



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Videreutvikling av en turbolader-basert gassturbin

En konstruksjonsoppgave

av

Eirik Skårnes og Eirik Athammer

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MARINEINGIENIØR
MAKSIN

Innlevert: Juni 2020

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadettenene har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den. Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadettenene har godkjent publisering. Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

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

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av Eirik Skårnes og Eirik Athammer som en del av militære studier med fordypning i marineingeniør maskin ved Sjøkrigsskolen. Oppgaven strekker seg fra januar 2020 til juni 2020.

Oppgaven tar for seg videreutvikling av en allerede eksisterende gassturbin, og kombinerer både praktisk og teoretisk kunnskap. Gassturbinen er ment for å kunne benyttes i undervisningssammenheng for å kunne gi bedre forståelse av dens konstruksjon og virkemåte. Oppgavens kunnskapsnivå tar utgangspunkt i en maskinkadett ved Sjøkrigsskolen, med kjennskap til grunnleggende tekniske begreper og sammenhenger. Oppgaven skal likevel være tilrettelagt for å kunne skape en generell forståelse hos allmennheten.

På grunn av pandemien som brøt ut i begynnelsen av mars 2020 har tilgangen til maskinlabben, og dermed også det praktiske arbeidet, blitt periodevis begrenset. Situasjonen tatt i betraktning, er vi likevel fornøyd med oppgavens sluttresultat.

Vi ønsker å takke Wago Norge for ekspertise og sponning av PLS med tilhørende moduler, som gjorde det mulig å gjennomføre oppgaven innfor gitte økonomiske rammer. Takk til førstemann Alexander Sauter for veiledning, programmering og konstruktive tilbakemeldinger underveis. Takk til Gisle Strand for veiledning og rådgivning. Til slutt vil vi takke personell ved UVB-verkstedet for disponering av verktøy og materiell til oppgaven.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 12-06-2020

(Signatur)

(Signatur)

Oppgaveformulering

Våren 2019 ble det som en del av en bacheloroppgave ved FHS Sjøkrigsskolen konstruert en prøvestand for en turbolader-basert gassturbin. Som del av oppgaven ble det anbefalt en rekke utviklingsområder. Foreliggende oppgave går ut på å **videreutvikle denne gass-turbinen slik at det er mulig å beregne anleggets termiske virkningsgrad**. Dette innebærer også at gassturbinen skal kunne brukes til undervisningsformål og samtidig gi spillerom for forbedringer i fremtiden.

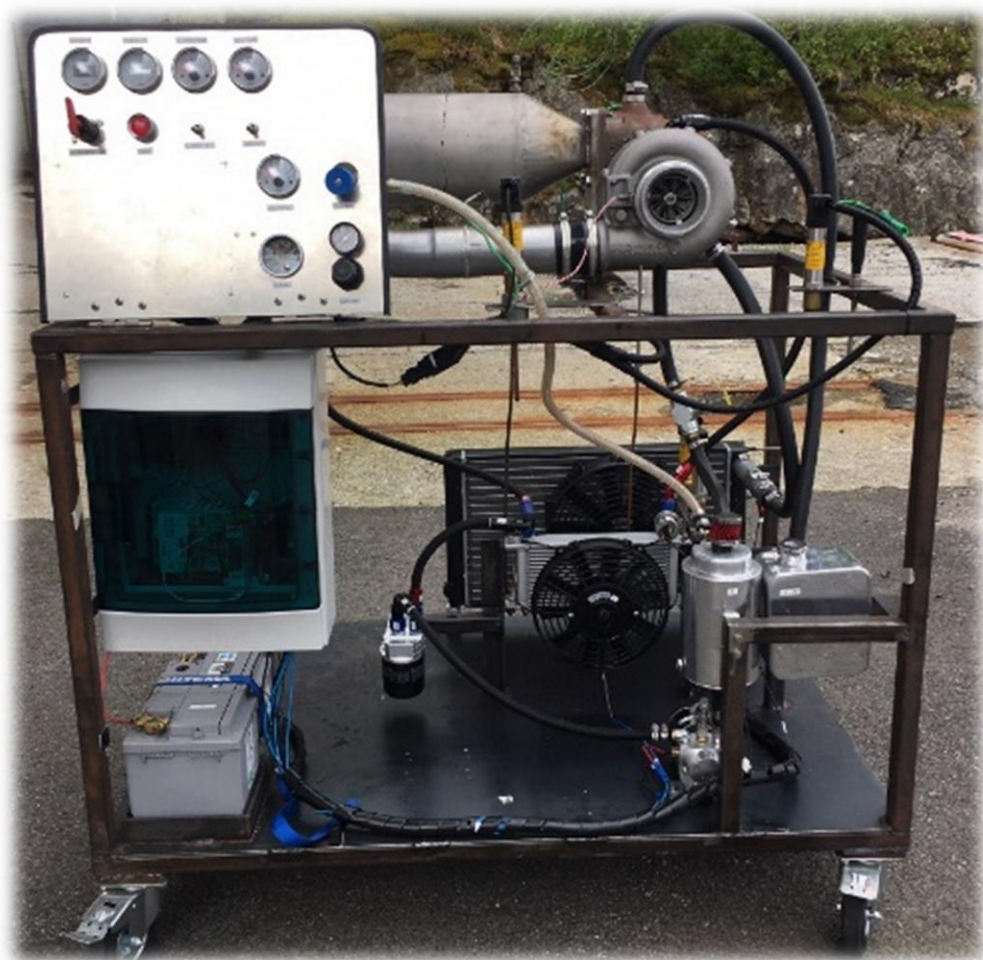
Sammendrag

Oppgaven bygger på bacheloren "*Konstruksjon av gassturbin til undervisningsformål*" fra 2019, og har arbeidet med å **videreutvikle denne turbolader-baserte gassturbinen slik at det er mulig å beregne anleggets termiske virkningsgrad**. Målene har vært å instrumentere gassturbinen med et enkelt og intuitivt overvåkningssystem som kan måle nøyaktige trykk-, temperatur- og turtallverdier. Det har samtidig vært et ønske å gjøre plattformen i stand til å kunne benytte PC til lagring og loggføring av data. Videreføring av gassturbinen som en læringsplattform for fremtidige kadetter har også vært høyt prioritert.

For å oppnå dette har plattformen blitt instrumentert med trykk- og temperatursensorer i følgende målepunkter: kompressorinnløpet, kompressorutløpet, turbininnløpet og turbinutløpet. Det har også blitt montert en turtallssensor, for å kunne overvåke turtallet til gass-turbinen under drift. Det nye kontrollpanelet har klart å videreføre og samtidig komprimere det intuitive oppsettet fra tidligere, i tillegg til at selve kontrollsystemet er blitt erstattet med PLS. Det har gjort det mulig å lese av data ved bruk av PC, men har derimot ikke lyktes i å lagre data (foreløpig), grunnet problemer med lagringsfunksjonen i programmet som er benyttet.

Gjennom testing, analyse og drøfting har oppgaven kommet frem til at sensorene gir ut nøyaktige verdier nok til å kunne nyttes i beregning av termisk virkningsgrad. Dette krever imidlertid flere antakelser, hvorav den tilførte luftmengden til gassturbinen er av så stor usikkerhet, at virkningsgraden kun kan estimeres grovt. Anleggets termiske virkningsgrad er her estimert til 1,7 %. Konklusjonen er derfor at det trengs mer nøyaktige målinger av luftmengde for å kunne si med sikkerhet om virkningsgraden ligger på 1,7 %.

Til slutt har gassturbinen blitt utviklet til en plattform som åpner for samarbeid på tvers av alle de tekniske linjene ved Sjøkrigsskolen. Dens prinsipp og oppbygging kan benyttes i undervisningen til maskinkadettene, mens det datatekniske oppsettet kan brukes i undervisningen til kadettene som går elektronikk eller automasjon. Oppgaven har dermed lagt til rette for en felles plattform som kan nyttes i den ingeniørutdanningen ved skolen.



Figur 0.1 Oppgavens sluttresultat

Innholdsfortegnelse

Figurer	1
Tabeller/Diagrammer	3
Forkortelser	4
Nomenklatur	5
Symboler	6
1. Innledning	8
1.1 Mål	9
1.2 Struktur	10
2. Teori	11
2.1 Turbolader-basert gassturbin	11
2.1.1 Kompressor	13
2.1.2 Brennkammer.....	14
2.1.3 Turbin.....	15
2.1.4 Brennstoff	16
2.1.5 Turboladeren benyttet i oppgaven	16
2.2 Kompressorkart.....	17
2.4 Sensorer.....	19
2.4.1 Temperatursensorer.....	19
2.4.2 Trykksensorer	21
2.4.3 Turtallsensorer	21
2.5 Måleteknikk	22
2.5.1 Trykkmåling av luft	23
2.5.2 Temperaturmåling av luft	24
2.6 PLS.....	24
2.6.1 E!cockpit	25
2.6.2 Node-RED.....	26
3 Videreutvikling av turbolader-basert gassturbin	27
3.1 Analyse av modellen før instrumentering.....	27
3.1.1 Oljetrykksproblem	28
3.1.2 Overvåkningssystemet	29
3.2 Valg av overvåkningssystem	30
3.2.2 Det elektriske anlegget.....	31
3.2.3 Digitalt brukergrensesnitt.....	33

3.3	Valg av temperatursensorer	35
3.3.1	Montering av temperatursensorer	38
3.4	Valg av trykksensor	39
3.4.1	Montering av trykksensorer	41
3.4.2	Kjøleinnretning for trykksensorluften	43
3.5	Valg av turtallsensor	44
3.5.1	Montering av turtallsensor	50
4	Testing og resultat	52
4.1	Kontrollpanelet	53
4.2	Test 1: Temperatursensorer	54
4.3	Test 2: Trykksensorer	55
4.3.1	Test 3: Kjøleinnretning for trykksensorer	56
4.4	Test 4: Test av turtallsensor for montering.....	57
4.5	Test 5: Gassturbinen under drift	58
4.6	Test 6: Konstant turtall	61
4.7	Test 7: Brennstofforbruk	63
4.8	Beregning av virkningsgrad	64
5	Drøfting og sammenligning	68
5.2	Analyse av gassturbinen	68
5.3	Overvåkningssystemet.....	69
5.3.1	Kontrollpanelet	69
5.3.2	Brukergrensesnittet.....	70
5.3.3	Målenøyaktighet	71
5.4	Videreutvikling og fremtidig bruk.....	74
5.5	Beregning av virkningsgrad	76
5.6	Fremtidig bruk	78
6	Konklusjon	79
6.2	Anbefaling og videreutvikling	80
6.2.1	Måleinnretning for luft- og brennstoffmengde.....	80
6.2.2	Selvstendig oppstart.....	80
6.2.3	Kraftturbin	80
6.2.4	Videreutvikling av fremvisning og lagring av data.....	81
	Bibliografi.....	82
	Vedlegg A Budsjett.....	86
	Vedlegg B Avvik i forhold til brukermanualen	1
	Vedlegg C Elektriske tilkoblinger og innhold i El-skapet.....	2

Vedlegg D Notater til videreutvikling av overvåkingssystemet	3
Vedlegg E Radialturbin karakteristik	6
Vedlegg F Eksterne Vedlegg.....	7

Figurer

Figur 0.1 Oppgavens sluttresultat	v
Figur 2.1 LM 2500 Gassturbin (Wikipedia, 2020)	11
Figur 2.2 Gassturbinen benyttet i oppgaven	12
Figur 2.3 Gassturbinens målepunkt	13
Figur 2.4 Gassturbinens oppbygging	13
Figur 2.5 Kompressorens oppbygging (Celeroton, 2020)	14
Figur 2.6 Illustrasjon av brennkammeret (Stemit, 2020)	15
Figur 2.7 Flammerøret benyttet i oppgaven.....	15
Figur 2.8 Turbinhuset til en turbolader (Turbo, 2020)	16
Figur 2.9 Snitt av K27 turbolader (venstre) og turboladeren benyttet i oppgaven (høyre) (Borg Warner, 2020)	17
Figur 2.10 Kompressorkartet benyttet i oppgaven.....	18
Figur 2.11 Måleprinsipp for termoelement med varmpunkt til venstre og kaldpunkt (V _{AB}) til høyre. (Benoheating, 2020)	20
Figur 2.12 Illustrasjon av en trykksensor (Wika, 2020)	21
Figur 2.13 Hall-Effekten (venstre) og Hall-effekt sensoren (høyre) (howtomechatronics, 2020).....	22
Figur 2.14 Laminær strømning (venstre) og turbulent strømning (høyre) (SimScale, 2020)	23
Figur 2.15 Pitotrør (Saravanamuttoo, 2009).....	24
Figur 2.16 PLS (RIEVTECH, 2020)	25
Figur 2.17 Eksempel på funksjonsblokk i E!cockpit.....	26
Figur 2.18 Eksempel på noder i Node-RED	26
Figur 3.1 Utseende til gassturbinen før den blir videreutviklet	27
Figur 3.2 Glidelager i en turbolader (Borgwarner, 2020).....	28
Figur 3.3 Strupeventil	29
Figur 3.4 LCD-skjerm.....	29
Figur 3.5 PLSen benyttet i oppgaven (Wago, 2020)	30
Figur 3.6 El-Skapet	32
Figur 3.7 Tilkobling med Ethernet-kabel	33
Figur 3.8 Tilkobling med WIFI	33
Figur 3.9 Utklippsbilde av brukergrensesnittet.....	34
Figur 3.10 Comark AK27M (Impex, 2020).....	36
Figur 3.11 K0234D (Elma-instruments, 2020).....	36
Figur 3.12 Luft/Røykgasstemperaturføler (Elma-instrments, 2020)	37
Figur 3.13 JUMO 901250 (Jumo, 2020).....	37
Figur 3.14 Måleinnretning termoelement Type 1	38
Figur 3.15 Måleinnretning termoelement Type 2 (Saravanamuttoo, 2020)	39
Figur 3.16 Aplisens 0-4 Bar (Aplisens, 2020)	41
Figur 3.17 Aplisens 0,8-1,2 bar (Aplisens, 2020).....	41

Figur 3.18 Illustrasjon av hvordan pitotrøret er plassert i T04.....	42
Figur 3.19 Måleinnretninger montert før turbin T03	43
Figur 3.20 Måleinnretninger montert etter turbin T04	43
Figur 3.21 Kjøling til trykksensorene	44
Figur 3.22 Optisk takometer (Elfa-distrelec, 2020)	45
Figur 3.23 Mekanisk takometer (Elfa-distrelec, 2020)	45
Figur 3.24 Stroboskop (Elfa-distrelec, 2020).....	46
Figur 3.25 DZ 140 Speedsensor (sensotest, 2020).....	47
Figur 3.26 Jaquet Speedsensor (Tormatic, 2020).....	48
Figur 3.27 Garrett Speedsensor kit (Garrett, 2020).....	49
Figur 3.28 Oppspenning i søyleboremaskin.....	50
Figur 3.29 Tilpassinger før boring	50
Figur 3.30 Turtallsensoren montert i kompressorhuset sett fra innsiden	51
Figur 3.31 Turtallsensoren montert i kompressorhuset sett fra utsiden	51
Figur 4.1 Kontrollpanelet før	53
Figur 4.2 Kontrollpanelet etter	53
Figur 4.3 Statistiske måleverdier i en temperaturgraf. Oransje: T4, Lyseblå: T3, Mørkeblå: T2, Grønn: T1.	54
Figur 4.4 Statistiske måleverdier i en trykkgraf; Oransje: P3, Lyseblå: P1, Mørkeblå: P2, Grønn: P4.	55
Figur 4.5 Temperaturmåling av luften i T03.....	56
Figur 4.6 Signaltest av turtallsensor	57
Figur 4.7 Temperaturgraf første kjøring	59
Figur 4.8 Turtallsgraf første kjøring.....	59
Figur 4.9 Trykkgraf første kjøring	60
Figur 4.10 Temperaturgraf andre kjøring.....	61
Figur 4.11 Turtallsgraf andre kjøring	62
Figur 4.12 Trykkgraf andre kjøring.....	62
Figur 4.13 Måling av brennstofforbruk.....	63

Tabeller/Diagrammer

Tabell 2.1 Posisjon- og symbolforklaring av målepunkt.....	13
Tabell 2.2 Karakteristika for fire ulike typer termoelement (Sauter, 2018)	20
Tabell 3.1 Resultater fra gassturbin på HVL (Bergquist, Espen og Magnus Seth, 2014)	35
Tabell 3.2 Resultater fra gassturbinen i denne oppgaven utviklet på SKSK (Finden og Panfilovs, 2019)	35
Tabell 4.1 Høyeste måleverdiene.....	58
Tabell 4.2 Avleste verdier fra Test 6 i tidspunktet 12.38.00	65

Forkortelser

CPU	Central Processing Unit
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
HMI	Human Machine Interface
PLS	Programmerbar Logisk Styring
RPM	Revolutions per minute
RTD	Resistance Temperature Detector
SKSK	Sjøkrigsskolen
UVB	Undervannsbåt
Wbm	Web-based management
HVL	Høyskolen på Vestlandet
OPC UA	Open Platform Communication Unified Architecture

Nomenklatur

Termisk virkningsgrad	Hvor stor andel av tilført varme fra brennstoffet som blir omgjort til arbeid.
T-s Diagram	Diagram som viser forholdet mellom temperatur(T) og entropi(s)
Støkiometrisk blandingsforhold	Forholdet mellom luft tilført og luft som er nødvendig for å kunne forbrenne 1 kg brennstoff ved fullstendig forbrenning.
Infrarød- stråling	Elektromagnetisk stråling av bølgelengder lengre en synlig lys
Pitotrør	Et rør som blir brukt til å måle trykk i strømmende væsker og gasser.
Legering	En kombinasjon av to eller flere metaller
Kelvin	Grunnleggende SI-enheten for måling av temperatur
Diffusor	Et konisk utformet rørstykke/kanal, med en større diameter ved utløpet en ved innløpet. Blir brukt til å redusere hastigheten og øket trykket i et fluid.
Ideell syklus	En teoretisk syklus i et T-s diagram som er uten noen form for tap.
Isentropisk prosess	En idealisert termodynamisk prosess uten endring i entropi, og som skjer uten tap og varmeutveksling til omgivelsene.
LM 2500	Gassturbin nyttet i de norske Nansen-klasse fregattene.
Spesifikk varmekapasitet	Hvor mye energi som må tilføres for å øke temperaturen til et stoff/fluid 1 °C.

Symboler

	Benevning	Betydning
η_t	Dimensjonsløst	Gassturbinens termiske virkningsgrad
$\eta_{t_{turbin}}$	Dimensjonsløst	Turbinens virkningsgrad
$\eta_{t_{kompressor}}$	Dimensjonsløst	Kompressorens virkningsgrad
w_{turbin}	J/kg	Turbinarbeidet (avgitt)
$w_{kompressor}$	J/kg	Kompressorarbeidet (tilført)
$\dot{Q}_{tilført}$	J/s	Varmeenergi tilført prosessen
c_{pl}	J/(kg * K)	Spesifikk varmekapasitet luft
c_{pg}	J/(kg * K)	Spesifikk varmekapasitet eksos
c_{pf}	J/(kg * K)	Spesifikk varmekapasitet propan
$(L/B)_R$	Dimensjonsløst	Teoretisk luftbehov (luft/brennstofforbruk) ved fullstendig forbrenning
k	Dimensjonsløst	Isentrop koeffisienten
\dot{m}_l	kg/s	Luftmengde
\dot{m}_B	kg/s	Brennstoffmengde
\dot{m}_g	kg/s	Avgassmengde (eksosmengde)
h_n	MJ/kg ¹	Brennstoffets nedre brennverdi, energien som frigis ved fullstendig forbrenning
T0X	Kelvin (K)	Stagnasjonstemperatur i målepunkt X
T0X _s	Kelvin (K)	Isentropisk temperatur i målepunkt X
TX	Kelvin (K)	Statisk temperatur i målepunkt X

¹ MJ = 10⁶ J

T_f	Kelvin (K)	Temperatur til propan før det kommer inn i brennkammeret
ΔT_0	Kelvin (K)	Endring i temperatur. Eks: T02 - T01.
P0X	Bar	Stagnasjonstrykket i målepunkt X
PX	Bar	Statisk trykk i målepunkt X

1. Innledning

En gassturbin er en forbrenningsmotor som kan levere opptil 20 ganger mer kraft, enn en stempelmotor av samme størrelse (Rolls-Royce 2005, s. 13). Dette gjøres mulig av gass-turbinens utforming, som gjør den i stand til å suge inn opptil 70 ganger mer luft til forbrenningen av drivstoff over samme tidsrom. Det betyr også at den er i stand til å forbrenne 70 ganger mer drivstoff, som vil kunne gi ut opptil 70 ganger mer energi. Denne overlegenheten til gassturbinen gjør den til en meget kraft- og arealeffektiv forbrenningsmotor, som blir mye brukt både i fly- og i krigsskipindustrien. Både de norske Nansen-klassen fregattene og Skjold-klassen korvettene benytter gassturbiner til fremdrift, hvorav de i korvettene blir brukt til hoved fremdrift, og de i fregattene blir benyttet i kombinasjon med dieselmotorer. Det gjør bruken av gassturbiner svært utbredt i den norske marinen, og det er derfor ønskelig at en marineingeniør har kjennskap til gassturbinens konstruksjon og virkemåte.

Motivasjonen for oppgaven kommer av muligheten til å kombinere praktisk og teoretisk kunnskap i en konstruksjonsoppgave, og på denne måten lettere kunne se og forstå sammenhengen mellom lab- og klasseromsundervisning. Samtidig ser vi på gassturbinen som en viktig del av vår fremtidige arbeidsplass. Grunnet tid tilgjengelig og et økonomisk tak på 20 000 kroner, er oppgaven begrenset til å hovedsakelig ta for seg et godt overvåkings-system. Oppgaven er en videreføring av bacheloren "*Konstruksjon av gassturbin til undervisningsformål*" fra 2019. Her ble det tatt utgangspunkt i en turbolader, og konstruert en mobil plattform med forbrenningskammer som ble satt sammen til en egenkonstruert gassturbin. En av de største fordelene med denne gassturbinen, er at den tydeliggjør hvilke komponenter en slik forbrenningsmotor består av, på en veldig oversiktlig og god måte. Målet med modellen var samtidig å konstruere noe som kunne utvikles videre av andre kadetter, og det vil derfor være naturlig å referere til hvordan den tidligere var bygd for å se sammenhenger med endringene som er blitt gjort.

