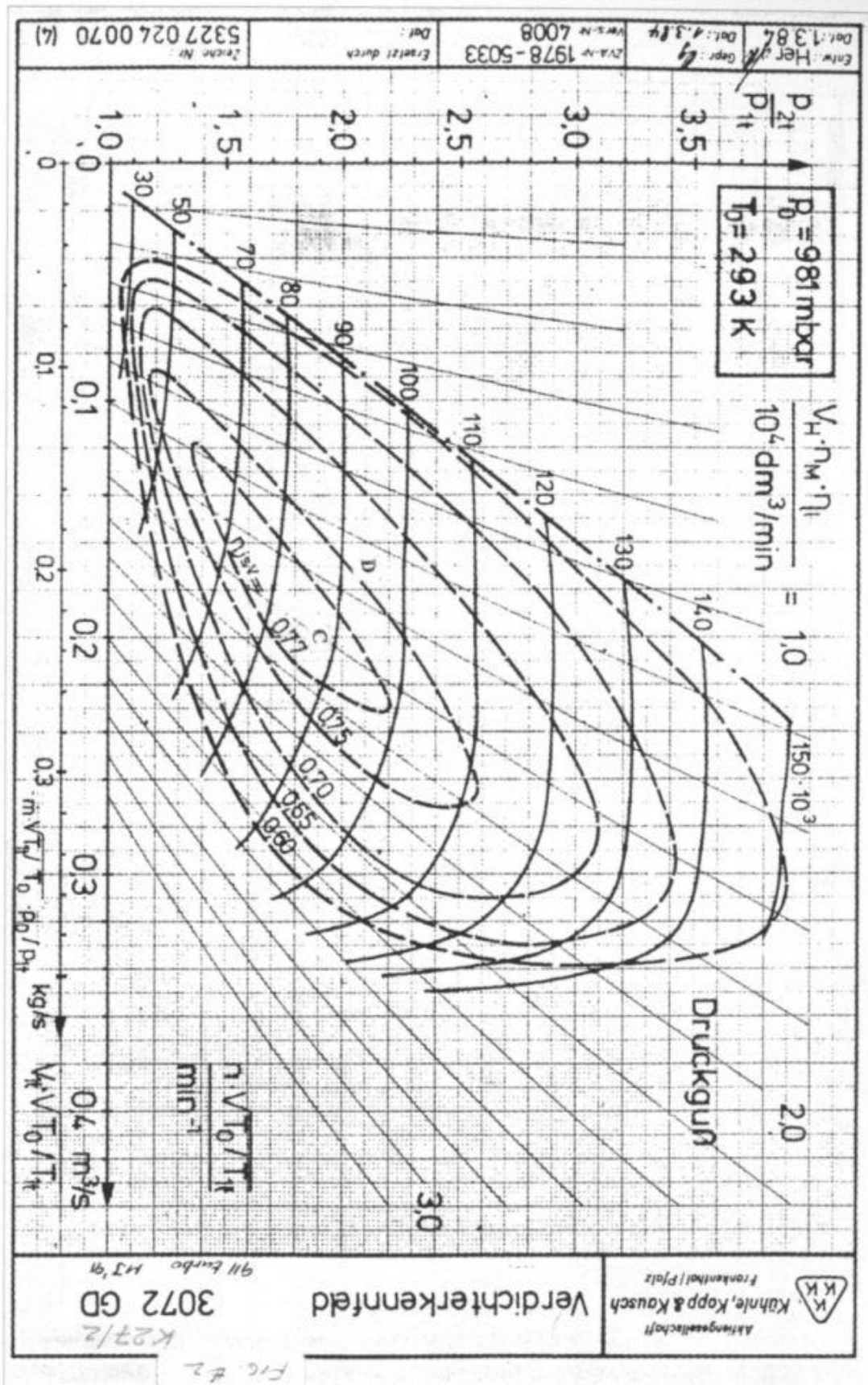
KUND-NR (OEM-NR): 0050961099

GRÖSSE (TYPE): K27

ATL-NR (ARTIKKEL NR): 97 713 3504

AUSF-NR (SERIE NR): 5327 970 6893

## B. Kompressorkart K27



## C. Budsjett

Utstyr:	Kostnad:
<b>Oljesystemet</b>	
Deler fra KSR(kjøletank/olje, radiator og vifte)	kr 2 248,00
Oljefilter adapter + koblinger	kr 991,00
Olje Pumpe	kr 877,00
Oljeslanger og annet tilbehør	kr 816,70
T-kobling og trykk giverkoblinger	kr 715,00
Koblinger til oljeslangene	kr 658,00
Koblinger og overganger til radiator	kr 399,00
AN-koblinger til oljesystemet	kr 318,00
Slange og koblinger til pumpen.	kr 191,60
<b>Kjølevannsystemet</b>	
Vannpumpe	kr 874,00
Deler til kjølesystemet	kr 520,50
Adapter til vann giver og slanger	kr 268,90
Monteringssett kjølevifte	kr 129,80
<b>Gass-systemet</b>	
Gassdeler fra GassService	kr 2 574,00
Deler til gass-systemet	kr 364,20
Brannslukker ABC 2kg	kr 306,00
Regulator til gass og koblinger	kr 288,60
Tenningsystem	kr 200,00
<b>Elektro og annet</b>	
Batteri og annet tilbehør til el-elektriske systemet	kr 1 995,00
Instrumentklokker og givere fra Maritime Bergen	kr 1 603,00
Overganger og annet tilbehør	kr 959,80
Motorolje og frostvæske	kr 892,00
Timeteller	kr 399,00
Gassfylling	kr 298,00
Rør	kr 180,00
USB uttak til Arduino	kr 84,90
<b>Totalt:</b>	<b>kr 19 152,00</b>

---

## D. Testfase

Sted: U-båt bunkeren på Laksevåg

Dato: 20.05.19

Klokkeslett: 16:11

### Værforhold

Atmosfærisk trykk: 1012 hPa

Lufttemperatur: 20,0 grader C

Luftfuktighet, relativ: 55%

### Fremgangsmåte

Gassturbinen ble kjørt utendørs og i henhold til brukermanualen (se eget hefte «Brukermanual for Gassturbin»). Propantanken ble satt i vannbad som holdt 40,2 °C ved start av første forsøk. Første forsøk ble gjennomført ved konstant trykk. Der ble gassturbinen kjørt på 2,0 bar i 6 minutter. Andre forsøk ble gjennomført ved varierende trykk over 13 minutter.