Et viktig begrep å kjenne til i forbrenningsmotorer, er virkningsgraden (η). Den forteller hvor effektivt maskineriet faktisk er, og defineres som forholdet mellom utnyttbar energi og tilført energi (Saravanamuttoo et al., 2008 s. 72). Store marine dieselmotorer har vanligvis en virkningsgrad på mellom 30-35%, men det har og blitt laget dieselmotorer med en virkningsgrad på over 51,7% ([Nuclear-Power](#), 2020). Gassturbinen som er nyttet i de norske fregattene (LM 2500), har en virkningsgrad på 34,7-39,5% ([GE](#), 2020). For en enkel gassturbin, som den benyttet i oppgaven, er energien som omsettes avhengig av

trykk og temperaturene målt i følgende områder: kompressorinnløpet, kompressorutløpet, turbininnløpet og turbinutløpet (Saravanamuttoo et al., 2008 s. 84). Det betyr at virkningsgraden kan bestemmes gjennom instrumentering og overvåking av måledata, og derfor ikke er avhengig av å måtte sette på noen last på gassturbinen.

1.1 Mål

Siden gassturbinen benyttet i oppgaven ikke innehar tilstrekkelig instrumentering for å kunne måle de nødvendige trykk og temperaturene, er målet med oppgaven derfor å **videreutvikle gassturbinen slik at det er mulig å beregne anleggets termiske virkningsgrad**. Trykk- og temperaturmålinger vil derfor være blant de viktigste parameterne å kunne observere. Det vil samtidig være viktig å kartlegge gassturbinens funksjonalitet i mer detalj på nåværende tidspunkt, for å kontrollere om det er mulig å videreutvikle gassturbinen som ønsket. Oppgaven ønsker også å videreføre gassturbinen som en læringsplattform for fremtidige kadetter, med vekt på sikkerhetstiltak for tidligst mulig deteksjon av feil som kan oppstå. Enkelhet og sikker drift er dermed viktige faktorer som kommer til å bli tatt høyde for videre i oppgaven. I tillegg bør en bruker ha mulighet til å overvåke driften til gassturbinen i en form for brukergrensesnitt. Dette skal være intuitivt slik at en kadett lett skal kunne forstå og tolke målingene. Disse målene er oppsummert gjennom følgende tre hovedpunkter, som blir styrende for det videre arbeidet:

1. Analyse av gassturbinen

- Det skal gjennomføres en test av gassturbinen slik den er, for å avdekke eventuelle funksjonsfeil.
- Eventuelle feil skal analyseres for å kunne gi prioritet til det videre arbeidet.

2. Overvåkingssystemet

- Overvåkingssystemet skal være enkelt, intuitivt og oversiktlig.
- Det skal være mulig å måle trykk og temperatur i følgende områder: kompressorinnløpet, kompressorutløpet, turbininnløpet og turbinutløpet.
- Det skal være mulig å måle turtallet til gassturbinen
- Det skal være mulig å lese av og lagre målinger i et program på PCen.

3. Mulighet for videreutvikling

- Gassturbinen skal kunne videreutvikles både innenfor det systemtekniske og det maskinfaglige.
- Man skal kunne oppgradere deler/komponenter uten å måtte lage alt fra bunnen av.

Mindre endringer og vedlikehold av gassturbinen vil ellers bli utført der det trengs, uten at det kommer nevneverdig frem i oppgaven.

1.2 Struktur

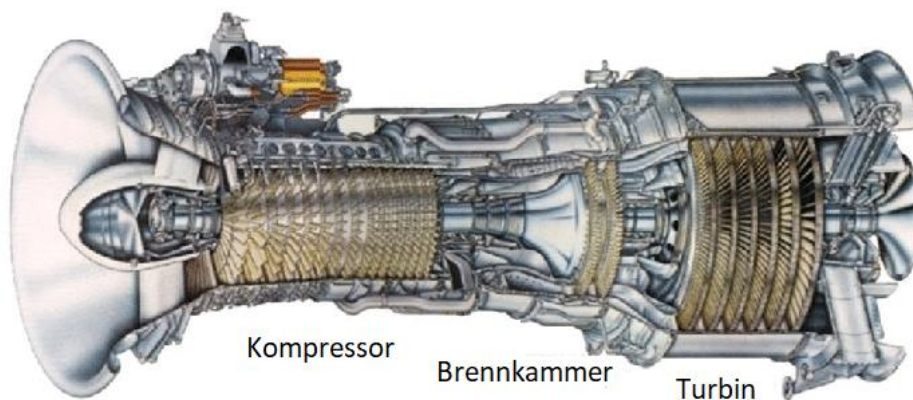
Etter å ha innledet med problemstilling og tilhørende mål i kapittel 1, vil oppgaven ta for seg relevant teori knyttet til gassturbinens overvåkningssystem og dens komponenter i kapittel 2. Hensikten med dette er å gi leseren et grunnlag for å kunne forstå hvordan gassturbinen er bygd opp og hvordan den fungerer. Kapittel 3 vil videre fokusere på arbeidet med videreutviklingen av gassturbinen og prosessen for valg av utstyr. Her går oppgaven inn på hvilke vurderinger som har blitt lagt til grunn for valg av komponenter og utforming av instrumenteringen. Oppgaven vil deretter presentere resultater og målinger fra utførte tester (inkludert beregninger) i kapittel 4. Kapittel 5 vil drøfte resultatene opp mot målene som er blitt satt innledningsvis, og tolke funnene som er gjort. Avslutningsvis vil oppgavens konklusjon bli lagt frem i kapittel 6, som vil sammenfatte det utførte arbeidet i tillegg til å innebære anbefalinger til videre arbeid.

2. Teori

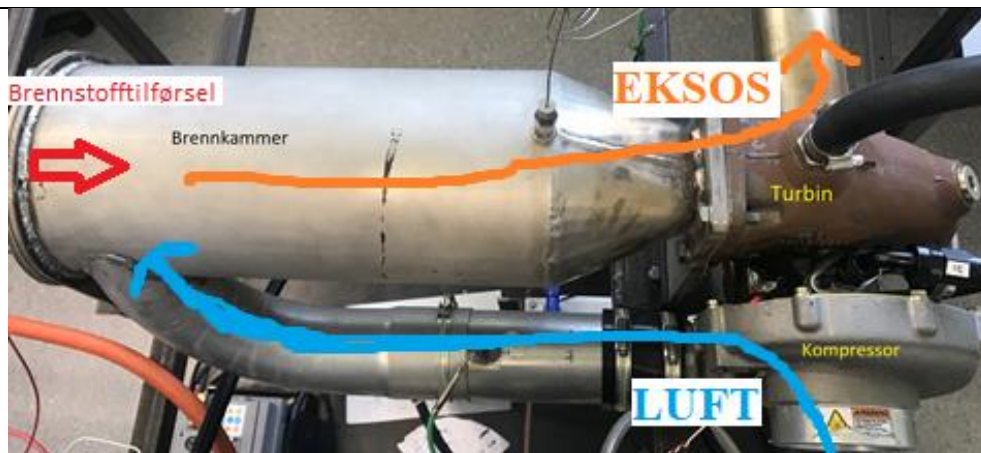
Denne delen tar for seg teori som anses som viktig for å kunne forstå hoveddelen av oppgaven. Det vil bli gitt en innføring i gassturbinen som er benyttet i oppgaven, og de viktigste komponentene. Deretter vil det bli gått nærmere inn på turboladeren som blir benyttet i oppgaven. Til slutt vil det bli lagt vekt på grunnleggende forståelse av sensorer, måleteknikk og hvilke parametere som påvirker virkningsgraden.

2.1 Turbolader-basert gassturbin

En gassturbin er som nevnt en forbrenningsmotor som kan produsere store mengder energi i forhold til størrelse og vekt. Den består hovedsakelig av en kompressordel, brennkammer og en turbindel. Generelt har slike forbrenningsmotorer ofte en virkningsgrad mellom 15-45 %, og skyldes hovedsakelig varme- og friksjonstap som oppstår i de ulike komponentene (Boyce 2012, s.3). Gassturbinen benyttet i oppgaven er turbolader-basert. En turbolader (også bare kalt turbo) og en gassturbin fungerer etter samme prinsipp, men har ulik utforming. Forskjellen ligger i at turboladeren er en påhengt komponent til en forbrenningsmotor, mens gassturbinen fungerer som en forbrenningsmotor i seg selv. Begge er drevet av avgassene som produseres i forbrenningen. I denne oppgaven har turboladeren blitt montert sammen med et brennkammer, som gjør turboladeren i stand til å fungere som en selvdrevet gassturbin. Nedenfor er en sammenligning av gassturbinen som brukes til fremdrift i de norske Nansen-klassen fregattene (LM 2500), og gassturbinen benyttet i oppgaven.

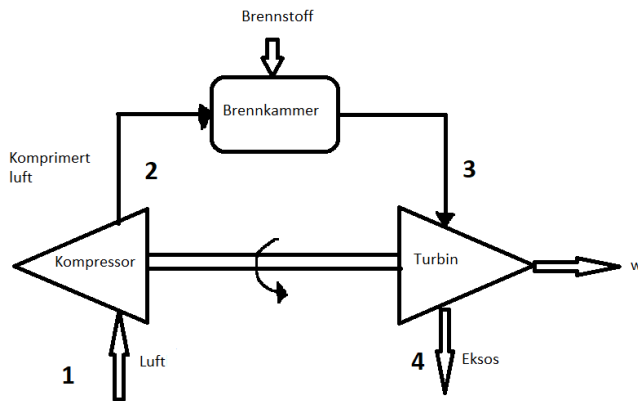


Figur 2.1 LM 2500 Gassturbin (Wikipedia, 2020)



Figur 2.2 Gassturbinen benyttet i oppgaven

Det fins hovedsakelig to typer gassturbiner, åpen og lukket (Lund, 2012 s. 92). Hovedforskjellen er at avgassene går gjennom en lukket sløyfe og dermed utnyttes noe bedre i en lukket gassturbin. I tillegg blir trykkluft benyttet ved innsuget til en lukket gassturbin til fordel for atmosfærisk trykk som blir brukt i en åpen gassturbin. Den turbolader-baserte gassturbinen i oppgaven er en åpen type, som fungerer ved at luft blir komprimert i kompressoren, og ført videre til brennkammeret. I brennkammeret blir luften blandet med brennstoffet, i dette tilfelle propan, som så antennes ved hjelp av en glødeplugg som er plassert ved brennstofftilførselen. Eksosgassen forlater deretter brennkammeret gjennom turbinen, hvor den kinetiske energien fra eksosgassen driver turbinhjulet. Turbinhjulet er koblet sammen med kompressorhjulet gjennom en felles aksling, som betyr at mye av energien turbinen leverer går til å drive kompressoren. Det er denne enheten, bestående av kompressoren og turbinen, som er selve turboladeren. Gassturbinens generelle oppbygging er skjematisk illustrert i figur 2.3. Figur 2.4 viser hvor målepunktene er plassert på gassturbinen i denne oppgaven, og tabell 2.1 gir en posisjonsforklaring for hvilke typer symboler som nyttes i hvilket område videre i oppgaven. Merk at statisk- og stagnasjonsbegrepene blir nærmere forklart i delkapittel 2.5.



Figur 2.4 Gassturbinens oppbygging



Figur 2.3 Gassturbinens målepunkt

Posisjon	Type måling	Symbol	
Innløp kompressor	Statisk	P1/T1	
Utløp kompressor	Stagnasjon	P02/T02	
Innløp turbin	Stagnasjon	P03/T03	
Utløp turbin	Stagnasjon	P04/T04	

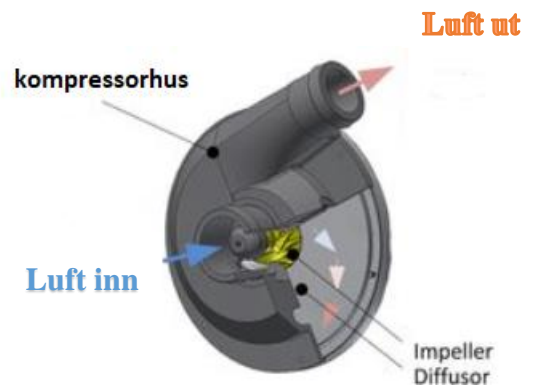
Tabell 2.1 Posisjon- og symbolforklaring av målepunkt

2.1.1 Kompressor

Turboladerens kompressordel er en sentrifugalkompressor² som består av kompressorhjul(impeller), diffusor og kompressorhus. Den roterende bevegelsen til kompressorhjulet drar inn luft aksielt og øker hastigheten til luften før den forlater kompressorhjulet i

² En kompressor med aksielt innløp og radielt utløp

radiell retning med en trykkøkning (Saravanamutto 2008, s, 158). Diffusoren senker hastigheten til luften slik at temperaturen og trykket øker. Det er vanlig å anta at halvparten av trykkoppbyggingen skjer over kompressorhjulet og halvparten gjennom diffusoren. Det betyr at det skjer en trykkoppbygging og temperaturøkning helt til luften forlater kompressorhuset. Kompressoren er viktig fordi den tilfører luften som går til brennkammeret mer energi ved å komprimere og "pakke" denne luften tettere sammen. Kompressorens virkningsgrad er avhengig av forholdet mellom teoretisk mulig og faktisk oppnådd temperatur. Ved måling av temperatur og trykk i oppgaven, vil kompressorinnløpet betegnes som målepunkt 1 og kompressorutløpet betegnes som målepunkt 2 (se figur 2.4).



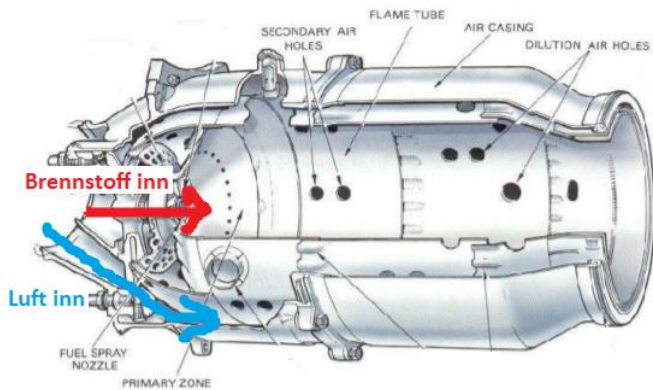
Figur 2.5 Kompressorens oppbygging
(Celeroton, 2020)

2.1.2 Brennkammer

I brennkammeret forbrennes komprimert luft og brennstoff (propan i gassform), som frigjør varme. Forbrenningen øker temperaturen i brennkammeret, som medfører en ekspansjon av avgassene (Saravanamuttoo 2009, s. 279). Arbeidet som turbinen utfører vil øke med en økende temperatur i brennkammeret, og det er derfor ønskelig at temperaturen er så høy som mulig. Det er også her den høyeste temperaturen i gassturbinen oppnås. I en enkel gassturbin er det ikke uvanlig at temperaturen på forbrenningen når 1500K (Saravanamuttoo, 2009, s. 85). Siden det er turbinen som utnytter energien fra den varme luften fra brennkammeret, ønsker man derfor å måle trykket og temperaturen i dette området så nært turbininnløpet som mulig. Dette betegnes som målepunkt 3 (figur 2.4). Den maksimale temperaturen som kan oppnås uten at brennkammeret (og turbinen) tar skade, avhenger av komponentenes materialkvalitet.

Brennkammeret består av en ytterkappe og et flammerør, og er illustrert i figur 2.6. Flammerøret er plassert på innsiden av brennkammeret og har til hensikt å regulere temperaturen til avgassene. Flammerøret nyttet i oppgaven er vist i figur 2.7. Hullene i flamme-

røret er delt inn i ulike soner med ulik størrelse og plassering. Dette er for å oppnå tilstrekkelig blanding mellom luft og brennstoff, og samtidig tilføre nok luft til kjøling. De ulike sonene er primær-sonen, sekundær-sonen og tertiær-sonen (Saravanamuttoo 2009, s.279). I primær-sonen blandes luft og brennstoff til forbrenning. Sekundær- og tertiær-sonen har begge til hensikt å tilføre nok luft til kjøling av avgassene, slik at temperaturen ikke overstiger hva materialene i brennkammer og turbinen er konstruert for å tåle.



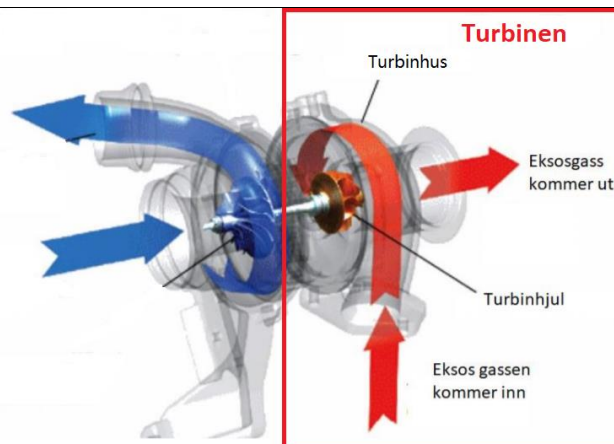
Figur 2.6 Illustrasjon av brennkammeret (Stemit, 2020)



Figur 2.7 Flammerøret benyttet i oppgaven

2.1.3 Turbin

Turboladerens turbindel består av turbinhjul, diffusor og turbinhus, og ser i utgangspunktet lik ut som kompressoren (se figur 2.8). Forskjellen er at turbinen tar inn eksosgassen radielt (hvor kompressoren tar inn luft aksielt) og bruker energien fra eksosen til å drive akslingen. Når avgassene blir presset gjennom turbinhjulet og turbinhuset, blir energien i forbrenningen omgjort til mekanisk energi. Mellom innløpet og utløpet vil temperaturen og trykket til avgassene bli redusert på grunn av turbinhusets arealendring gjennom dyssen, turbinhjulet og utløpet. Arealendringen bidrar til en reduksjon i trykket, men gir en økning i den kinetiske energien til eksosgassen som driver turbinhjulet ([Borg Warner, 2020](#)). Turbinutløpet representerer målepunkt 4 (figur 2.4).



Figur 2.8 Turbinhuset til en turbolader (Turbo, 2020)

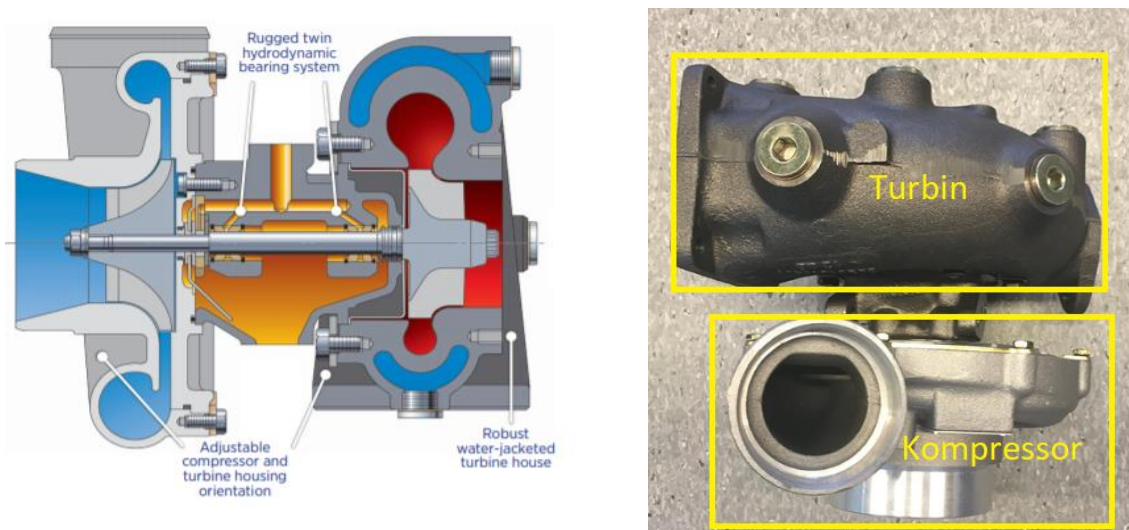
2.1.4 Brennstoff

En viktig egenskap ved alle typer brennstoff, er dets brennverdi. Denne forteller hvor mye energi som potensielt kan bli frigjort ved fullstendig forbrenning av brennstoffet. Brennstoff med høy brennverdi vil tilføre en større mengde varme til avgassene enn brennstoff med lavere brennverdi, forutsatt at forbrenningen er like god. Oppgaven benytter propan som brennstoff, som har en relativ høy brennverdi på 46,1 MJ/kg ([Gassnor](#), 2020). Diesel har en brennverdi på 43.1MJ/kg og bensin har en brennverdi på 43,9MJ/kg ([SSB](#), 2020). Propan produserer renere avgasser enn f.eks diesel (Flogas, 2020). Renere avgasser gir mindre sot i turbinhuset og er mer skånsomt for miljøet. Problemet med å nytte propan som brennstoff er at propantanken blir svært kald ved lengre kjøring. Årsaken til dette er at gass som ekspanderer mister sin indre kinetiske energi og propanen vil dermed få et temperaturfall (Bergquist og Seth, 2014, s. 49). Dette fører til et trykktap i tanken, som gjør at leveringsmengden reduseres, eller i verstefall stopper opp. I tillegg er det uheldig at propanen blir kald før den senere skal antennes. En lavere temperatur på propanen krever mer energi, fordi antenneses temperaturen fortsatt er den samme.