### Måleutstyr

- Strømtang
  - Fluke 376 FC strømtang
  - Nøyaktighet:  $\pm 0,1$  A
- Temperaturmåler
  - 2 stykk K-type termoelement med Fluke 1587 FC Isolasjonsmåler
  - Nøyaktighet:  $\pm 0,1$  °C
- Vekt
  - Materialvekt fra lageret på U-båt bunkeren
  - Nøyaktighet:  $\pm 0,1$  kg
- Tid
  - Stoppeklokke på telefon
  - Nøyaktighet:  $\pm 1$  sekund
- Trykk
  - Trykkregulator med manometer fra Biltema som sitter på gassturbinen
  - Nøyaktighet:  $\pm 0,2$  bar
- Spenning
  - Spenningsgiver og -viser fra Maritime Bergen som sitter på gassturbinen
  - Nøyaktighet:  $\pm 0,1$  V

---

## Tester

- Forbruk propan
  - Propantanken ble veid før og etter en gitt tid og gitt pådrag i den hensikt å kunne vite hvor mye propan som hadde gått med. Ved å dele endringen i vekt med tiden som var gått var det mulig å finne masseflyten. Deretter kunne den termiske effekten ( $q_{inn}$ ) finnes ved å multiplisere brennverdien for propan (46,1 MJ/kg) med masseflyten
- Temperaturer
  - Måler T01, T02, T03 (overfladisk), T04 med termoelementene. T03 ble målt på overflaten av trakten, helt inntil flensen. Temperaturene ble målt etter at de hadde stabilisert seg
  - Måler smøreolje- og kjølevannstemperatur med termoelementene direkte i tanken etter en gitt tid
- Spenningsfall
  - Måler spenningsfall over batteriet før og etter en gitt tid med alle systemene i full drift
- Strøm
  - Måler hvor mye strøm hele systemet trekker under kjøring og oppstart ved hjelp av strømtang. Måles rundt positiv leder mellom batteriet og sikringsboken

## Resultater

Ved utregning av resultatene er middelverdien for unøyaktighetene brukt.