2.1.5 Turboladeren benyttet i oppgaven

Turboladeren benyttet i oppgaven er en KKK K27 fra turbolader produsenten Kühnle, Kopp & Kausch, senere overtatt av Borg Warner. K26/K27 turboladere har blitt brukt til marine installasjoner, men finnes også til bruk på kjøretøy. Forskjellen er at turboladeren som står på marine installasjoner har en kjølekappe over turbinhuset som er fylt med

vann. Dette er for å redusere varmestrålingen ut i det allerede varme maskinrommet og for å hindre antennelse ved lekkasje av brennstoffolje (se figur 2.6). Denne typen turbolader ble nyttet på en MTU 8V 183 TE 92 dieselgenerator om bord på Oslo-klasse fregatene. Motorene turboladeren var montert på hadde en ytelse på 490kW ([Nauticalweb, 1995](#)). Turboladeren er fra siste oppdatering av Oslo-klassen, gjort i perioden 1993-1995. Turboladeren antas likevel å være som "ny", da den aldri har vært i bruk før den ble bygget om til en gassturbin i 2019. Turbinhuset er av støpejern og vannavkjølt, mens kompressorhuset er av aluminium og luftavkjølt. Turboladeren består også av to glide-lagre som kan ta opp store radielle krefter, men krever et stabilt og konstant oljetrykk for å fungere best mulig, se Figur 2.9 ([Borg Warner, 2020](#)).

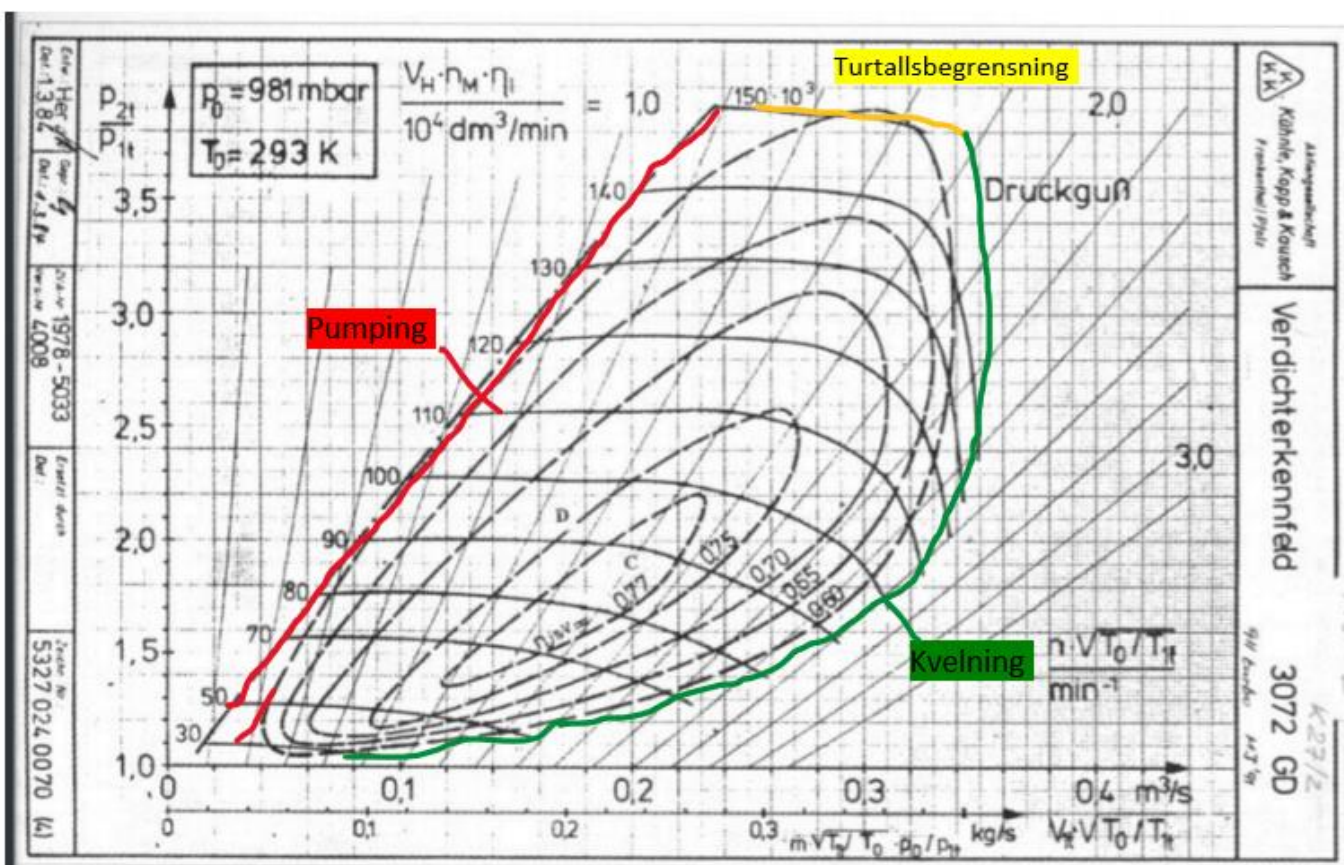


Figur 2.9 Snitt av K27 turbolader (venstre) og turboladeren benyttet i oppgaven (høyre) ([Borg Warner, 2020](#))

2.2 Kompressorkart

Kompressorkartet er en graf som beskriver egenskapene til en bestemt kompressor. Hver enkelt type turbolader har et eget designet kompressorkart. Kartet blir laget av produsenten ved hjelp av et dataprogram eller basert på resultater fra tester ([ASME, 2019](#)). Kompressorkartet benyttes til å vise ytelseegenskapene til turboladeren, som avhenger av trykkforholdet mellom innløpet og utløpet på kompressoren, massestrømmen til luften per tidsenhet, turtall og virkningsgraden til kompressoren (figur 2.10) ([Saravanamuttoo](#)

2008, s. 181). I tillegg kan kompressorkartet brukes til å anslå ukjente verdier til bruk i beregninger. Siden det ikke har vært mulig å oppdrive kompressorkartet som tilhører turboladeren benyttet i oppgaven, har det i samråd med veileder blitt enighet om å ta i bruk et kompressorkart fra MTU 183 serien. Dette vil være tilnærmet likt, men vil medføre noe avvik i beregningene, som må tas hensyn til. Figur 2.10 illustrerer hvilke faktorer som begrenser driftsegenskapene til turboladeren, nemlig pumping, kvelning og det maksimalturtallet til kompressorhjulet.



Figur 2.10 Kompressorkartet benyttet i oppgaven

Pumping kan forklares som et instabilitetsproblem forårsaket av at luften strømmer "feil vei" gjennom diffusoren, vist ved den røde linjen. Dette er ikke ønskelig da turboladeren kan ta skade av at luftens retning forandres ([Borg Warner, 2020](#)). Strømningsmengden av luft som kommer inn i kompressoren er normalt begrenset av innløpsarealet. Den grønne linjen viser når turboladeren ikke lenger er i stand til å øke strømningsmengden med luft,

og hvor turboen "kveles" ([Borg Warner, 2020](#)). Den gule linjen viser det maksimale turtallet, og er avgjørende for hvor stor massestrømmen av luft, og trykkforholdet kan bli. I tillegg til disse linjene, består kompressorkartet av koter eller høydekurver, som sier noe om virkningsgraden til turboladeren i forhold til ideelle verdier.

2.4 Sensorer

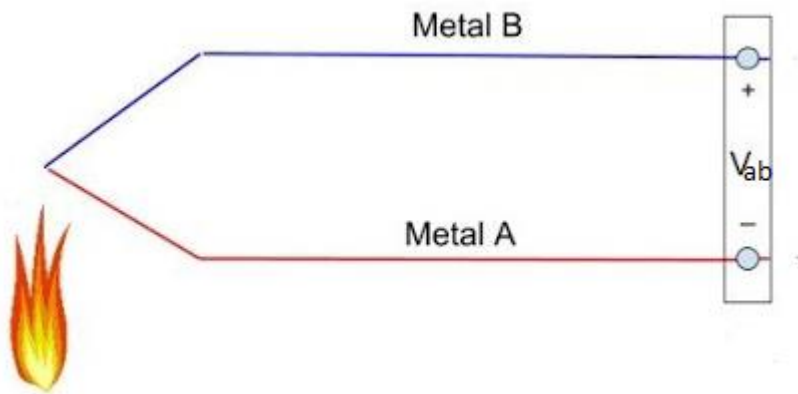
Sensor er et begrep som er mye brukt i flere sammenhenger, og er en betegnelse de fleste er kjent med. Oppgaven vil videre definere en sensor som en innretning som kan måle en fysisk størrelse og omforme dette til et lesbart signal (Hanssen 2015, s. 27). Det fins flere ulike typer sensorer, og videre vil oppgaven ta for seg de vanligste sensortypene som har blitt vurdert eller benyttet. Dette innebærer hovedsakelig temperatur-, trykk- og turtallsensorer.

2.4.1 Temperatursensorer

Det fins flere måter å måle temperatur på. De tre mest brukte metodene i industrien er ved bruk av termoelement, RTD og termistor (Hanssen 2015, s. 72). Disse tre typene benytter materialeegenskaper som enten er temperatur-avhengig resistans, eller temperatur-avhengig spenning. Da samtlige av temperatursensorene benyttet i oppgaven er av typen termoelement, vil denne derfor bli prioritert.

Et termoelement består av to tråder av ulike metaller som er koblet sammen i et knutepunkt, også kalt varmpunkt (Hanssen 2015, s. 72). Det oppstår en målbar spenning i knutepunktet, som er lineær proporsjonal med temperaturen i kontaktpunktet. Denne temperaturen kan måles i forhold til et kaldpunkt (referanse-/kontaktpunkt) for å finne temperaturen i målepunktet (se Figur 2.11). Elementets følsomhet α , er angitt i $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Dette er et mål for spenningen som oppstår når to metaller av ulik temperatur kommer i kontakt med hverandre, også kalt Seebeckeffekten (UiO, 2020). Termoelementer reagerer forholdsvis raskt på grunn av liten varmekapasitet i kontaktpunktet og et lite kontaktpunkt. De er også relativt nøyaktige, typisk $\pm 1^\circ\text{C}$ (Hanssen 2015, s. 73). De ulike typene termoelement deles inn etter hvilke temperaturområder de opererer i, og hvilke typer metal-

ler de består av. De tre vanligste termoelementene er type J, K og T. Alle temperatursensorene benyttet i oppgaven er av type K. En oversikt over temperaturområdene og legeringene i de ulike typene termoelementene, er gitt i Tabell 2.2. Måleprinsippet skissert i figur 2.11 (Beno, 2020)



Figur 2.11 Måleprinsipp for termoelement med varmpunkt til venstre og kaldpunkt (V_{AB}) til høyre. (Benoheating, 2020)

Type	$\alpha(\mu V/C)$	Temperaturområde($^{\circ}C$)	Metall(legering)
<i>J</i>	50	-200 til 1200	Jern/Konstantan
<i>K</i>	39	-200 til 1372	Chromel/Alumel
<i>T</i>	38	-200 til 400	Kopper/Konstantan
<i>S</i>	6	-50 til 1768	Platina-Rhodium/platina

Tabell 2.2 Karakteristika for fire ulike typer termoelement (Sauter, 2018)

2.4.2 Trykksensorer

Trykksensorer benyttes til å måle trykkforandringer i forhold til et referansepunkt, og et eksempel på utforming er illustrert i figur 2.12. Trykksensorene deles inn i tre kategorier: absolutt trykk, relativt trykk og differansetrykk (Engebretsen 2013, s. 240). Det absolutte trykket angis i forhold til absolutt 0, også kalt vakuum. Relativt trykk er trykket som måles relativt til atmosfærisk trykk (omgivelsen), altså der atmosfæretrykket er nullpunkt. Differansetrykk er trykket der referansepunktet er et annet målepunkt. Oppgaven benytter kun trykksensorer som måler absolutt trykk, og alle disse sensorene tar i bruk samme måleprinsipp.



Måleprinsippet går ut på at en piezo-resistiv bro konverterer det målte trykket til en standardstrøm eller spenning (4-20mA eller 0-10V) som utgangssignal (Aplisens, 2020). Den piezo-resistive broen er adskilt fra mediet som skal måles, ved hjelp av en innebygd mellomliggende membranforsegling som inneholder et manometrisk fluid³. Når sensoren blir påvirket av et trykk, vil trykket presse på membranen. Sensoren kan dermed måle trykket i flere ulike typer medium. **Figur 2.12 Illustrasjon av en trykksensor (Wika, 2020)**

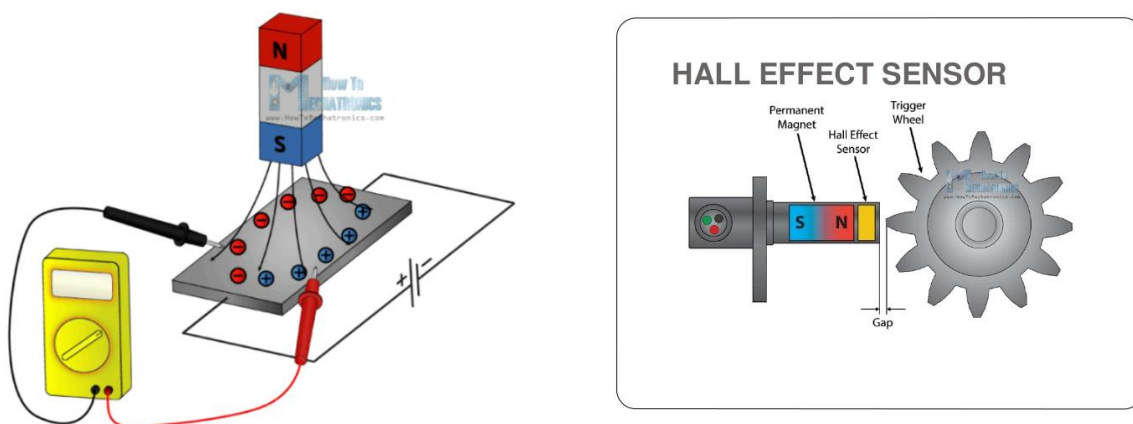
2.4.3 Turtallsensorer

Turtallsensorens oppgave er å måle rotasjonshastigheten til et objekt som roterer, og angis vanligvis i rpm (revolutions per minute). Det fins flere ulike metoder for turtallsmåling, deriblant optiske hastighets sensorer, stroboskop, induktive sensorer, og hall-effekt sensor. Da oppgaven benytter en hall-effekt-sensor, vil denne få mest fokus, mens de andre sensorene kun vil bli nevnt i korthet.

En optisk hastighetssensor sender ut et infrarød-lys mot en reflekterende tape-bit på måleobjektet, for eksempel en roterende aksling, som returnerer til sensoren i form av pulser. Et stroboskop på sin side består et blinkende lys med en frekvens, som justeres slik at den blir lik hastigheten til måleobjektet, og behøver ikke en reflekterende tape for å sende og motta signal (Max Sievert, 2020). Induktive sensorer baserer seg mye på samme prinsipp

³ Et fluid som benyttes til trykkmåling.

som Hall-effekt sensoren, men skilles i praksis ved at induktive sensorer kan gi ut analoge⁴ signaler⁵, mens Hall-effekt ofte gir pulser. Prinsippet bak hall-effekt sensoren er måling av elektrisk spenning som oppstår på grunn av et magnetfelt (Electronics-tutorials, 2020). Elektrisk spenning oppnås ved å sette strøm på en strømledende plate og plassere en magnet mot platen, slik at de positive og negative ladningene skilles, se figur 2.13 (venstre). Dette skaper en målbar spenning, kalt Hall-effekten. Ved å plassere sensoren med liten klaring til et måleobjekt vil man kunne merke endringer i magnetfeltet i form av regelmessige pulser ved gitt frekvens, som blir brukt til å bestemme rotasjonshastigheten.



Figur 2.13 Hall-Effekten (venstre) og Hall-effekt sensoren (høyre)
(howtomechatronics, 2020)

2.5 Måleteknikk

I dette delkapittelet forklares teorien bak måleteknikken som benyttes for måling av de nødvendige temperatur- og trykkverdiene. Valg av måleteknikk benyttet i oppgaven er bl.a. basert på metoder benyttet i luftfarten, og selve konstruksjonen og implementeringen av disse måleinnretningene forklares i nærmere i kapitel 3.

⁴ Analog betyr her at man får en avstandsmåling

⁵ Et signal er her definert som oppløsningen til måleverdien

2.5.1 Trykkmåling av luft

I alle de 4 målepunktene er det nødvendig å måle trykket i forhold til absolutt 0, og inkluderer både statisk og dynamisk trykk. Statisk trykk er kun avhengig av fluidets masse, mens dynamisk trykk oppstår på grunn av at luften er i bevegelse. Summen av disse kalles stagnasjonstrykket eller totaltrykket. Det statiske trykke betegnes P1 og stagnasjonstrykket med P01. Gassturbinen er avhengig av trykkforholdet både mellom P02/P01 og P04/P03 for å kunne gjøre beregninger av effekten til kompressoren og turbinen. Grunnen til at oppgaven måler P1 i målepunkt 1, er på grunn av at den ikke er montert nærme nok innsuget til kompressoren til også å kunne måle det dynamiske trykket som oppstår (samme prinsippet gjelder for statisk temperatur). Det er derfor nødvendig å se nærmere på strømningsforholdet til fluidet for å finne riktig plassering av trykksensoren.

Når det gjelder strømningsforholdene, skiller man mellom laminær og turbulent strømning (Lund, 2012, s.194). Ved laminær strømning vil hastigheten til fluidet være lav, og fartskurven være parabelformet slik som vist i figur 2.14 (venstre). Farten vil da være størst i sentrum og null ved rørveggen. Ved turbulent strømning har farten økt over en viss grense, og strømningslinjene er ikke lengre parallelle. Farten er fortsatt null ved rørveggen og vil også være størst i senter av røret (Lund, 2012, s.194). Oppsummert vil det si at trykksensoren må plasseres i senter av røret, for å kunne måle det høyeste stagnasjonstrykket.

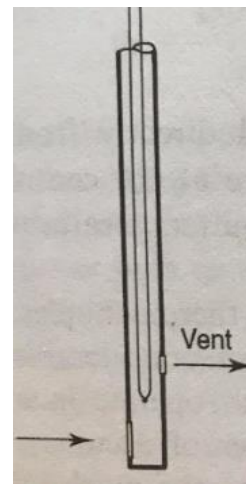


Figur 2.14 Laminær strømning (venstre) og turbulent strømning (høyre) (SimScale, 2020)

2.5.2 Temperaturmåling av luft

Alle temperaturene som skal måles i oppgaven er av typen stagnasjonstemperatur (T_0), som etter samme prinsipp som for trykk er summen av statisk (T_1) og dynamisk temperatur. Hastigheten til luften i et rør påvirkes av friksjonen i røret, som vil føre til en liten temperaturøkning. Temperaturøkningen vil være med på å varme opp luften som strømmer igjennom røret. Friksjonen fører også til en økning i indre energi og en reduksjon i kinetisk energi i luften (Saravanamuttoo, 2009, s.288). En luft hastighet på 300m/s, gir en økning på rundt 40K. Av den grunn er det ønskelig å måle hvor mye av hastighetsenergien til luften som måles som temperatur. Dette gjøres ved å plassere sensoren i et metallrør hvor luftstrømmen kommer til ro uten varmeoverføring, slik at hele den dynamiske temperaturen kan måles.

Måleprinsippet bygger på pitot-effekten, som er den samme som ved måling av stagnasjonstrykk. Uten bruk av pitot effekten, hadde det bare vært mulig å måle den statiske temperaturen. Det fins ulike utforminger av pitotrøret, og figur 2.15 viser typen som er benyttet til temperaturmåling i oppgaven. Den består av et rett rør med to hull av ulike størrelse plassert slik figuren viser, og benyttes når varmestrålingen, hvor sensoren er plassert, er lav (Saravanamuttoo, 2009, s.289). Plasseringen av sensoren blir i senter av røret, med bakgrunn i at der er den dynamiske hastigheten får sin høyeste verdi.



Figur 2.15 Pitotrør (Saravanamuttoo, 2009)

2.6 PLS

Figur 2.16 viser en Programmerbar Logisk Styling (PLS), som er et kontrollsystem mye brukt industrien (Hanssen 2015, s. 3). Til en viss grad fungerer en PLS som en datamaskin som kan motta, lagre, bearbeide og videresende informasjon ved hjelp av innganger og utganger. Hovedkomponentene er knyttet sammen med ledninger/kobberbaner, også kalt busser, og all kommunikasjon i PLS-en foregår via disse bussene (Hanssen 2015, s. 8).

Videre består PLS-en i hovedsak av en CPU⁶ (sentral prosesseringsenhet) som styrer informasjonsflyten og utførelse av programmene, et minne med en viss lagringskapasitet, en kommunikasjonsenhet og en strømforsyning. Disse 4 funksjonen omfatter selve kontrolleren. Det er (som oftest) også mulig å utvide en PLS ved å legge til flere inn- og utganger i form av moduler. Dette gjør det mulig å ta imot og omforme flere typer signaler (f.eks. av temperatur- og trykksensorer), og gjør PLS-en til et meget fleksibelt kontroll- og styringssystem.