### Forbruk propan og termisk effekt:

Tid i drift	Pådrag	Endring i vekt	Massestrøm propan	Termisk Effekt
6 min	2 bar	1,0 kg	2,778 g/s	128,1 kW
13 min	Mellom 0,2 og 3,5 bar	1,5 kg	1,923 g/s	88,65 kW

### Temperaturer T01, T02, T03 (utside), T04 på varierende pådrag:

Tid	Pådrag	T01	T02	T03	T04
6 min	2 bar	21,5 °C	103°C	264°C (utside)	350 °C
2 min	2,5 bar	20,0 °C	131 °C	305°C (utside)	370 °C

---

**Smøreolje- og kjølevannstemperatur ved kjøring over lengre tid:**

Tid	Pådrag	Temperatur, smøreolje	Temperatur, kjølevann
0 min	0 bar	21,5 °C	21,5 °C
6 min	2 bar	56 °C	63 °C
13 min	0,2 – 3,5 bar	60 °C	62 °C

**Spenningsfall ved drift over tid:**

Tid i drift	Spenning
0 min	12,8 V
6 min	12,5 V
19 min	12,4 V

**Strøm for hele systemet:**

Oppstart	Drift
Minimum 24 A	17,1 A

**Andre notater:**

Forsøket ble stanset etter 19 minutters kjøring. Det var på grunn av at oljetrykket falt under 1,0 bar og vi turte ikke å kjøre lengre da vi var usikre på hvordan dette ville slå ut på lagrene. Oljetemperaturen ble da målt til 60 °C og fløt veldig tynt.

Værdata er hentet fra: <https://www.bergensveret.no/stasjon/?id=24&vis=airp>

20.05.19 – kl: 1600 – Nygård Stasjon (nærmeste stasjon til Laksevåg)

## E. Risikovurderings-skjema

Risikovurderingsskjemaet er utformet etter forswarets mal for utførelse av øvelses aktivitet. Denne malen kalles ORM ( Operational Risk Management).

Beskrivelse av skjemaet:

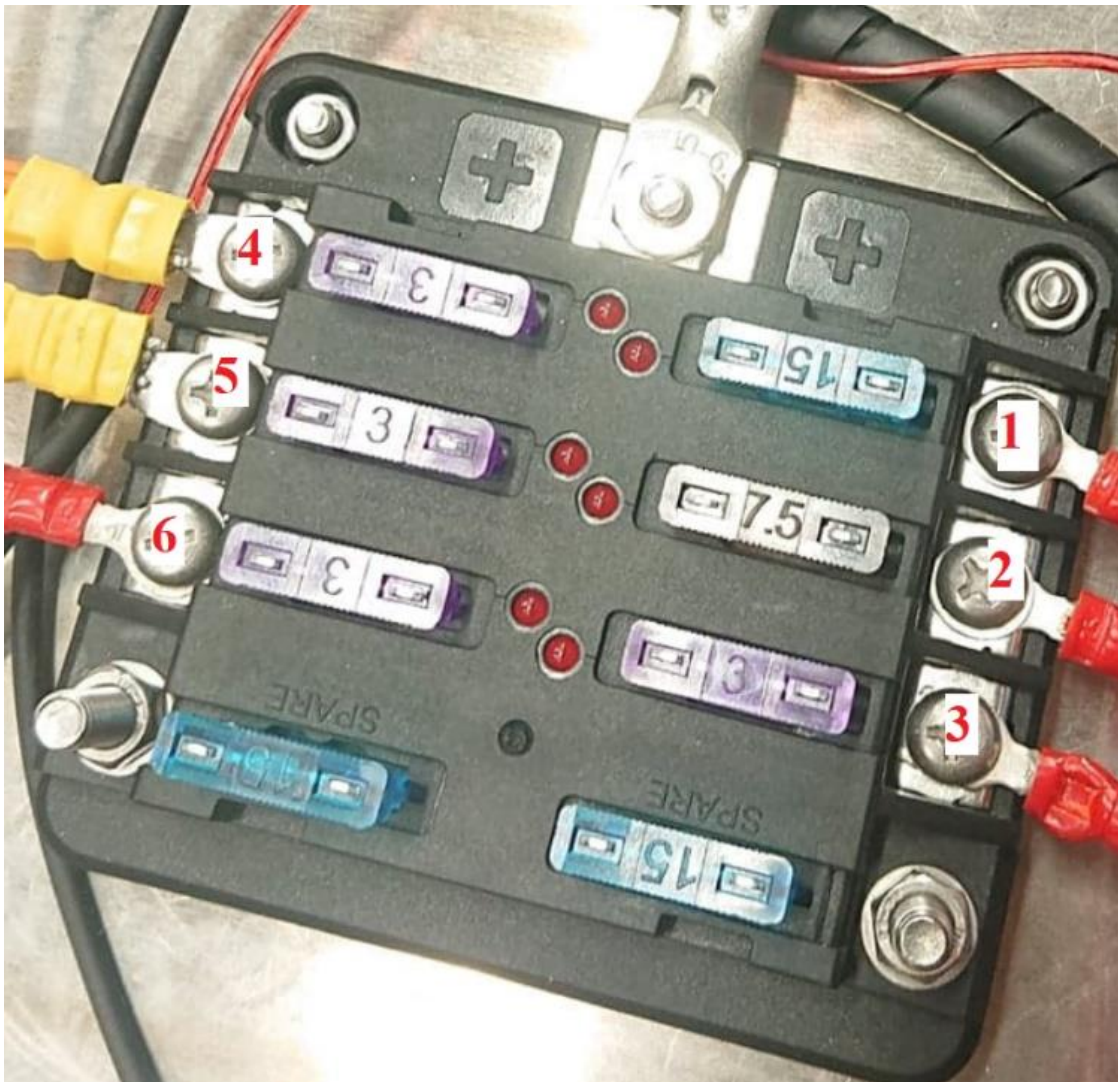
S = Sannsynlighet (1 = meget usannsynlig – 5 = meget sannsynlig)