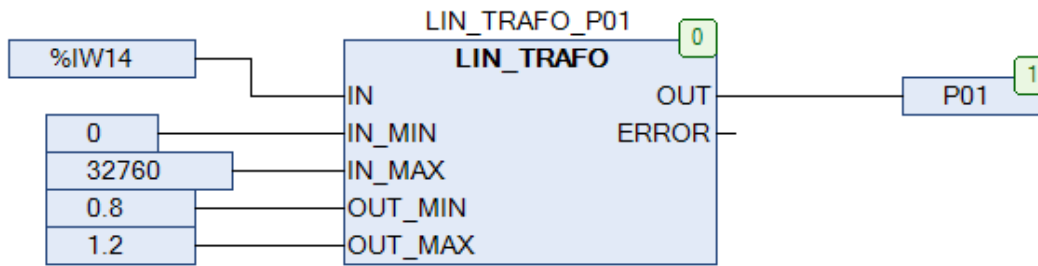


Figur 2.16 PLS (RIEVTECH, 2020)

2.6.1 E!cockpit

E!cockpit er en automatiseringsprogramvare som brukes til å programmere og kommunisere med PLSen (WAGO, 2020). Programvaren brukes til å programmere et program til PLSen ut ifra hva PLSen brukes til, men når PLSen har sitt program så trenger den ikke E!cockpit lenger for å snakke med PCer eller en annen programvare. Det finnes ulike programmeringsspråk, men i E!cockpit blir programmeringen gjort ved hjelp av funksjonsblokker. Ved hjelp av ulike funksjonsblokker, bestemmer e!cockpit hvordan signalene fra PLSen skal behandles. Programmet er derfor styrende for tolkning, bearbeiding og videresending av informasjon fra og til PLSen. Figur 2.17 viser hvordan en funksjonsblokk i programmeringsspråket, Continuous flow chart (CFC), ser ut. Dette er en funksjonsblokk som omformerer et digitall signal inn (et tall mellom 0-32760, tilsvarende sensorsignalet på 4-20mA), til et signal ut som er korrekt tolket i forhold til en bestemt sensor (her som verdi 0,8-1,2 bar).

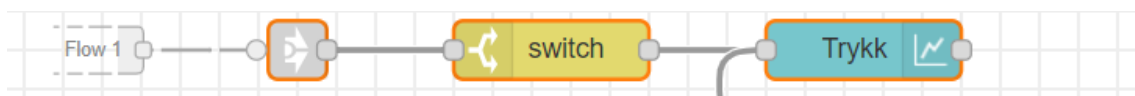
⁶Central processing unit



Figur 2.17 Eksempel på funksjonsblokk i E!cockpit

2.6.2 Node-RED

Node-RED er et programmeringsverktøy som blir benyttet til styring, loggføring og overvåkning av rå-dataene fra PLSen. Node-RED brukes til å lagre verdiene i en database (på nettet eller lokalt på PLSen), og fungerer dermed som et bindeledd mellom PLSen og andre datamaskiner. Node-RED inneholder paletter som fungerer som tilleggspakker i programmet. Paletter kan ses på som (et sett av) funksjoner. Funksjonene kalles også for noder ([Noderedguide](#), 2020). Ved å koble flere noder sammen, kan de kommunisere med hverandre, overvåke endringer og videresende informasjon til andre programmer eller maskiner. Et eksempel på noder som brukes er vist i Figur 2.18, hvor Flow 1 mottar/sender ut innsamlet data, switchen fordeler dataen basert på regler eller dataen den inneholder og den siste, trykk, er en grafisk visning av et sett data i et brukergrensesnitt.



Figur 2.18 Eksempel på noder i Node-RED

3 Videreutvikling av turbolader-basert gassturbin

Punkter fra en egen test og fra anbefalinger som ble gitt i bacheloroppgaven som utviklet modellen, ble styrende for hva som ble utviklet videre. Dette kapitlet tar for seg prosessen for valg av utstyr, med begrunnelser og argumentasjon på hvorfor valgene ble tatt. Avgjørelsene baserer seg på en kombinasjon av litteratur, samtaler med fagfolk og egne vurderinger opp mot målene.

3.1 Analyse av modellen før instrumentering

For å identifisere tilstanden til gassturbinen og dens komponenter, gjennomføres først en analyse av modellen før det blir gjort noen form for modifikasjoner. Analyse av modellen er oppgavens første mål. Analysen tar utgangspunktet i den første testkjøringen som ble gjennomført av gassturbinen i begynnelsen av dette prosjektet. Det vil si at gassturbinen ble testet "som den var", for å tidlig kunne avdekke eventuelle lekkasjer og/eller feil som bør utbedres. Testen er også brukt til å kartlegge hvilke utbedringer som kreves utover målene.



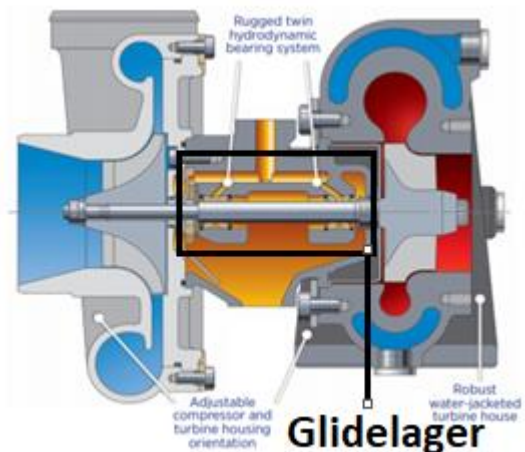
Figur 3.1 Utseende til gassturbinen før den blir videreutviklet

For lettere å kunne forstå hvordan gassturbinen opererer, følger en kort forklaring om hvordan en oppstart gjennomføres i grove trekk:

Oppstart av gassturbinen, vist i figur 3.1, krever brennstoff, nøkkel til brennstoffsystemet, strøm på batteriet og en løvblåser til å hjelpe turboen opp i turtall før brennstoffet slippes inn og antennes. Før løvblåseren blir brukt, startes oljepumpen og vannpumpen. Oljetrykket stilles til ønsket verdi, mellom 1,5-3 bar, ved hjelp av en bypassventil. Brennstofftrykket justeres enkelt ved hjelp av en reguleringsventil. Under kjøring overvåkes temperaturen og trykket til oljen, samt temperaturen til vannet. Det gjøres ved å se på de analoge målerne på kontrollpanelet. Noen av temperaturene i gassturbinen kan leses av ved hjelp av en liten LCD-skjerm på kontrollpanelet.

3.1.1 Oljetrykksproblem

Akselen som forbinder turbinhjulet med kompressorhjulet, hviler i to glidelager. For at en turbolader skal fungere tilfredsstillende, kreves det kontinuerlig tilførsel av olje med et visst trykk. Oljetrykket senterer akselen i lageret og oljen fungerer dermed som en beskyttende film mellom akselen og glidelageret (se figur 3.2). Ved manglende olje og oljetrykk øker friksjonen og turboladerens lagre kan rive seg.



Figur 3.2 Glidelager i en turbolader (Borgwarner, 2020)

Et forbedringspunkt som ble gitt i anbefaling i "*konstruksjon av gassturbin til undervisningsformål*", var å kunne opprettholde oljetrykket under langvarig drift av gassturbinen. Etter den første testkjøringen av gassturbinen ble det oppdaget olje på bunnplaten til rammen. Oljelekkasjen var lokalisert rundt oljetanken og servopumpen. Det ble også observert lekkasjer på AN koblingene som var koblet til filter, oljekjøler og servopumpe. Da det tidligere var benyttet gjengeteip som tetningsmiddel, ble det bestemt å erstatte dette med Loctite 542, som skal være ideelt til tetting av hydrauliske koblinger (Loctite, 2020). Etter en ny oppstart av anlegget ble de konkludert med at lekkasjen var redusert, men at det enkelte steder var spor av olje etter kjøring. Dette var spesielt rundt servopumpen, hvor det kan se ut som at O-ringen i selve pumpen er slitt.

Ved den første testkjøringen ble det også sett nærmere på oljetrykkproblemet. Under kjøring ble det også her oppdaget et oljetrykksfall, men det var likevel mulig å holde et stabilt oljetrykk på ca. 2 bar over en lengre periode ved å holde brennstofftilførselen konstant på ca. 1 bar. Etter samtale med fagkyndig personell på motorverkstedet ved UVB-bunkeren, ble det besluttet å montere en strupeventil på oljereturen fra turboen (Figur 3.3). Dette skulle i utgangspunktet gjøre det mulig å regulere (og dermed også redusere) mengden olje som gikk i retur, for å øke trykket på oljen ved innløpet. Etter andre testkjøring av gassturbinen ble det oppdaget at strupeventilen hadde liten effekt, og mulig årsak til dette blir nærmere drøftet i kapittel 6. Da det likevel var mulig å kjøre gassturbinen i over 40 minutter uten stans ved oppgitt olje- og propantrykk, ble dette ansett som tilfredsstillende nok til å kunne se på andre utviklingsområder ved plattformen.



Figur 3.3 Strupeventil

3.1.2 Overvåkningssystemet

Siden oppgaven omhandler overvåkning av en turboladerbasert-gassturbin, er det essensielt å se på hvilke måleinstrumenter som allerede er blitt montert. Tidligere var det montert termoelement ved T01, T02 og T04. I tillegg var det mulig å koble til totalt 4 termoelement som kunne leses av på en liten LCD-skjerm⁷ på kontrollpanelet (se figur 3.4). Et problem som ble avdekket under testkjøringen, var at LCD-skjermen hadde en jordingsfeil som medførte at avlesning ikke var mulig hvis alle termoelementene var tilkoblet samtidig. I tillegg har kontrollpanelet kun fire tilkoblingsmuligheter for sensorer, hvorav alle er til temperatur. Dette gjør det vanskelig å utvide med turtall- og trykksensorer, uten å



Figur 3.4 LCD-skjerm

⁷ Liquid crystal display

måtte gjøre større endringer på kontrollpanelet. Det er heller ikke konstruert innretninger for å kunne måle stagnasjonstrykk og stagnasjonstemperatur. Med bakgrunn i dette er det bl.a. besluttet å anskaffe nye sensorer, et nytt kontrollpanel og å erstatte hele det elektriske anlegget.

3.2 Valg av overvåkningssystem

Valg av monitorerings- og overvåkningssystem baserer seg hovedsakelig på målene gitt i kapittel 1. Det fins flere alternativer til valg av kontrollsystem for en slik gassturbin. Både Arduino og Raspberry Pi er små programmerbare plattformer som fungerer som en slags datamaskin. De kan sammenlignes størrelsesmessig med et kredittkort, og er billige å anskaffe. I oppgaven ble det derimot valgt å benytte PLS som kontrollsystem, istedenfor for den allerede eksisterende Arduinoen. Alle de tekniske linjene ved Sjøkrigsskolen er kjent med PLS gjennom undervisning, noe som gjør at den innehavende kunnskapen kan bygges videre på hvis PLS velges som overvåkingssystem. Raspberry Pi og Arduino er ikke kjent for alle de tekniske linjene og vil dermed kreve noe mer arbeid for å lære seg. PLS er en kompakt, robust og modulerbart kontrollsystem som bl.a. gjør det mulig å oppgradere deler og videreutvikle uten å måtte lage alt fra bunnen av (mål 3). Arduino og Raspberry Pi på den andre siden er ikke like robust og utvidbar, men mye billigere og mer fleksibel i bruk. I tillegg har PLSen et kommunikasjonsgrensesnitt, som gjør det mulig å lese av og lagre målinger på en PC (mål 1). Til sammenligning kan dette også utføres på både Arduino og Raspberry Pi, men krever mer omfattende programmering. PLS har den fordelen at de mest omfattende delene er selve komponentene (som er tilrettelagt for akkurat den bruken man trenger). PLS har sin fordel ved at den er veldig enkel å programmere og benytte når først montert. Etter samtale med fagkyndig personell fra Wago Norge, ble oppgaven tilbudt sponing og anbefaling av PLS med moduler, for å se hvordan deres produkter kunne samarbeide med en slik plattform. På bakgrunn av de økonomiske fordelene og PLSens egenskaper, valgte oppgaven derfor å benytte seg av de gitte anbefa-



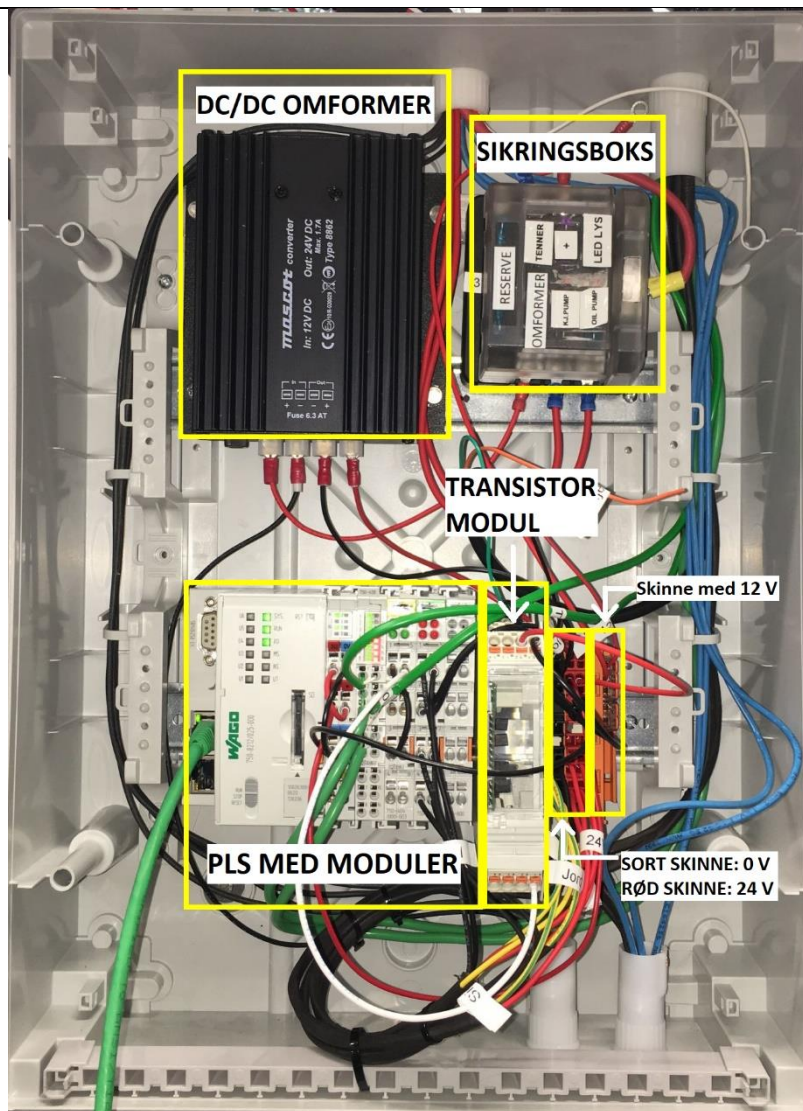
Figur 3.5 PLSen benyttet i oppgaven (Wago, 2020)

lingene. Dette innebærer en 750-8212 kontroller (figur 3.5), 750-404/000-003 Frekvens-teller og en 750-458 modul for temperatursensorene. I tillegg hadde skolen en ekstra 750-455 modul for 4-20mA-signaler.

3.2.2 Det elektriske anlegget

Ledningsnettets som utgjør det elektriske anlegget er i prinsippet likt som tidligere, som vil si at de samme ledningene til oljepumpe, oljetrykksmåler, oljetemperaturmåler, vannpumpe, vanntemperaturmåler, tenningssystem og timeteller fortsatt blir brukt. Forskjellen er at oppgaven har byttet ut Arduino med PLS, og dermed har måttet utført tilhørende endringer for at systemet skal kunne fungere. Et 12 V batteri forsyner det elektriske anlegget med strøm. PLSen på sin side trenger 24 V til strømforsyningen. For å løse dette problemet ble det kjøpt inn av en DC/DC omformer, som omgjør 12 V til 24 V. På denne måten får PLSen tilført korrekt spenning, altså 24 V. Modulene som er koblet til PLSen mottar signaler fra henholdsvis turtall-, trykk- og temperatursensorene, på hver sin modul. Både trykk- og temperatursensorene kan kobles direkte til sine respektive moduler på grunn av at disse støtter rett type signal (K-element avlesning og 4-20mA-signaler henholdsvis). Turtallsensoren sender derimot ut 5 V-pulser som signal, men frekvenstelleren («turtalls-modulen») forventer 24 V-pulser som inngangssignal. Oppgaven har derfor anskaffet en transistor modul⁸, som omgjør 5 V signalet fra sensoren til 24 V som går til modulen. Oppgaven benytter samme sikringsboks med tilhørende fordeling til kontrollpanel, tenning, pumper og vifter, som allerede var montert på gassturbinen. I tillegg ble det plassert 3 typer ekstra rekkeklemmer/koblingsklemmer for henholdsvis 0, 12 og 24 V. Dette er gjort for å ha nok koblingspunkter til å kunne levere riktig spenning til alle komponentene. For å få plass til alt dette, ble det som nevnt besluttet å plassere alt i et eget el-skap. Alt dette er illustrert i Figur 3.6.

⁸ Modul som forsterker signaler



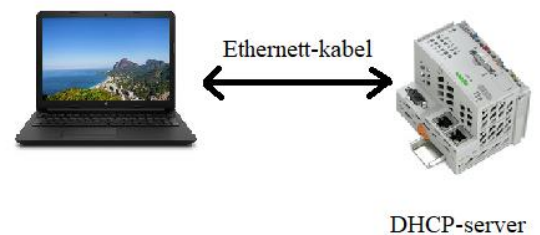
Figur 3.6 El-Skapet

Når det gjelder det opprinnelige kontrollpanelet, var hele det elektriske anlegget plassert på baksiden av kontrollpanelet I tillegg var det montert 4 innganger til temperatursensorene og en LCD-skjerm. Det gamle kontrollpanelet ble oppfattet som lite arealeffektivt, og det ble valgt å komprimere dette både på grunn av praktiske- og sikkerhetsmessige årsaker. Fordelen med det tidligere oppsettet, var at man kunne lese av temperaturene direkte av skjermen for bedre evne til overvåking. Denne muligheten er midlertidig fjernet grunnet bytte av Arduinoen, som drev både skjermen og sensorinngangene. Oppgaven har derimot et ønske om å kunne lese av både temperatur, trykk og turtall direkte fra kontrollpanelet, og har derfor tilrettelagt for å kunne montere en større overvåkingsskjerm. Det er tatt utgangspunkt i en 7" touch skjerm fra Wago, men dette er kun én av

flere muligheter. Det visuelle resultatet av utbedringene og en sammenligning av det gamle og det nye, blir vist i kap. 4.

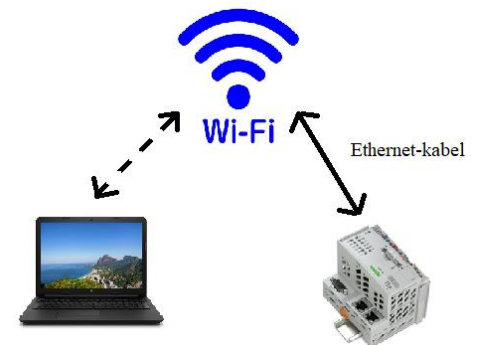
3.2.3 Digitalt brukergrensesnitt

For å kunne lese av og lagre dataene fra kjøringen av gassturbinen, benyttes Node-RED som lagring- og overvåkningssystem og dermed også som brukergrensesnitt. For å få tilgang til brukergrensesnittet, fins det to alternativer. Man kan endre hvilket alternativ man ønsker ved å gå inn på Wago sin web based management-side (wbm) når PLSen er aktiv (Se vedlegg D). Den ene metoden er å kjøre programmet ved å bruke PLSen som Dynamic Host Configuration Protocol-server (DHCP⁹). Dette gjør at PCen kan få en passende IP fra PLSen, som gjør PCen i stand til å hente ut dataene fra PLSen uten tilgang til internett. Man er her avhengig av at PC og PLS er koblet sammen via en ethernet-kabel (se Figur 3.7).



Figur 3.7 Tilkobling med Ethernet-kabel

Det andre alternativet er trådløs tilkobling mellom PC og PLSen. For å få dette til, må PLSen og PCen befinne seg på samme WiFi/nettverk. Her må PLSen være tilkoblet nettverket med kabel, men PCen trenger ikke kablet tilkobling. Den ene metoden gjør det mulig koble til PLSen gjennom WiFi, så lenge man befinner seg på samme WiFi (Figur 3.8). En slik tilkobling kan være greit om man benytter en stasjonær PC, som ikke har mulighet til direkte tilkobling med PLSen med mindre man har en veldig lang ethernet-kabel. Den andre metoden gjør gassturbinen mer mobil i form av at man bare trenger å koble seg til PLSen med Ethernet-kabel (figur 3.7), for å kjøre forsøk ulike steder.

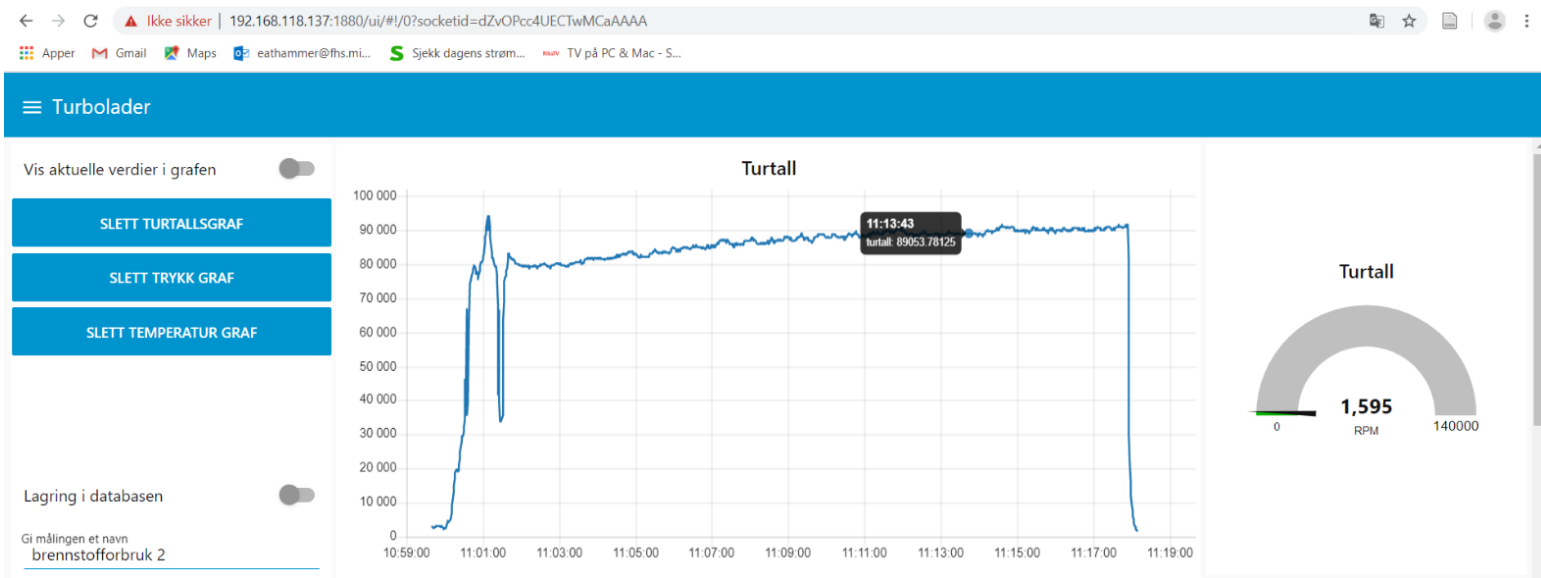


Figur 3.8 Tilkobling med WIFI

Når det gjelder selve utformingen av brukergrensesnittet, finner man et utklipp i figur 3.9. For å få tilgang må PLSen være aktivert/ha strøm, og man må skrive inn

⁹ En kommunikasjonsprotokoll som brukes i IP datanettverk

<http://192.168.118.137:1880/ui> i nettleseren (se Vedlegg D for mer detaljert forklaring). Etter en stund vil man komme til det som kan se ut som en nettside, som vist i figur 3.9. Selv om det kan se ut som man benytter internett til å observere dataene under kjøring, er ikke dette tilfellet, siden Node-RED har en egen web-server som viser informasjonen som den henter fra PLSen. På denne "nettsiden" kan man aktivere "Vis alle verdier i grafen" øverst til venstre for å få opp de målte verdiene direkte. Man kan i tillegg velge "Lagring i databasen", og resultatene vil da lagres på en egen database, hvor man kan hente ut disse ved et senere tidspunkt. Ved å "vise alle verdier i grafen" vil dataene kun være tilgjengelig så lenge man er på denne siden, men vil ikke bli lagret noe sted (ren overvåking uten loggføring). I tillegg vil man, når nettsiden er i bruk, kunne dra pilen over resultatene for å få ut nøyaktige tider og verdier, som vist i figur 3.9. På denne siden vil man kunne se totalt 4 ulike grafer: en for turtall, en for trykk (P01, P02, P03 og P04 i samme graf) og to for temperatur (T01 og T02 i en graf, og T03 og T04 i en annen graf). Det er disse grafene som er kilde for flere av resultatene i kapittel 5. Bakgrunnen for valg av grafenes oppsett blir nærmere drøftet i kapittel 6.



Figur 3.9 Utklippsbilde av brukergrensesnittet

3.3 Valg av temperatursensorer

Valg av temperatursensor er gjort på bakgrunn av temperaturene som kan oppstå i de ulike målepunktene. For å kartlegge temperaturene er det tatt utgangspunkt i relevant litteratur og empiriske data fra to tidligere bacheloroppgaver. Den ene oppgaven er hentet fra HVL (Bergquist, Espen og Seth, Magnus, 2014) og den andre er den samme som denne oppgaven bygger videre på (Finden og Panfilovs, 2019). Disse testene gir en god pekepinn på hvilke temperaturer det vil være mulig å forvente i de ulike områdene:

T01	T02	T03	T04
10,3°C (283.3)	113,9°C (387K)	832°C (1105K)	443°C (716K)

Tabell 3.1 Resultater fra gassturbin på HVL (Bergquist, Espen og Magnus Seth, 2014)

T01	T02	T03(utside)	T04
20,0 °C (293K)	131 °C (404K)	305°C (578K) (utside)	370 °C (675K)

Tabell 3.2 Resultater fra gassturbinen i denne oppgaven utviklet på SKSK (Finden og Panfilovs, 2019)

Det vil være viktig med temperatursensorer som reagerer raskt på endringer, og som samtidig har en høy grad av målenøyaktighet. I tillegg er det andre faktorer som spiller inn, og dette oppsummeres med følgende krav til temperatursoner:

- Må være tilpasset de ulike målepunktene
- Reaksjonstid på under 3s
- Maksimalt måleavvik på ± 5 °C.
- Pris som passer til budsjett

For å begrense utvalget av sensorer, ble det bestemt å se nærmere på termoelement av typen J, K og S. Termoelementet av typen S er mye brukt for å måle høye temperaturer helt opp til 1762 °C (Sauter, 2018). Disse blir blant annet brukt i bioteknologi og farmasøytisk industri bruker disse siden de også har en høy nøyaktighet og er stabile ([Thermocoupleinfo](#), 2020). Ulempen er at den er dyrere enn type K og J. Type J er et mye brukt termoelement som er lik type K både når det gjelder pris og nøyaktighet. Ulempen er at type J har et mindre måleverdiområde og kortere levetid ved høye temperaturer, enn det type K ([Thermocoupleinfo](#), 2020). Forskjellen på den høyeste måleverdien de kan måle, ut ifra oppgitte måleverdiområde, skiller dem med 172°C (Sauter, 2020). Siden temperaturen i brennkammeret potensielt kan nå 1500K (Saravanamuttoo, 2009, s. 85), vil ikke type J elementet oppfylle kravene til måleverdiområde som er gitt for temperatursensoren i brennkammeret. Type K er blant de aller mest brukte termoelementene og er billig, nøyaktig og har et bredt målområdet. Basert på dette ble det bestemt å gå til anskaffelse av type K element, og etter å ha analysert antatte oppnåelige temperaturer i de ulike målepunktene, ble følgende sensorer bestilt:



Comark AK27M (K-element), T01 & T02:

- Temperaturområde: -100 til +250°C
- Reaksjonstid: 0,4s
- Nøyaktighet: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$
- Pris: 640.-

Figur 3.10 Comark AK27M (Impex, 2020)



K0234D (K-element), T03:

- Temperaturområde: -200 til +1000°C
- Reaksjonstid: 0,6s
- Nøyaktighet: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$
- Pris: 993.-

Figur 3.11 K0234D (Elma-instruments, 2020)



108 Luft/Røykgasstemperaturføler T04:

- Temperaturområde: -50 til +1000°C
- Reaksjonstid: 2s
- Nøyaktighet: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$
- Pris: 935.-

Figur 3.12 Luft/Røykgasstemperaturføler (Elma-instruments, 2020)

Et problem som derimot oppstod da måleinnretningen skulle konstrueres, var problemer med tilpasning av måleinnretningene. Den fysiske størrelsen på sensorene var for stor, og passet ikke slik det var tiltenkt. Samtidig viste det seg at de var større og mer "klumpete" enn hva først antatt, og passet dermed ikke så bra i de valgte målepunktene på gassturbinen (både av praktiske og estetiske årsaker). Det ble dermed nødvendig å se etter andre muligheter. Løsningen ble at oppgaven fikk tildelt 3 stk termoelement av typen K, som maskinlabben på Sjøkrigsskolen hadde kjøpt inn ved et lignende formål tidligere. Disse hadde ikke blitt brukt, og passet samtidig mye bedre til det tiltenkte designet for måleinnretningene da de kun var 1,5mm tykk og tok opp mindre plass. Etter rådføring med veileder ble det besluttet å plassere termoelementene i målepunkt 2, 3 og 4. T02, T03 og T04. Det ble også konkludert med at den ene innkjøpte sensoren Comark AK27M, kunne benyttes ved målepunkt 1.



Figur 3.13 JUMO 901250 (Jumo, 2020)

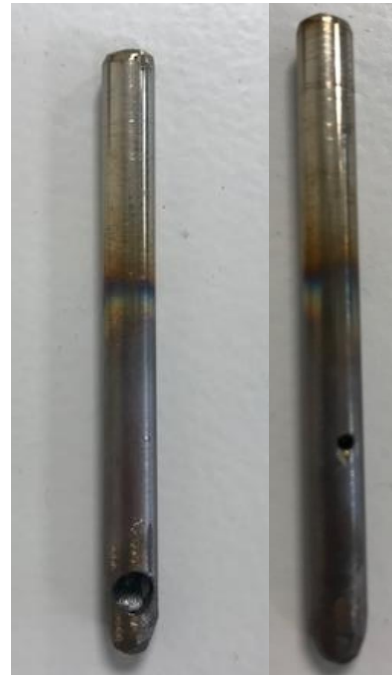
JUMO 901250 Termoelement

- Temperaturområde: -200 til +1200°C
- Nøyaktighet: ikke oppgitt
- Reaksjonstid: 0.15s
- Pris: gratis

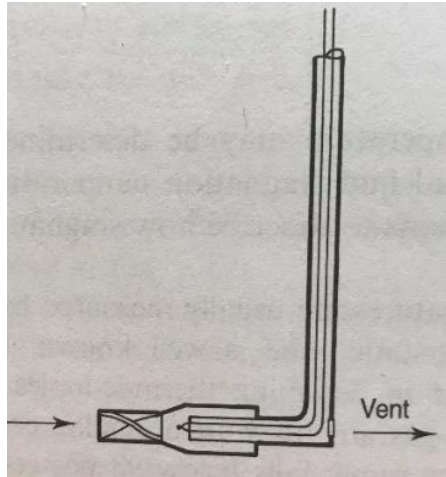
3.3.1 Montering av temperatursensorer

Monteringen av temperatursensorene er viktig for å kunne måle de temperaturene vi faktisk er ute etter. Eksempelvis hadde vært hvis termoelementet var plassert radielt i et rør hvor luft strømmer forbi. Man ville da kun klart å måle 60-70% av den dynamiske temperaturen (Saravanamuttoo, 2009, s.288). For å øke målenøyaktigheten har det derfor blitt konstruert egne pitotrør. Disse har et innløpshull som er rettet mot fartsretningen, og et hull til ventilasjon på motsatt side. En slik utforming gjør at man kan måle opptil 98% av den dynamiske temperaturen (Se Figur 3.14) (Saravanamuttoo, 2009, s.288). For å opprettholde pitot-effekten samtidig som hullet ventilerer, bør ikke ventilasjonshullet overskride 5% av innløpshullets størrelse. (Saravanamuttoo, 2009, s.288) En slik konstruksjon egner seg godt til områder der varmestrålingen er liten. I denne oppgaven vil den da fungere godt i området T02 og T01, siden det er her strålingseffekten liten (Saravanamuttoo, 2009, s.288). I områder hvor strålingseffekten derimot er stor, er det en annen type utforming av pitotrør som egner seg bedre til å måle temperaturen. Ved å lage en innretning som vist i figur 3.15, er det mulig å måle temperaturer opp til 1300K med et måleavvik på $\pm 5K$. Klarer man derimot ikke å konstruere skjermingen av sensoren som vist ved "tuppen", ville målenøyaktigheten blitt $\pm 60K$ ved samme temperatur (Saravanamuttoo, 2009, s. 288).

Det viste seg at konstruksjon av måleinnretningen vist i figur 3.15 ble mer komplisert enn først antatt. Årsaken er plassmangel i målepunktene på gassturbinen. Siden gassturbinen benyttet i oppgaven ikke er særlig stor, ble det valgt å gå for løsningen vist i figur 3.14. Denne løsningen tar mindre plass, men er litt mer unøyaktig på grunn av redusert beskyttelse mot varmestråling. En direkte konsekvens av plassmangelen i målepunktene er at røret måtte lages lite, med en diameter på 6mm. Av den grunn ble det vanskelig å holde seg til at ventilasjonshullet ikke bør overskride 5% av innløpshullets størrelse.



Figur 3.14 Måleinnretning termoelement Type 1



Figur 3.15 Måleinnetning termoelement Type 2 (Saravanamuttoo, 2020)

3.4 Valg av trykksensor

For å bestemme hvilken type trykksensor som skal benyttes i oppgaven, har det blitt tatt utgangspunkt i at den skal måle absolutt trykk. Videre har det blitt tatt utgangspunkt i følgende krav til trykksensor:

- Må være kompatibel med PLS
- Må kunne måle det absolutte trykket
- Må ha et trykkområde som ikke avviker for mye fra antatt måleverdi.
- Skal kunne være motstandsdyktig mot veldig høye temperaturer.

Basert på kompressorkartet (se figur 2.10), er maks trykkforhold mellom sugeside(P01) og trykkside(P02) antatt å være rundt 4 bar når turboladeren kjører med maksimalt turtall. Stabilt driftsområdet er derimot antatt å ligge i området 70-90.000rpm, og trykkforholdet vil derfor være noe lavere. (Finden og Misha, 2019). Det er likevel viktig at sensorene tåler noe høyere trykk enn antatt maks.

Det er ønskelig at trykksensorer har et arbeidstrykk som er tilnærmet middelveiden av sensorens måleverdiområde. Det vil si at hvis man ønsker å måle et trykk på rundt 2 bar, vil det lønne seg å benytte en sensor som har et målområde på 0-4 bar. Dette er for å gjøre avlesningen så nøyaktig som mulig. I tillegg er nøyaktigheten til sensoren gitt i prosentdel av det totale måleverdiområde. Det vil si at en trykksensor med 1% nøyaktighet, operere med en feilverdi på +/- 0,04 bar, hvis målverdiområde er 0-4 bar (Engebretsen, 2013, s. 222). Det ble konkludert med at både P02, P03 og P04 kunne benytte samme måleverdiområde, da trykket uansett ville være lavere enn den maksimale oppgitte på 4 bar. Etter samtale med veileder, ble det antatt et forventet trykk på rundt 1-2 bar ved målepunkt 3 og 4. Målepunkt 2 var noe mer usikkert, men ble likevel antatt til rundt samme måleverdiområde. Det ble derfor enighet om at trykksensorer med målområdet på 0-4 bar ville passe bra i disse tre områdene. Da trykket i målepunkt 1 vil være tilnærmet det atmosfæriske trykket til enhver tid, ble det valgt å se etter en sensor med middelveid på rundt 1 bar. Det er samme type sensor som er mye brukt på værstasjoner, da den gir nøyaktig endringer i det atmosfæriske trykket. Slike sensorer er veldig kostbare, noe som også er den største ulempen.

På grunn av manglende kompetanse på fagfeltet ble det søkt profesjonell hjelp ved valg av trykksensor. OEM Automatic, som er leverandør av trykksensorer, anbefalte først og fremst å benytte sensorer med et strømsignal på 4-20mA, fremfor et spenningsignal på 0-10V. Det skulle forhindre forstyrrelser fra de allerede spenningsatte ledningene til hjelpesystemene på gassturbinen, og gjøre avlesningen mer nøyaktig. I tillegg ble det anbefalt en tilkobling til sensoren som kunne gjøre det enklere å justere lengden på ledningene hvis nødvendig. Etter samtalen med leverandøren, var de villige til å gi gode rabatter da dette var et til utdanningsformål, og det ble dermed bestemt å anskaffe en Aplisens trykksensor i målområde 0,8-1,2 bar (figur 3.17), og tre sensoren av typen Aplisens trykksensor med måleverdiområde 0-4 bar (figur 3.16). Disse sensorene har en utgangsspenning på 4-20mA og en DIN- kobling¹⁰ som gjøre de enkelt å koble til PLSen.

¹⁰ DIN-Kobling: Standardisert tilkoblingsmetode.



Aplisens pcea0004.000 0-4 bar

- Målenøyaktighet; 0,2%
- Maks overtrykk: 16bar
- Tåler vann, luft og olje

Figur 3.16 Aplisens 0-4 Bar (Aplisens, 2020)



Aplisens pcea01.2.000 0,8-1,2 bar

- Målenøyaktighet; 0,2%
- Maks overtrykk: 16bar
- Tåler vann, luft og olje

Figur 3.17 Aplisens 0,8-1,2 bar (Aplisens, 2020)

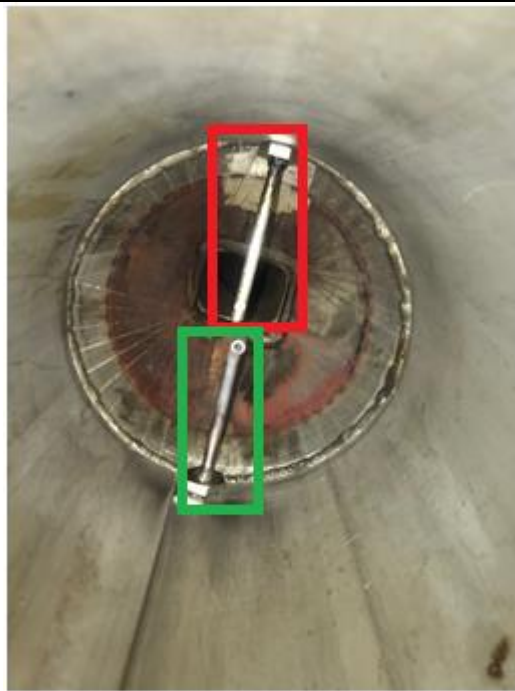
3.4.1 Montering av trykksensorer

I likhet med måleinnretningen for temperatur, kan pitot-effekten også nyttes til trykkmåling. Etter samme prinsipp nyttes pitotrøret til å måle stagnasjonstrykket i de respektive målepunktene. Pitotrøret er vinklet 90° med et hull i senter, som er rettet mot strømningsretningen. Pitotrøret er lagd i rustfritt stål, siden dette har et smeltepunkt på ca. 1350 °C (ca. 1600 K) (Nibu, 2020). For å kunne måle de høyeste trykkverdiene, er det viktig at pitotrøret er plassert i senter hvor trykket skal måles. Det er montert fire slike pitotrør, som fører luften videre til trykksensorene. Det er konstruert egne "plattformer" for trykksensorene, slik at de lett kan demonteres om dette skulle være nødvendig (se figur 3.21 til venstre). I målepunkt 1 er trykksensoren plassert uten et pitotrør, slik at det kun måler

det statiske trykket (P1). Denne skulle egentlig vært plassert ved innløpet til kompressoren slik at den kunne målt stagnasjonstrykket, men grunnet mangelen på materiell til en slik festeanordning, ble det vurdert til at dette var tilstrekkelig. Det er benyttet pitotrør på de resterende målepunktene, hvor det i tillegg er konstruert egne innretninger for kjøling av luften i målepunkt 3 og 4 (nærmere forklart i delkapittel 3.4.2). Figur 3.18 viser hvordan pitotrøret for trykk er plassert ved turbinutløpet. Figur 3.19 og 3.20 viser hvordan pitotrøret og måleinnretningen til termoelementet er montert i T03 og T04. Måleinnretningen for trykk er markert med grønt, og temperatur med rødt.



Figur 3.18 Illustrasjon av hvordan pitotrøret er plassert i T04



Figur 3.19 Måleinnretninger montert før turbin T03



Figur 3.20 Måleinnretninger montert etter turbin T04

3.4.2 Kjøleinnretning for trykksensorluften

Trykksensorene benyttet i oppgaven tåler kun en maksimumtemperatur på 130°C . Det er derfor viktig å kunne redusere temperaturen til luften/eksosen før den måles av trykksensorene, da temperaturene i brennkammeret som nevnt kan nå 1500 K . På bakgrunn av dette ble det konstruert kjølerør ved å benytte "grisehale"-prinsippet hvor temperaturene er på sitt høyeste (målepunkt 3 og 4). Begrepet forklarer utformingen av rørene, ved bruk av denne utformingen får de en stor overflate som kan kjøles ned av luften fra omgivelsene. Kobber har i tillegg god varmeledningsevne, som betyr at den både kan varmes opp raskt eller kjøles ned raskt uavhengig av hvilken varmekilde den påvirkes av. I oppgaven er det allerede montert to vifter, en til vannkjøleren og en til oljekjøleren. Luften fra disse viftene blir kontinuerlig utnyttet til å kjøle ned luften i kobberrørene, se figur 3.21 (bilde på venstresiden viser hvor trykksensorene skal plasseres).



Figur 3.21 Kjøling til trykksensorene

3.5 Valg av turtallsensor

Turtallet til roterende maskiner måles for å kontrollere hastigheten til akslingen, og på turboladeren i benyttet i oppgaven blir turtallet målt i kompressoren. Det er for eksempel nødvendig å vite turtallet til dieselmotorer, for å kunne kontrollere om motoren arbeider innenfor anbefalt turtallsområde fra produsenten. Måling av turtall er også viktig for gass-turbiner, da det kan være snakk om svært store sentrifugalkrefter. Selv om det allerede er oppgitt at det benyttes en hall-effekt-sensor til turtallsmåling i oppgaven, vil det videre bli presentert hvilke muligheter og vurderinger som ligger til grunn for nettopp dette valget. Følgende krav ble stilt for valg av turtallsensor:

- Sensoren må være varmeresistent
- Sensoren må kunne måle et turtall opp til 150.000rpm.
- Sensoren skal være kompatibel med PLSen
- Av praktiske årsaker ønskes det så liten diameter på sensoren som mulig (3-6mm)
- Pris som passer i budsjettet

Måleverktøyet for relativt enkle avlesningsmetoder er håndholdte målere, og har dermed ikke mulighet til å koble til PLS (Figur 3.22-3.24). Valg av disse måleverktøyene i denne oppgaven fører til redusert brukervennlighet og avviker fra kravene til turtallsensoren. I tillegg tilfredsstillers ikke noen av disse kravet om måling av turtall på 150.000rpm. De er likevel tatt med for å vise hvilke muligheter som fins for turtallsmåling.