K = Konsekvens (1 skade på materiell – 5 flere dødsfall)

R = Risiko ( R = S \* K)

ORM-skjema for gassturbin									
Hva	S	K	R	Tiltak	S, ny	K, ny	R, ny	R, ny	
Eksplosjon i turbin	1	4	4	Plassere personell vekk fra kompressoråpning, maks begrensning på pådrag	1	3	3	3	
Brann	2	4	8	Nødstopventil på kontrollpanel, slangeklemmer	1	3	3	3	
Elektriske støt	2	3	6	Isolering, sikringsboks	1	1	1	1	
Skader fra roterende deler	2	3	6	Sikkerhetsavstand	1	2	2	2	
Brannskade fra eksos	2	2	4	Sikkerhetsavstand	1	2	2	2	
Eksos-forgiftning	1	4	4	Kjøring utendørs	1	1	1	1	

## F. Kobling av sikringsboks



Nummer	Navn	Styrke på sikring
1	Smøreoljekrets	15 A
2	Kjølevannskrets	7,5 A
3	Strømforsyning Arduino	3 A
4	LED-belysning, klokke	3 A
5	Strømforsyning, klokke	3 A
6	Tenningskrets	3 A



---

## G. Vektregnskap

<i>Hva:</i>	<i>Estimert vekt</i>	<i>Faktisk vekt</i>
<i>Batteri</i>	20 kg	17 kg
<i>Propantank, full</i>	30 kg	24 kg
<i>Kjølevannssystem m/ 5 liter væske</i>	20 kg	16 kg
<i>Smøreoljesystem m/ 4 liter olje</i>	15 kg	15 kg
<i>Turbo, brennkammer, flenser og rør</i>	35 kg	30 kg
<i>Rammen</i>	54.5 kg	54 kg
<i>Brennstoffsystem (uten propantank)</i>	5 kg	5 kg
<i>El-system inkl. kontrollpanel</i>	5 kg	8 kg
<b><i>Tilsammen:</i></b>	<b>184.5 kg</b>	<b>169 kg</b>

---

## **H. Kontaktinformasjon til firmaer som er benyttet**

### **Turbo-service AS Norge**

Tlf nr: 67 83 25 00

Økrisletta 13, 1340 Skui

### **QWT Bergen**

Tlf nr :55 92 41 40

Adresse: Sanddalsringen 3, 5225 Nesttun

### **Gass Service AS**

Tlf nr: 55 20 82 40

Adresse: Kanalveien 88, 5068 Bergen

### **Maritim Laksevåg**

Tlf nr: 40 00 19 59

Adresse: Damsgårsveien 143, 5160 Laksevåg

# I. Arbeidslogg

Uke nr:	Desember							Jan							Feb							Mars							April							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7				
<b>Antall timer brukt</b>	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7		
<b>Designfase</b>																																										
Litteraturstudie																																										
Utkast til løsninger																																										
<b>Produksjonsfase</b>																																										
Ramme																																										
Brennkammer																																										
Gassystemet																																										
Smøreljesystemet																																										
Kjølevannsystemet																																										
El-systemet																																										
<b>Testing</b>																																										
<b>Skriving</b>																																										
Total timer brukt																																										
Totalt timer brukt til bygging																																										