Testo 465

- Type: Optisk Takometer
- Temperaturområde: 0 til +50 °C
- Omdreininger: 1 til 100.000rpm
- Målenøyaktighet: $\pm 0,02\%$ av måleverdi
- Operasjonsmåte: Håndholdt
- Pris 2630.-



Figur 3.22 Optisk takometer
(Elfa-distrelec, 2020)

Testo 470

- Type: Mekanisk Takometer
- Temperaturområde: 0 til +50 °C
- Omdreininger: 1 til 20.000rpm
- Målenøyaktighet: $\pm 0,02\%$ av måleverdi
- Operasjonsmåte: Håndholdt
- Pris 3605.-



Figur 3.23 Mekanisk takometer
(Elfa-distrelec, 2020)

Testo 476

- Type: Stroboskop
- Temperaturområde: 0 til +40 °C
- Omdreininger: 30 til 12.500rpm
- Målenøyaktighet: $\pm 0,01\%$ av måleverdi
- Operasjonsmåte: Håndholdt
- Pris 7890.-



Figur 3.24 Stroboskop (Elfa-distrelec, 2020)

Noen turtallsensorer krever derimot fysisk kontakt, eller at man har fri tilgang til objektet som skal måles. Siden kompressorhjulet (måleobjektet) i turboladeren, ligger utilgjengelig for målinger som beskrevet, vil slike type sensorer naturligvis utelukkes. Videre undersøkelser gir treff på tre andre typer turtallsensorer. Alle tre er kompatible med PLS, men to av sensorene er induktive og den sisten er av typen hall-effekt:

DZ 140



- Type: Induktive
- Temperaturområde: 0 til 125 °C
- Omdreininger: 200 til 400.000rpm
- Målenøyaktighet: $\pm 0,2\%$ av måleverdi
- Operasjonsmåte: Fastmontert
- Pris: 14676.-

Figur 3.25 DZ 140 Speedsensor (sensortest, 2020)

DZ 140 er en universell turtallsensor som brukes til å måle turtallet til turboer (Figur 3.25). Det at sensoren er universell betyr at den kan brukes på alle typer turboer. Sensoren har en tilleggsenhet hvor antall blader kan justeres, i tillegg til at den gir ut et lys når avstanden fra sensoren til bladene er tilfredsstillende. Sensoren fins i flere størrelser, fra 3-5 mm i diameter. Det kan også velges mellom utvendige gjenger eller uten gjenger. Den har i tillegg muligheten til å monteres både radielt og aksielt i forhold til kompressorhjul. Den digitale utgangen til sensoren gir ut en puls for hvert blad som passerer sensoren, og danner firkantpulser. Den analoge utgangen er på 0-5V. Leverandøren kunne bekrefte at sensoren er kompatibel med PLS, og denne sensoren kunne vært ideell til turboladeren i denne oppgaven. Innkjøp av DZ140 hadde derimot skapt for store økonomiske begrensninger for resten av oppgaven, og ble dermed utelukket.

Jaquet Turbo speedsensor



- Type: Induktive
- Temperaturområde: -40 til 200 °C
- Omdreininger: 5000 til 400.000rpm
- Målenøyaktighet: Ikke oppgitt
- Operasjonsmåte: Fastmontert
- Pris: 4475.-

Figur 3.26 Jaquet Speedsensor (Tormatic, 2020)

Jaquet sensoren er også en induktiv sensor, som består av en sensor med ledning slik som vist i Figur 3.26. Den er ifølge produsenten, Tormatic AS, tynn og robust, med et gjenget ytterparti. Denne leverer også ut firkantpulser som digitalt utgangssignalet. Jaquet sensoren er også en universalsensor, som gjør at den kan brukes på alle typer turboladere ifølge produsenten. Etter samtale med forhandler viste det seg å ta lang tid før Jaquet sensoren kunne være i vår besittelse, da den verken var på lager hos Tormatic AS i Norge, eller hos Te connectivity i USA. Leveringstiden på sensoren ble 8 uker fra da samtalen ble holdt, noe som hadde medført at vi ikke hadde mottatt sensoren før begynnelsen av mai 2020. Da man også må beregne tid på det praktiske arbeidet med å installere en slik enhet, var det stor usikkerhet knyttet til vente så lenge med å motta produktet, i frykt for ytterligere forsinkelser.

Garrett Turbo Speedsensor



- Type: Hall Effekt
- Temperaturområde: Ikke oppgitt
- Omdreininger: Ikke oppgitt
- Målenøyaktighet: Ikke oppgitt
- Operasjonsmåte: Fastmontert
- Pris: 4200.-

**Figur 3.27 Garrett Speedsensor kit
(Garrett, 2020)**

Garrett Turbo Speedsensor er produsert av en anerkjent turboprodusent, og fungerer tilfredsstillende som turtallssensor. Sensorpakken (se Figur 3.27) gjør det i tillegg mulig å ha en analog turtallsmåler, som gjør at turtallet kan overvåkes uten at en PC er koblet til PLS'en. Ulempen er at spesifikasjonene om sensoren er svært mangelfulle, noe som gjør det vanskelig å kunne sammenligne sensoren med de øvrige to. Etter samtale med leverandøren Turbokits.com, ble det bekreftet at dette er en hall effekt sensor og at sensoren kan brukes på alle turboladere. Sensoren har også en monteringsanvisning på hvordan sensoren skal kobles elektrisk og en fremgangsmåte på hvordan den skal monteres i kompressorhuset. (Vedlegg F nr1).

DZ140 ble hovedsakelig utelukket på grunn av prisen, og valget stod da mellom Jaquet Turbospeed sensor og Garrett Turbospeed sensor. Det ble antatt ca. samme spesifikasjoner for Garrett sensoren som for Jaquet sensoren, da disse var ganske like i pris og utforming. Med bakgrunn i dette ble Garrett sensoren ansett som den beste løsningen for oppgavens turbolader og derfor anskaffet. Dette var blant annet på grunn den detaljerte monteringsanvisningen som fulgte med, i tillegg til muligheten til både analog og digital måling av turtallet. Samtidig hadde usikkerheten knyttet til leveringstidspunktet til Jaquet sensoren en innvirkning på valget.

3.5.1 Montering av turtallsensor

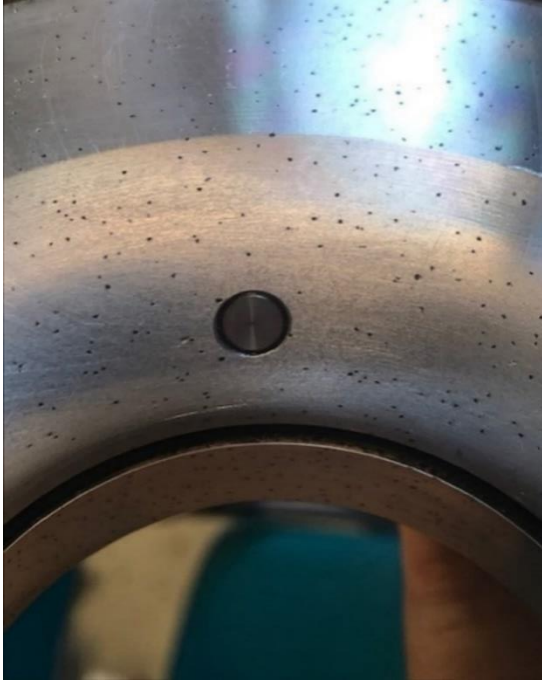
Sensorens relative plassering i forhold til kompressorbladene er kritisk for at sensoren skal kunne registrere når bladene på kompressorhjulet roterer forbi sensoren. Hvis sensoren er plassert for langt unna bladene, vil man ikke få noe signal. Samtidig må man være oppmerksom på at sensoren ikke ligger for nært bladene, da dette kan føre til fysisk kontakt og dermed skade på både sensor og turboladeren. I tillegg er det viktig med korrekt vinkel på sensoren i forhold til bladene for å oppnå tilstrekkelig signal. Selv om turboladeren benyttet i oppgaven er forskjellig fra turboladeren som monteringsanvisningen tar utgangspunkt i, fungerer anvisningen som en god veiledning for montering av turtallsensoren. For å kunne montere sensoren ble kompressorhuset fastspent i en søyleboremaskin, og kjøkhodet innstilt på 45°. Deretter ble hullet til sensoren boret, før gjengene ble lagd (se figur 3.28 og 3.29). Figur 3.30 og 3.31 viser plasseringen av sensoren både fra utsiden og innsiden av kompressorhuset.



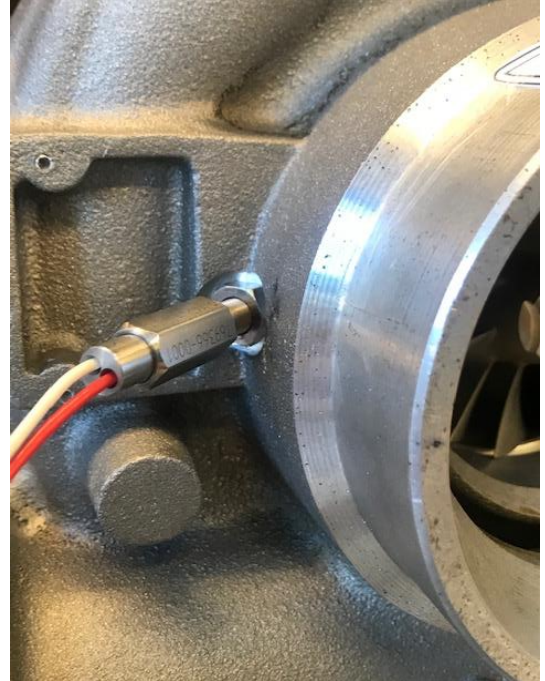
Figur 3.28 Oppspenning i søyleboremaskin



Figur 3.29 Tilpassinger før boring



Figur 3.30 Turtallsensoren montert i kompressorhuset sett fra innsiden



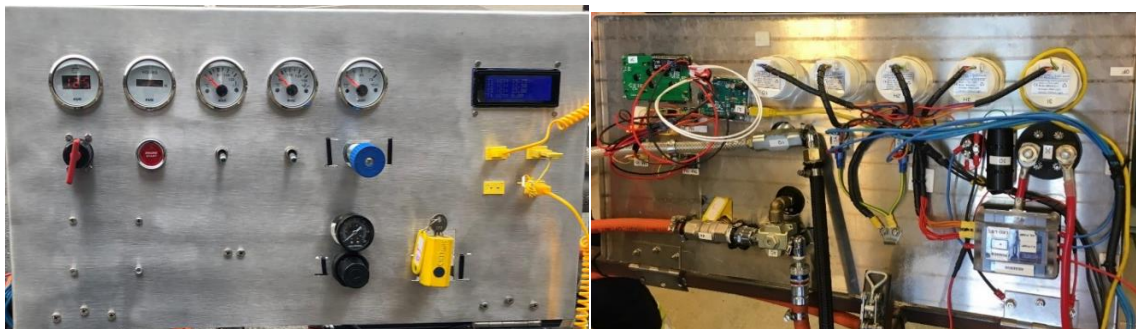
Figur 3.31 Turtallsensoren montert i kompressorhuset sett fra utsiden

4 Testing og resultat

Når oppgaven har kommet til dette kapitlet er temperatursensorer, trykksensorer og turtallsensor med tilhørende innretninger montert. PLSen er koblet opp og et nytt kontrollpanel er konstruert, i tillegg til det er det laget et brukergrensesnitt for grafisk fremstilling av verdiene som blir målt. For å kunne svare på oppgavens problemstilling, i tillegg til å bruke målingene til å beregne virkningsgrad, er det viktig å forsikre seg om at de målte verdiene er pålitelige og rimelige. Av den grunn gjennomføres tester av måleinnretninger underveis i oppgaven. Pålitelige og nøyaktige målinger vil gi muligheten til å kunne gjøre beregninger, som igjen kan sammenlignes med andre gasturbiner eller tilsvarende oppgaver. Dette kapitlet vil ta for seg testing av sensorene og brukergrensesnittet i kombinasjon med ulike testkjøringer av gasturbinen.

4.1 Kontrollpanelet

I Figur 4.1 vises framsiden og baksiden slik kontrollpanelet var under analysen i kap. 3 og Figur 4.2 viser hvordan kontrollpanelet ser ut når testene fra test 1-7 ble gjennomført. Hovedforskjellen er at LCD-skjermen med tilkoblinger til temperatursensorene er fjernet og panelet er blitt komprimert i størrelse. I tillegg er sikringsboksen flyttet fra kontrollpanelet til El-skapet.



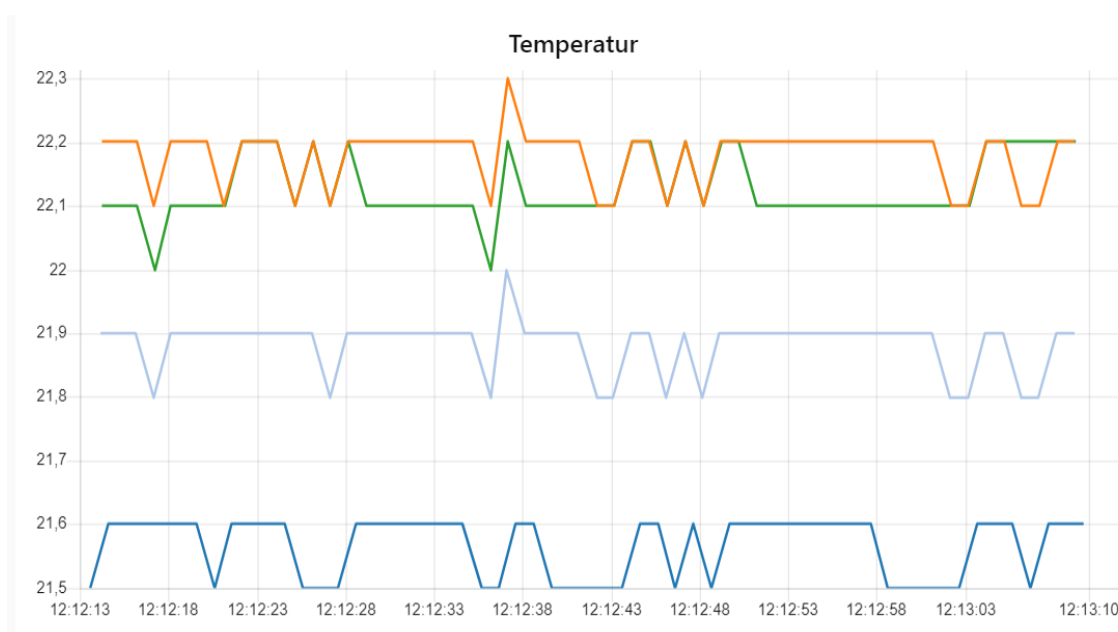
Figur 4.1 Kontrollpanelet før



Figur 4.2 Kontrollpanelet etter

4.2 Test 1: Temperatursensorer

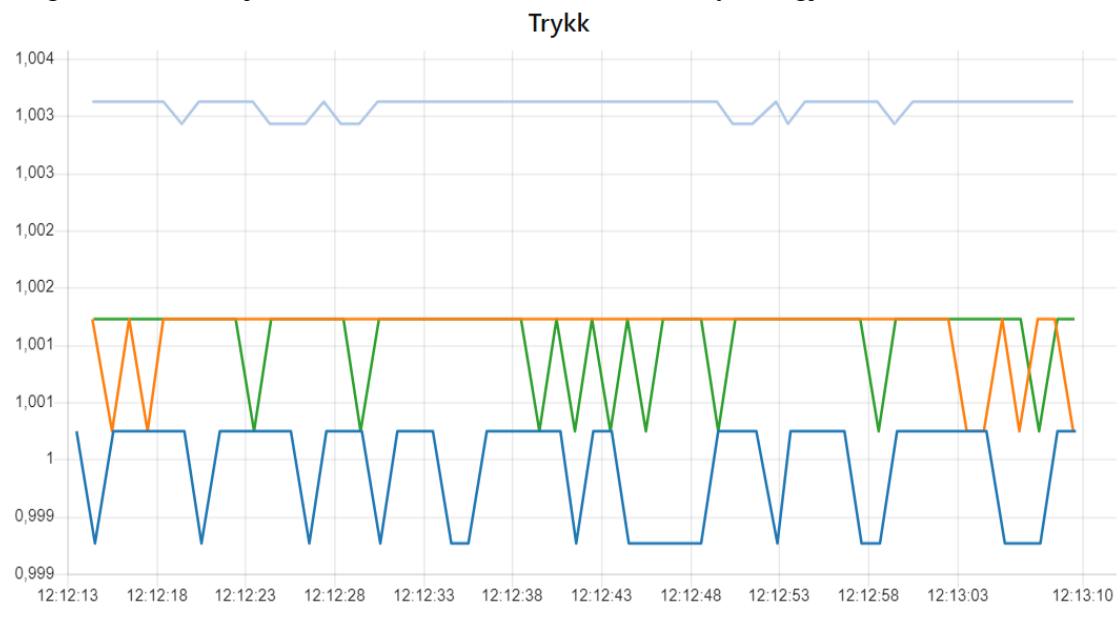
Da oppgaven benytter to ulike typer temperatursensorer, er det viktig at begge typene er kompatible med PLSen. Tre av sensorene er av typen JUMO, og den siste er av typen Comark. Oppgaven har derfor vært avhengig av funksjonstester underveis, for å være sikker på at det er mulig å benytte de valgte sensorene i kombinasjon med PLSen. Testen omhandler derfor en funksjonstest av sensorene når de er koblet til PLSen, dette for å kvalitetssikre måleverdiene til sensorene. Sensorene har blitt plassert i forhold til hvor de vil befinne seg under drift av gassturbinen, altså ved T1, T02, T03 og T04, av den grunn avviker måleverdiene sensorene seg imellom. Gassturbinen var i denne testen ikke i drift, men plassert i et klasserom. Det vil derfor kun være de statiske temperaturene som kommer frem i Figur 4.3 (T1, T2, T3 og T4). Hakkene i de ulike grafene kan komme fra digitaliseringen eller fra signalveien mellom sensor og PLS/modul. Målenøyaktigheten til den grønne grafen, som er sensoren Comark A27M, er gitt i spesifikasjonene til å være $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, blir det tatt utgangspunkt i middelveien som er 20,1 varierer den bare mellom 22-22,2 som er $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. De tre andre grafene er av samme type sensorer, JUMO, men ser ut til å ha like god målenøyaktighet som den førstnevnte. De tre JUMO sensorene avviker i forholdt til hverandre på grunn av at 2 av sensorene er montert i en lukket del av gassturbinen.



Figur 4.3 Statistiske måleverdier i en temperaturgraf. Oransje: T4, Lyseblå: T3, Mørkeblå: T2, Grønn: T1.

4.3 Test 2: Trykksensorer

Tilsvarende test, som for temperatursensorene i delkapittel 4.2, har blitt utført med trykksensorene. Trykksensorene er i denne testen plassert på sine respektive målepunkter på gassturbinen. Alle trykksensorene er av merke Aplisens, men har to ulike målområder, som nevnt i kapittel 3. Det er viktig å bemerke seg at siden gassturbinen ikke er i drift under denne testen, vil resultatene kun bestå av statiske trykkverdier. I Figur 4.4 ser man at tre av sensorene er mer like enn den fjerde, som kan være en direkte årsak av plasseringen. Hvor den fjerde er den eneste som ikke måler trykket gjennom et rør. Hakkene er



Figur 4.4 Statiske måleverdier i en trykkgraf; Oransje: P3, Lyseblå: P1, Mørkeblå: P2, Grønn: P4.

av ulik høyde selv om målenøyaktigheten (0,2%) er den samme for alle. Forskjellen er at den fjerde har en målenøyaktighet på 0,2% av måleverdiområdet 0,8-1,2, sammenlignet med de andre som har et måleverdiområdet på 0-4. Det utgjør for den fjerde et avvik på $\pm 0,0008$, men for de tre andre et avvik på $\pm 0,008$. Hakkene kan også her som i Figur 4.3 komme fra digitaliseringen eller fra signalveien mellom sensor og PLS/modul.

4.3.1 Test 3: Kjøleinnretning for trykksensorer

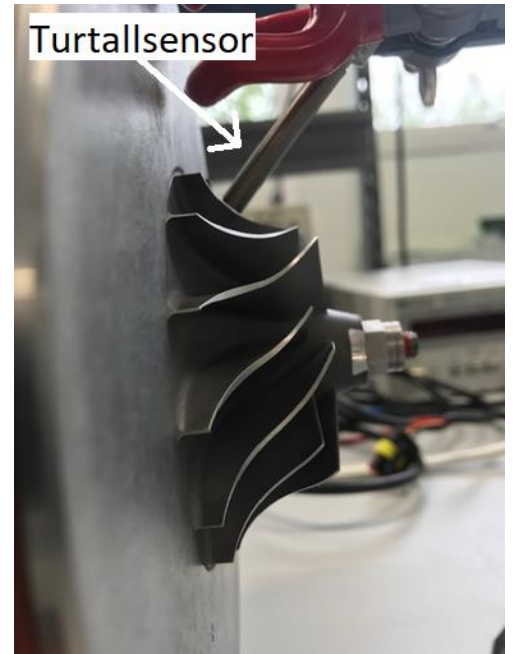
Kapittel 3 forklarer kort bruken av "grisehale" til å kjøle luften som treffer trykksensorene for å beskytte disse. For å teste at grisehalen fungerer tilfredsstillende, ble temperaturen til luften målt der trykksensoren i T03 skal monteres, på grunn av det er i brennkammeret (T03) temperaturen forventes å være høyest (1500K) (Figur 4.5). Da grisehalene ble laget tidlig i oppgaven, ble oppgavens temperatursensor i kombinasjon med det allerede eksisterende temperaturpanelet nytt til måling av temperaturen til luften. Dette ble ansett som pålitelig nok til å anslå hvilket temperaturområde man kunne forvente. Under testen ble det målt en maksimaltemperatur på 49°C, av den grunn ble grisehalene ansett som tilfredsstillende til å kjøle ned luften til trykksensorene ved T03 og T04.



Figur 4.5 Temperaturmåling av luften i T03

4.4 Test 4: Test av turtallsensor for montering

Det er viktig at turtallsensoren kan registrere materialet skovlene er laget av, for deretter å kunne gi ut signal. På grunn av at hall effekt sensoren opprinnelig er konstruert og tilpasset til en Garrett-turbolader, ble det gjort et forsøk for å forsikre seg om at sensoren er i stand til å registrere bladene på turboladeren benyttet i oppgaven. Sensoren ble plassert nærmere enn 1mm og i en vinkel slik at hele flaten hadde samme avstanden til kompressorhjulet (Se Figur 4.6). Da sensoren er avhengig av å oppnå et turtall for å gi fra seg signal, ble det benyttet et oscilloskop¹¹ til testingen på grunn av dens følsomhet for signaler. Forsøket ble gjennomført ved å benytte en tilsvarende turbolader som oppgaven hadde tilgjengelig, noe som gjorde det mulig å teste turtallsensoren uten å måtte demontere gassturbinen som er benyttet i oppgaven fra brennkammeret. I tillegg ble dette gjort for å unngå å maskinere i kompressorhuset og tilpasse sensoren, uten å være sikker på at sensoren fungerte som tiltenkt. En løvblåser ble benyttet til å rotere turbinhjulet for å kunne kjøre sensortesten på kompressorhjulet. Et nøyaktig tall på hvor høyt turtallet må være for at sensoren gir ut et signal er ikke kjent, men i området 1000-2000rpm er sannsynlig.



Figur 4.6 Signaltest av turtallsensor

¹¹ Et måleinstrument som tegner opp fortløpende elektriske signaler.

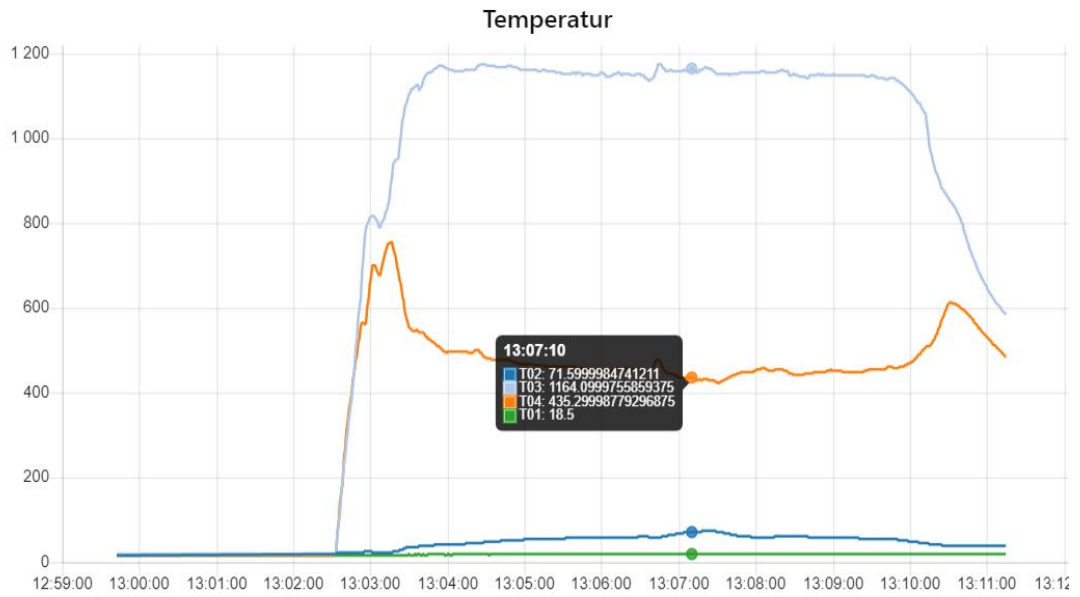
4.5 Test 5: Gassturbinen under drift

Etter testing og montering av de ulike sensorene hver for seg, ble det gjennomført testing av gassturbinen. Denne testen ble gjennomført for å bekrefte at alle sensorene måler fornuftige verdier også under drift, samtidig som den grafiske fremstillingen av måleverdiene i brukergrensesnittet ble testet.

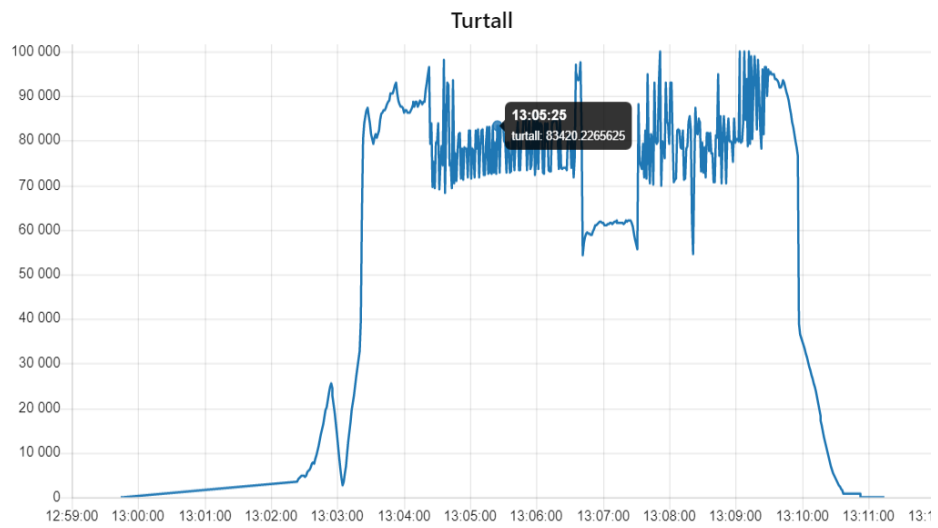
Turtallet i testen ble i stor grad variert ved å endre brennstoffmengden inn i brennkammeret, grunnen til det var for å få innsikt i hvordan verdiene til de ulike sensorene der de er plassert på gassturbinen endrer seg. I tillegg ble det gitt en bekreftelse på at endringer i turtallet er en direkte konsekvens av redusert/økt brennstoffmengde. Det ble også lagt merke til hvor lite brennstoffmengden trenger å justeres før man ser en endring i turtallet, i tillegg til at en for rask økning i brennstoffmengde gjorde at turtallet reduseres ganske mye (Figur 4.8). Å ha en grafisk framstilling med alle temperaturene samlet i en graf når temperaturene måler så ulike verdier, gjør ikke avlesningen enkel. Av den grunn ble tanken om å plassere T1 og T02 i en egen graf diskutert. Etter 10 minutter ble kjøringen av testen avsluttet og de høyeste verdiene ble hentet ut fra den grafiske framstilling av måleverdiene Tabell 4.1.

Maksimalt oppnådde måleverdier				
	Kompressor innløp (1)	Kompressor utløp (02)	Turbininnløp (03)	Turbinutløp (04)
Temperatur (C°)	18,5	73	1180	760
Trykk (bar)	1,00	1,67	1,59	1,00
Turtall (rpm)	100 000 rpm			

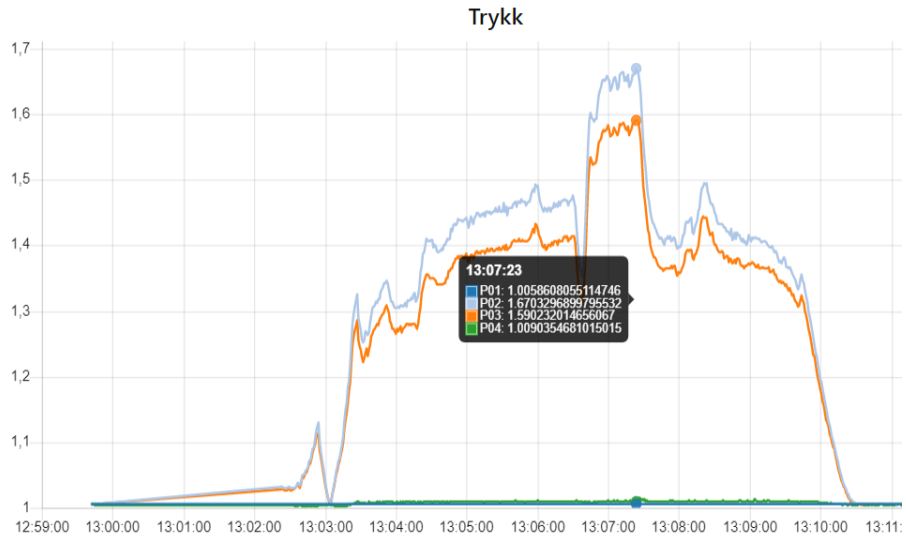
Tabell 4.1 Høyeste måleverdiene



Figur 4.7 Temperaturgraf første kjøring



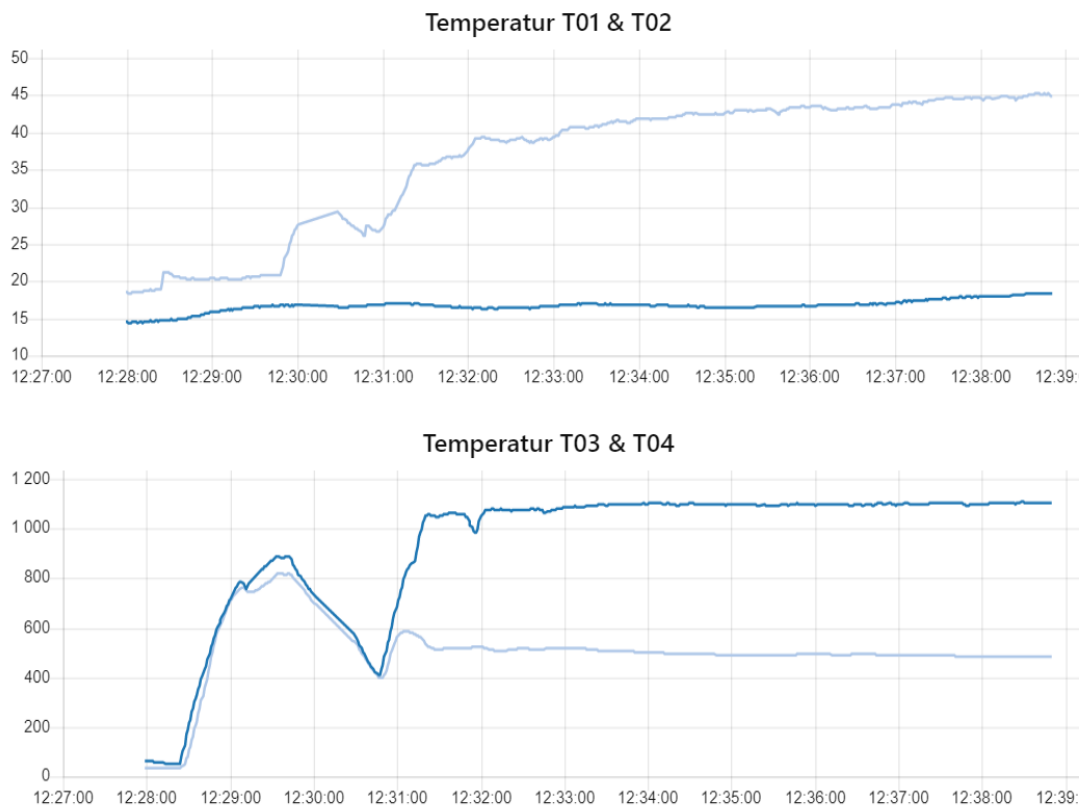
Figur 4.8 Turtallsgraf første kjøring



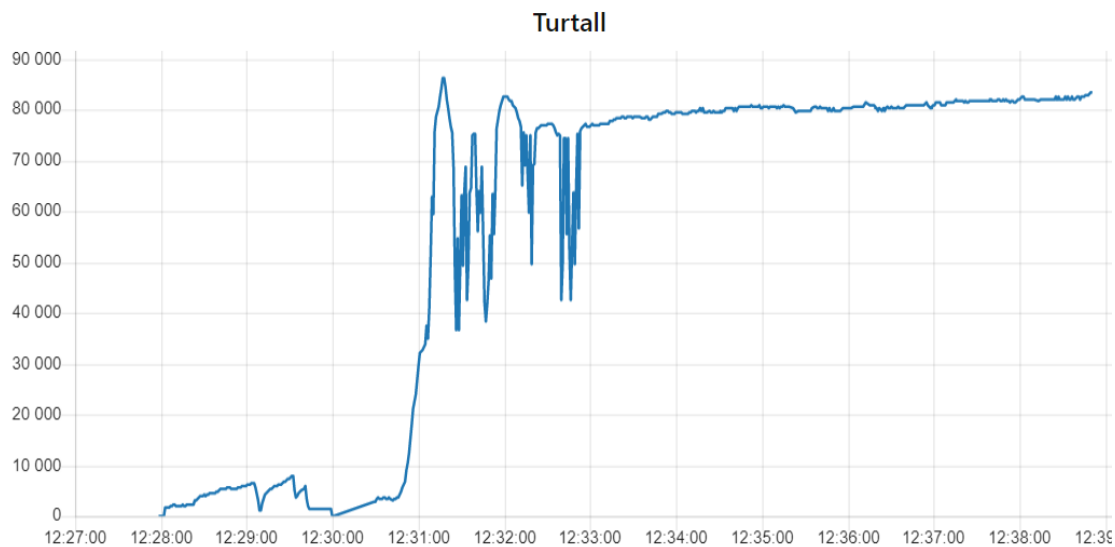
Figur 4.9 Trykkgraf første kjøring

4.6 Test 6: Konstant turtall

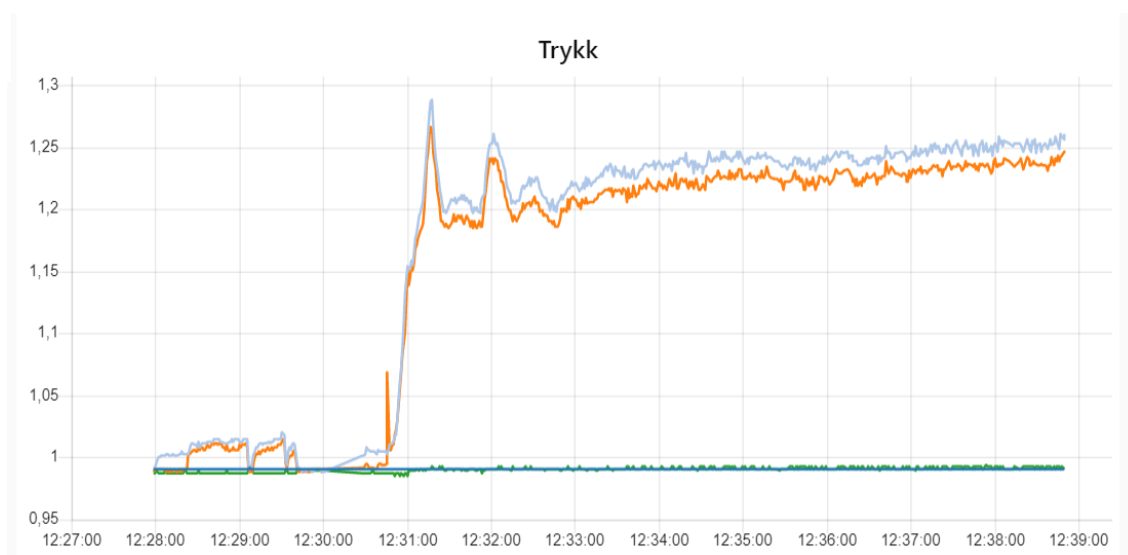
Med utgangspunkt i den første testen etter instrumenteringen, ble det utført noen endringer i det grafiske oppsettet i Node-RED. Det ble besluttet å lage to grafer, en der T1 og T02 ble vist og en der T03 og T04 ble vist, på grunn av temperaturspannet til måleverdiene (Figur 4.10). Det gjorde at den grafiske avlesningen ble enklere og mer nøyaktig. Deretter ble det bestemt å gjennomføre en test for å se om trykk og temperatur holder seg noenlunde konstante under kjøring med konstant turtall. Turtallet ble innstilt på ca 80 000 rpm, ved hjelp av å fin innstille brennstoffmengden, for så å observere om det var endringer i trykk og temperatur. Ut ifra en slik test kan vi si noe om målingene er stabile og rimelige, noe som gir grunnlag for å kunne benytte verdiene i beregninger.



Figur 4.10 Temperaturgraf andre kjøring



Figur 4.11 Turtallsgraf andre kjøring



Figur 4.12 Trykkgraf andre kjøring

I Figur 4.11 er det i starten en rask økning i turtall, fordi brennstoffet som har blitt tilført brennkammeret antennes og øker turtallet. Det ustabile turtallet litt senere i testen kan være på grunn av endringene i brennstoffmengde eller signalforstyrrelser fra sensor til PLS/modul. Trykket P02 og P03 (Figur 4.12) følger hverandre, som gir mening ettersom forbrenningen skjer teoretisk sett med konstant trykk. Trykkgrafene P1 og P02 er ikke så leselige ut ifra grafen og kunne vært plassert i en egen graf slik som T1 og T02.

4.7 Test 7: Brennstofforbruk

Det er interessant å vite hvor mye brennstoff som forbrukes av en forbrenningsmotor, på grunn av miljøhensyn, effektivitet og økonomi. I tillegg vil kunnskap om brennstofforbruk kunne brukes til å beregne hvor stor effekt gassturbinen kan levere ut fra turbinen. For å måle brennstofforbruket ble det benyttet en badevekt for å måle vekten av propan-tanken før og etter kjøring (figur 4.13). Dette er ikke en gunstig målemetode med tanke på badevektens nøyaktighet og tidsoppløsning, men det tillater et grovt estimat av brennstofforbruket. Gassturbinen ble innstilt på ca. 80 000 rpm og vekten til tanken ble deretter målt til 20,5 kg. Underveis i testingen ble det ikke foretatt aktiv regulering av propantrykket, men det viste seg at turtallet gradvis økte etter hvert med tiden. Etter ca. 16 minutter ble forsøket stanset, da hadde turtallet økt til ca. 89 000 rpm. Etter ca 16 minutters kjøring ble vekten på propantanken målt til 19,3 kg.



Figur 4.13 Måling av brennstofforbruk

4.8 Beregning av virkningsgrad

Hensikten med disse beregningene er å bestemme anleggets termiske virkningsgrad på et gitt tidspunkt. Det påpekes at det kun vil bli forsøkt å gjøre et grovt estimat, og at det derfor må medregnes noe unøyaktighet. Det er forsøkt å velge et tidspunkt i en fase der gass turbinen ser ut til å kjøre i en stabil likevekt. Alle tegn og bokstaver til beregningene er kort forklart i "symboler" gitt i innledningen. Det tas utgangspunkt i følgende formler for beregning av virkningsgraden:

$$\eta_t = \frac{P_{turbin} - P_{kompressor}}{Q_{tilført}}, \text{ den termiske virkningsgraden}$$

$$P_{turbin} = w_t \cdot \dot{m}_g, \text{ effekten turbinen leverer}$$

$$P_{kompr} = w_k \cdot \dot{m}_l, \text{ effekten kompressoren bruker}$$

$$W_{turbin} = \eta_{turbin} * c_{pg} * T_{03} * \left(1 - \left(\frac{p_{04}}{p_{03}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right), \text{ turbinarbeidet}$$

$$W_{kompressor} = \frac{1}{\eta_{t\ kompressor}} * c_{pl} * T_{01} * \left(\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right), \text{ kompressorarbeidet}$$

$$\dot{Q}_{tilført} = \dot{m}_B * h_n = \dot{m}_g (c_{pg} T_{03} - c_{pl} T_{02}) = - \left(\frac{c_{pl} (T_{02} - 298) + c_{pg} (298 - T_{03})}{c_{pg} (T_{03} - 298) + h_n + c_{pf} (298 - T_f)} \right) * h_n *$$

\dot{m}_l , varmeenergien som blir tilført brennkammeret

Videre er disse antakelsene/forutsetningene gjort:

- $h_n = 46,1$ MJ/kg (nedre brennverdi for propan, hentet fra statistisk sentralbyrå)
- $c_{pl} = 1,005$ kJ/(kg*K) (gjennomsnittlig spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk, til luft i angitt temperaturområde. Hentet fra undervisningsmateriale)
- $c_{pg} = 1,148$ kJ/(kg*K) (gjennomsnittlig spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk, til eksosgass i angitt temperaturområde. Hentet fra undervisningsmateriale)
- $c_{pf} = 1,606$ kJ/(kg*K) (gjennomsnittlig spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk, til propangassen i angitt temperaturområde (engineeringtoolbox, 2020))

- $k = 1,4$ for luften og $k = 1,33$ for eksosgassen (Isentrop koeffisienten. Forholdet mellom spesifikk varmekapasitet¹² ved konstant trykk og spesifikk varmekapasitet ved konstant volum. Hentet fra undervisningsmateriale)
- Isentropisk virkningsgrad kompressor, $\eta_{t_{kompressor}} = 0,77$ (Beregnet fra målingene ift isentropisk tilstandsending)
- Isentropisk virkningsgrad turbin, $\eta_{t_{turbin}} = 0,5$ (Estimert fra tabell E, fra undervisningsmateriale)
- $(L/B)_R = 15,7$ (luft/brennstofforhold for propan (x-engineer, 2020))
- $T_f = 278$ K (temperatur på propanen før sprøytet inn i brennkammeret, antatt ved berøring av brennstoffslange under kjøring)
- I tillegg har oppgaven kun oppgitt P1 og T1, men trenger P01 og T01 til beregninger. Oppgaven er avhengig av å anta én av verdiene for å finne den andre. Antar derfor at P01 noe større enn P1, og setter P01 = 1,0 bar. Finner da at:

$$T01 = T1 * \left(\frac{P01}{P1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 290,5 * \left(\frac{1}{0,98}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 292,2 \text{ K}$$

Det oppsummeres at målingene i tabell 4.2 er hentet fra test 6 ved tidspunkt 12:38:00 ved ca. 81 000 rpm (se figur 4.10-4.12):

P01(bar)	P02(bar)	P03(bar)	P04(bar)	T01 (K)	T02(K)	T03(K)	T04(K)
1,0	1,26	1,24	0,983	292,2	318	1418	753

Tabell 4.2 Avleste verdier fra Test 6 i tidspunktet 12.38.00

Dermed kan vi første regne ut turbin- og kompressorarbeidet:

$$w_{turbin} = 0,5 * 1,148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 1418 \text{ K} * \left(1 - \left(\frac{0,983 \text{ bar}}{1,24 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,33-1}{1,33}}\right) = \underline{45,6 \text{ kJ/kg eksosgass}}$$

$$w_{kompressor} = \frac{1}{0,77} * 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 292,2 \text{ K} * \left(\left(\frac{1,26 \text{ bar}}{1,0 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1\right) = \underline{25,9 \text{ kJ/kg luft}}$$

¹² Hvor mye varmeenergi som kreves for å heve temperaturen til et visst mediet (her: luft/eksosgass) 1 grad.