## J. P-v og T-s diagram

Antar følgende:

- $T_3 = 800 \text{ °C}$
- $p_2 = p_3 = 2 \text{ bar}$
- Konstant varmekapasitet
- $C_p = 1005 \text{ J/KgK}$
- $R = 287 \text{ J/Kgk}$
- Ideell gass

Det spesifikke volumet beregnes med den ideelle gassloven:  $v = \frac{RT}{p}$

Entropiendringen beregnes ved:  $\Delta s = s_2 - s_1 = C_p * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R * \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

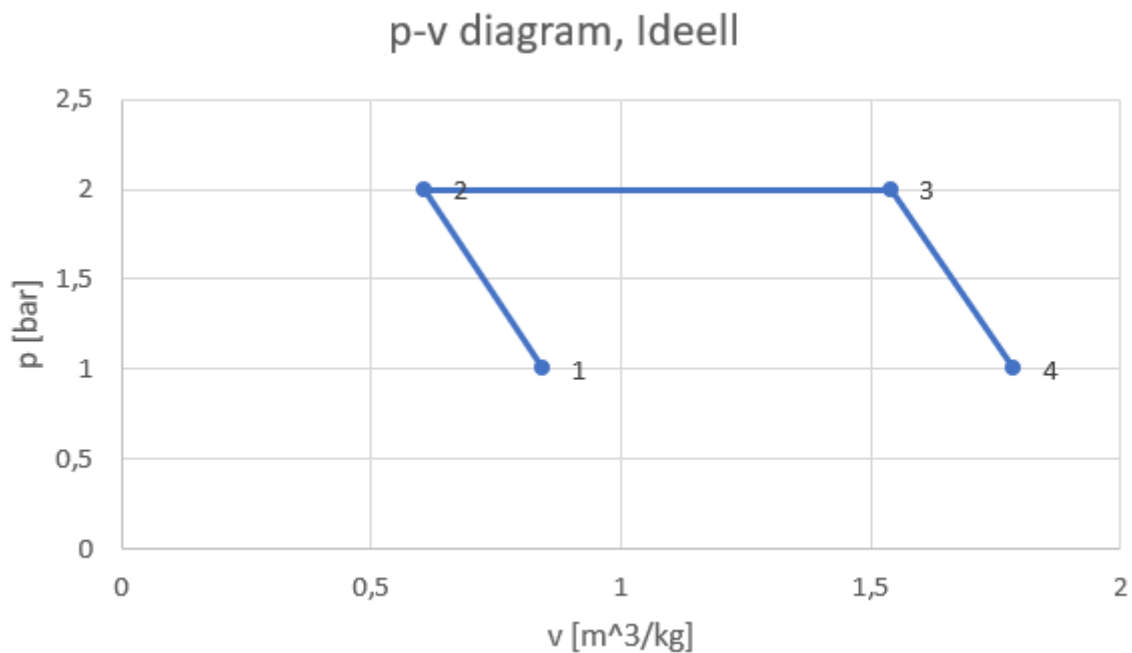
Entropien ved innløp settes til  $1000 \text{ J/KgK}$  i den hensikt å gjøre diagrammet leservennlig.

Ved utregning av ideell T-s diagram, er det antatt isentropisk arbeid over kompressor og turbin.

**Data brukt i beregning:**

R [J/(KgK)]	T [° C]	T [K]	p [bar]	v [m <sup>3</sup> /kg]	$\Delta s$ [J/(KgK)]	s' [J/(KgK)]	s [J/(KgK)]
287	21	294	1	0,84378	166,6781329	1000	1000
<b>Cp</b>	150	423	2,00	0,607005	935,4957714	1000	1166,67813
1005	800	1073	2,00	1,539755	-347,4523191	1935,49577	2102,1739
	350	623	1	1,78801	-754,7215852	1935,49577	1754,72159

**p-v diagram:**



**T-S diagram:**

T-s diagram, Reell og Ideell