Her ble antakelsene for turbin- og kompressorvirkningsgraden, samt c_{pl} og c_{pg} benyttet. Det betyr at turbin arbeidet er på 45,6 kJ/kg eksosgass og kompressoren blir tilført et arbeid på 25,9 kJ/kg luft.

For å bestemme brennstofforbruket \dot{m}_B , brukes resultatene fra test 7. Denne testen ble kjørt under ca. tilsvarende forhold, men vil innebærer noe unøyaktighet:

$$\dot{m}_B = \frac{\text{mengde brennstoff}}{\text{tid}} = \frac{1,2 \text{ kg}}{16 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ sek}}{\text{min}}} = 0,00125 \text{ kg/s}$$

For å beregne hvor mye varme som blir tilført brennkammeret, må vi først finne den teoretiske maksimale energien og bruke denne til å estimere en mer "korrekt" verdi.

$$\dot{Q}_{\text{tilført}} = 0,00125 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 46,1 * 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 57,6 \text{ kJ/s.}$$

Det vil si at 57,6 kJ/s er den maksimale energien som kan tilføres brennkammeret gitt at alt brennstoff blir forbrent 100 %.

Det gir mulighet til å estimere mengden eksosgass som går ut av turbinen, \dot{m}_g :

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{Q}_{\text{tilført}}}{(c_{pg} T_{03} - c_{pl} T_{02})} = \frac{57,6}{(1,148 \cdot 1418 - 1,005 \cdot 318)} = 0,044 \text{ kg/s}$$

Den totale mengden eksosgass vil være summen av gassturbinens tilførte luftmengde og brennstoffmengde, $= \dot{m}_g = \dot{m}_l + \dot{m}_b$. Denne kan snus på, slik at vi kan beregne luftmengden som blir sugd inn i kompressoren \dot{m}_l :

$$\dot{m}_l = \dot{m}_g - \dot{m}_b = 0,044 - 0,00125 = 0,0428 \text{ kg/s}$$

Det tas utgangspunkt i energibalansen i brennkammeret for å beregne faktisk energi tilført brennkammeret:

$$\dot{Q}_{\text{tilført}} = - \left(\frac{1,005 (318 - 298) + 1,148 (298 - 1418)}{1,148 * (1418 - 298) + (46,1 * 10^3) + 1,606(298 - 278)} \right) \cdot 46,1 \cdot 10^6 \cdot 0,0428 = 52,7 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} =$$

52,7 kW

Sammenlignet med den teoretiske verdien som er beregnet til 57,6 kJ/s, ser vi at denne

er noe lavere enn den teoretiske. Dette er rimelig å anta pga varmetap som oppstår i brennkammeret.

Vi kan også regne ut hvor mye luft som faktisk blir tilført i forhold til mengden luft som teoretisk blir tilført ved støkiometrisk¹³ blandingsforhold. Luftfaktoren blir da: $\lambda =$

$$\frac{\dot{m}_l / \dot{m}_B}{(L/B)_R} = \frac{0,0428 / 0,00125}{15,7} = 2,2$$

Dette er veldig lavt, i forhold til en luftfaktor på 70, som er mulig å oppnå i enkelte gassturbiner som nevnt i innledningen til oppgaven.

Etter å ha funnet avgassmengden (\dot{m}_g) og den tilførte luftmengden (\dot{m}_l), kan vi nå beregne turbin- og kompressoreffekten:

$$P_{turbin} = w_t \cdot \dot{m}_g = 45,6 \cdot 0,044 = 2,0 \frac{kJ}{s} = 2 kW$$

$$P_{kompr} = w_k \cdot \dot{m}_l = 25,9 \cdot 0,0428 = 1,11 \frac{kJ}{s} = 1,1 kW$$

Nå kan anleggets termiske virkningsgrad regnes ut:

$$\eta_t = \frac{P_{turbin} - P_{kompressor}}{Q_{tilført}} = \frac{2 kW - 1,1 kW}{52,7 kW} = \underline{0,017}$$

Det vil si at ca. 1,7 % av tilført energi kan brukes til annet arbeid ved dette tilfellet.

¹³ Beregninger som er basert på en balansert kjemisk reaksjonsligning (snl, 2020)

5 Drøfting og sammenligning

For å kunne vurdere om hvorvidt instrumenteringen av gassturbinen og det nye brukergrensesnittet fungerer slik som ønsket, ble det gjennomført en rekke tester. Både turtall-, temperatur- og trykksensorer er funnet kompatible med PLSen og brukergrensesnittet, og det er nå mulig å lese av data ved bruk av PC. Basert på målingene er det utført beregninger som tar utgangspunkt i flere antakelser, og som kommer frem til en termisk virkningsgrad på 1,7 %. For å kunne si mer sikkert om resultatene er ansett som nøyaktige nok til å konkludere med noe, er det naturlig å drøfte dette opp mot litteratur, lignende oppgaver og logiske sammenhenger. Drøftingen vil først ta for seg selve resultatene, og deretter drøfte disse mot de respektive målene satt i kapittel 1. Videre vil mulige forbedringspotensialer bli diskutert, før det avslutningsvis vil bli sett på hva denne gassturbinen kan brukes til fremover.

5.2 Analyse av gassturbinen

I analysen av gassturbinen før modifikasjon ble det observert en oljelekkasje rundt oljetanken og servopumpen. Etter å ha erstattet gjengeteip med locktite på de antatte lekkasjekoblingene, ble det kjørt en oppstart av den "gamle" gassturbinen slik den var. Det ble konkludert med at lekkasjen var redusert, men at det fortsatt var spor av olje spesielt rundt servopumpen. I tillegg ble det oppdaget et oljetrykksfall under kjøring, men det var likevel mulig å holde et stabilt oljetrykk på ca. 2 bar over en lengre periode. Dette ble forsøkt utbedret ved å montere en strupeventil på oljereturen fra turboladeren, med den hensikten å redusere gjennomstrømmingen av olje for å øke innløpstrykket. På denne måten kunne oljetrykket holde seg konstant ved varierende turtall. Det viste seg imidlertid at strupeventilen ikke fungerte som antatt, da ventilen nesten kunne lukkes helt, uten at det skjedde noen endringer i oljetrykket. Etter den første oppstarten av gassturbinen, så vi at oljetrykket og brennstofftrykket har en direkte sammenheng. En økning i brennstofftrykket resulterer i en reduksjon i oljetrykket.

Det kan tenkes at turboladeren «trekker» mer og mer olje inn til lagrene etter hvert som turtallet øker, siden oljetrykket faller med økende brennstofftrykk. På et tidspunkt virker det som om servopumpen ikke klarer å levere nok olje, og dermed faller oljetrykket. Dette

kan være forårsaket av at leveringsmengden til servopumpen er for liten. I spesifikasjonene til pumpen er det opplyst at den skal kunne nå et stagnasjonstrykk på 50 bar, som bør være mer enn nok til lagrene i turboladeren. Lagrene er designet for å fungere med et oljetrykk mellom 1,5-3,5 bar, men leveringsmengden til pumpen er kun 1 l/min (Raymarine, 2019). I oppgaven «*Konstruksjon av gassturbin til undervisningsformål*» fra 2019, ble det først utført en test med en pumpe som hadde en leveringsmengde på 14 l/min, og som kunne nå et oljetrykk på 3bar. I denne testen ble det oppdaget av at trykket økte på grunn av strømningsmotstanden i slangene ble for stor til å levere 14 l/min, noe som resulterte i for høyt trykk. En løsning kan derfor være å erstatte den eksisterende pumpen, med en oljepumpe som leverer 5 l/min, som antas å være tilstrekkelig til å oppnå et høyere og mer stabilt trykk ved økende turtall. Til tross for dette er det mulig å kjøre gassturbinen i over 40 minutter og samtidig holde et innløpstrykk på 1 bar. I oppgaven ble det derfor ikke prioritert å bytte pumpen, med tanke på at dette ikke hindrer videre bruk av gassturbinen.

5.3 Overvåkningssystemet

5.3.1 Kontrollpanelet

Det nye kontrollpanelet har klart å videreføre og samtidig komprimere oppsettet fra tidligere, uten å gå på bekostning på den allerede eksisterende instrumenteringen. Det elektriske anlegget er blitt flyttet fra baksiden av kontrollpanelet, og til et eget el-skap. Den tidligere LCD-skjermen med tilhørende sensorinngangene er også fjernet fra kontrollpanelet og erstattet med en PLS plassert i el-skabet.

En av ulempene med det nye panelet er at det er noe høyere enn tidligere, som kommer av at det er gjort plass monterer en 7" overvåkningsskjerm. I tillegg oppleves synsvinkelen kontrollpanelet som noe skarp. Med dette menes at man må ta noen skritt tilbake for å få en god oversikt over alle instrumentklokkene uten å måtte bøye seg ned for å se. Dette er ikke optimalt hvis noe uventet skulle skje, og man trenger å skru av eller regulere noe raskt. På den andre siden har det nye panelet blitt mer kompakt, samtidig som det har blitt tilført en ny instrumentklokke som viser turtallet. Denne er dog ikke veldig nøyaktig siden viserne er plassert med et intervall på 20 000 rpm (se figur 3.27). Det gir likevel en god

nok indikasjon på turtallet hvis man ikke har PC tilgjengelig til å lese av verdiene elektronisk. En annen positiv side ved panelet er at festemekanismen på baksiden er forbedret i form av en bedre låsemekanisme. Det er også videreført muligheten til å kunne ta ned kontrollpanelet 90°, som gjør det mer brukervennlig å kunne gjøre justeringer på panelets bakside. Når det gjelder overvåkningsskjermen som panelet er "designet" for, er det tatt utgangspunkt i webpanel (762-3002) fra Wago (7"). Fordelen er at den leveres av samme leverandør som kontrollsystemet benyttet i oppgaven, og PLSen (og Node-RED) er derfor allerede klar til å kunne kobles opp. Ulempen er naturligvis prisen, men det vil samtidig være mulig å fremstille grafer og verdier på kontrollpanelet, som vil kunne frigjøre plattformen for bruk av PC til overvåkning. Uavhengig om dette blir gjennomført, hadde det også vært mulig å montere en digital eller mer nøyaktig instrumentklokke for måling av turtall, slik at tester som innebærer god kontroll på turtallet kan utføres uten noe form for tilleggsutstyr.

5.3.2 Brukergrensesnittet

Ved instrumentering av PLS til behandling av sensor data, er det nå mulig å fremvise data i et digitalt brukergrensesnitt. I brukergrensesnittet er det også mulig å endre og tilpasse den grafiske fremstillingen etter eget ønske, slik at avlesningen fra grafene blir så enkelt som mulig. Det er også blitt opprettet en database på samme program som PLSen for datalagring, men dette har vist seg å ikke fungere som først antatt. I oppgaven er Node-RED til loggføring og overvåkning og for å kunne lese av og lagre målinger på PCen. Deler av det digitale brukergrensesnittet er illustrert i Figur 3.9.

I utgangspunktet ble det bestemt å kunne vise tre ulike grafer: turtall, trykk og temperatur. Det viste seg å ikke være ideelt da det f.eks. var stor forskjell mellom de ulike temperaturverdiene, noe som gjorde det vanskelig å se relative variasjoner grafisk når forskjellen mellom sensorene bestemte skaleringen (se figur 4.7). Det ble derfor besluttet og dele temperaturene i to ulike grafer, som illustrert i figur 4.10. I trykk-grafen er derimot alle de fire verdiene plassert i samme graf. Det ble ikke ansett som nødvendig med en slik inndeling, da P01 og P04 uansett vil ligge rundt atmosfærisk trykk. Grafene på sin side er enkle å lese av, og kan gi ut nøyaktige verdier ved å holde datamusen over punktet man ønsker å måle. Denne utformingen er med på å gjøre brukergrensesnittet enkelt og oversiktlig, mye på grunn av at den ikke inneholder for mye informasjon. Dette sees på som viktig for å ivareta en intuitiv overvåkningsplattform.

På den andre siden er brukergrensesnittet ikke like intuitivt å programmere om man ikke er kjent med Node-RED fra før. Både PLSen og Node-RED er avhengig av OPC UA¹⁴, som er en av de vanligste formene for kommunikasjon innenfor automasjon (Novotek, 2020). Programmet på PLSen, som lages og installeres på PLSen via e!cockpit, deler variablene sine via OPC UA. Disse leses så av med Node-RED via passende noder som kan installeres via en OPC UA-palette. Man er derfor avhengig av å kjenne til de to ulike "programmeringsspråkene" for å gjøre det mulig å overvåke PLSen gjennom Node-RED. Programmering i e!cockpit vil i utgangspunktet være nødvendig for opprettelse av kommunikasjon med Node-RED første gang. Fordelen er derfor at den videre programmeringen kun trenger å finne sted i Node-RED, etter at kommunikasjon er opprettet. Dette er med mindre man ønsker å endre hvordan PLSen skal tolke signalene fra sensorene. En annen ulempe med brukergrensesnittet er funksjonen "Lagring i databasen". Når denne funksjonen aktiveres, mister PCen forbindelsen med PLSen etter ca. 3 minutter, og programmet avslutter registrering av data. Dette kan være et resultat av at PLSens CPU¹⁵ har begrenset kapasitet, og at lagring av store mengder data medfører overbelastning, og dermed brudd på kommunikasjonslinjen. På bakgrunn av dette ansees målet om avlesning og lagring av data, som delvis oppnådd, pga problematikk knyttet til lagringsfunksjonen som programmet benytter. En mulig løsning på problemet kan være å legge databasen og muligens hele det digitale brukergrensesnittet på en annen datamaskin. På denne måten trenger PLSen kun å gjøre det den er designet for i utgangspunktet, nemlig håndteringen av sensor data.

For å videreutvikle dette brukergrensesnittet og de datatekniske mulighetene, anbefales det på dette grunnlaget å samarbeide på tvers av de tekniske linjene i en fremtidig oppgave. Dette vil kunne gjøre det mulig å forbedre gassturbinen på flere plan, da ulik kunnskap og forutsetninger vil kunne utnyttes på en bedre måte, basert på erfaringene gjort i denne oppgaven.

5.3.3 Målenøyaktighet

Det er blitt montert 4 temperatursensorer og 4 trykksensorer i målepunktene 1, 2, 3 og 4 (se figur 2.4). I hvert målepunkt er det plassert en trykk- og en temperatursensor. Trykk-

¹⁴ Open platform communication unified architecture

¹⁵ Central processing unit

og temperatursensoren som er montert i målepunkt 1, måler som tidligere nevnt kun statisk trykk og temperatur pga deres plassering, mens samtlige av de resterende sensorene måler stagnasjons trykk og temperatur. Det er også blitt montert en turtallsensor på turboladerens kompressorside.

Gassturbiner er rapportert til å kunne oppnå temperaturer mellom 850-1700 °C i T03 (Soares 2008, s. 155) og eksostemperaturer i T04 på 500-600 °C (Saravanamuttoo 2009, s. 4). Dette vil naturligvis variere avhengig av gassturbinens størrelse, bruksområde og materialkvalitet, men gir en pekepinn på hva man kan forvente. Test 1 viser målenøyaktigheten til temperatursensorene gjort i et klasserom. Ved testing av gassturbinen viser resultater fra test 5 at oppgaven oppnår ca. 1100 °C i T03 og 500 °C i T04 ved stabil driftstilstand. Ser man på T03 er det likevel vanskelig å kunne si noe konkret om nøyaktigheten på bakgrunn av et så bredt intervall 850-1700 °C, siden dette baserer seg på et generelt datagrunnlag for gassturbiner som er betydelig større enn den benyttet i oppgaven. Bachelor-oppgaven "*Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin*" fra 2014 (HVL¹⁶), gir derimot et bedre sammenligningsgrunnlag da også denne oppgaven baserer seg på en turbolader-basert gassturbin. Denne viser til en maksimaltemperatur i T03 på ca. 830 °C, og som er noe mindre enn hva som er målt i denne oppgaven. Oppgaven fra HVL benytter en brenner til antenning av propan, mens denne gassturbinen benytter en egenprodusert dyse. Bruk av dyse vil derfor kunne gi noe høyere temperaturer enn ved bruk av en gassbrenner på grunn av at dysen kan fungere som en flammekaster. Hvis dysen er rettet direkte mot temperatursensoren, kan den varmeste delen av flammen komme veldig nært, noe som gjør at den registrerte temperaturen kan bli høyere enn ved bruk av en brenner hvor flammen får en lengre avstand til sensoren. Forskjellen i temperaturen i brennkammeret kan også komme av at mengden luft som kommer inn gjennom flammerøret i gassturbinen i denne oppgaven er mindre enn den fra HVL. Det betyr at kjølingen av luften er noe mindre i denne oppgaven. Ved å analysere trykk-grafen i test 6 (figur 4.12) ser man at det er et overtrykk på ca 0,25 bar relativt til atmosfæren, over kompressoren. Dette vil kunne gi en liten økning i temperaturen på luften som passerer, og en temperatur på 45°C i T02 er dermed ansett som plausibelt. Den registrerte temperaturen i T04 ser også til å stemme overens med litteraturen.

¹⁶ Høgskolen i Vestlandet

På den andre siden kan den registrerte temperaturen på ca. 1100 °C være noe høy, da flere gassturbiner vanligvis opererer med T03-verdier på ca. 1000 °C. Dette kan være forårsaket av temperatursensorens plassering i brennkammeret, eller av sensorenes plassering i selve pitot-røret. I tillegg er innløpshullets størrelse Ø5,5 mm og ventilasjonshullet Ø1,5 mm, det gjør at innløpshullets størrelse er 27% av utløpshullets størrelse. Noe som er 22% større en det som er maksimum for å opprettholde pitot-effekten (Saravanamuttoo 2009, 288). Dette vil naturligvis ha en innvirkning på måleverdien, men det er usikkert hvor mye.

Når det gjelder trykkmålingene, vil det i en ideell prosess vil P02 og P03 være identiske på grunn av isentropisk tilstandsendring i brennkammeret, mens det i en reell prosess vil være noe trykktap i form av friksjon og varmeutveksling med omgivelsene. Ved å se på test 5 og 6, ser vi at P02 og P03 følger hverandre fint. Selv små endringer P02 gir utslag på P03, samtidig som forholdet mellom dem tilsynelatende ser ut til å holde seg konstant. Hvis begge sensorene derimot viser feile verdier, vil det være vanskelig å si noe om dette ved å kun se på hvordan de endres i forhold til hverandre. I radialkompressor er vanlig med et trykkforhold ($\frac{P_{02}}{P_{01}}$) på rundt 1,2-1,4 absolutt trykk (Saravanamuttoo 2009, s. 158). Ved et stabilt turtall ligger oppgavens trykkforhold på rundt 1,25, noe som er rimelig i forhold til det oppgitte intervallet. Det kan likevel være at trykket som vises er noe lavt, da det kan oppstå strømningsstap på grunn av rørutforming og bend. En annen årsak kan være lekkasje i slangekoblingene som sitter på røret mellom kompressoren og brennkammeret. Test 5 viser at turboen har kapasitet til å nå nesten 1,7 bar ved P02 (se figur 4.9). Dette kan være forårsaket av et høyt propantrykk, som førte til en opphopning av gass i brennkammeret og dermed et høyere trykk. Det gjør at gassen ikke klarer å føres videre raskt nok, og turboen må arbeide tyngre for å komprimere en større mengde luft, derav redusert turtall. Da oppgaven anser et intervall i trykkforhold mellom 1,25 - 1,7 som rimelig, tolkes dette som at trykksensorene opererer med verdier som er nøyaktige nok til bruk videre i oppgaven. Det bør også nevnes at målingene uten drift ligger veldig bra sammen (se figur 4.3). P1 og P04 vil i en åpen gassturbin registrere endringene i det atmosfæriske trykket og bør ligge rundt 1 bar, noe som også kommer frem i testene.

Turtallet i seg selv responderer raskt når det blir gjort endringer i brennstoffmengden. I tillegg ser det ut til at den analoge turtallsviseren på kontrollpanelet og den digitale turtallsviseren inne på brukergrensesnittet, viser tilsvarende verdier. De responderer også likt på endringer. Sensoren er som nevnt en turtallsensor fra en anerkjent turboleverandør

og selges opprinnelig til bruk i racing-biler. Det er dermed forventet og antatt at turtallsensoren viser rimelige verdier i utgangspunktet. Likevel vil en liten feiljustering av sensorens vinkel og avstand til måleobjektet ved montering, kunne gi unøyaktige målinger. Selv om monteringen er utført etter monteringsanvisningen fra produsenten, er det derfor vanskelig å si noe om sensoren er optimalt plassert. Ved å se på test 5 ser man en stor variasjon i turtall. Under hele denne testen ble det utført konstante justeringer av brennstofftrykket for å forsøke å stabilisere turtallet, noe som kunne ført til ytterligere ujamnheter i turtallet. Dette kan være et resultat av sensorinnstillingene, eller at sensoren kan være plassert med for lang avstand til bladene. Under test 6 ble det unngått å justere brennstofftrykket etter å ha oppnådd et turtall på ca 80 000 rpm. Som resultat ble det observert et mer stabilt turtall, og det ble konstatert at justering av propantrykket var årsaken til de ujevne resultatene i test 5. Samtidig kan det se ut som det oppstår en kvelning av turboladeren rundt tidsrommet 13.07.00 ved test 5. Rett før kvelning er turtallet ca. 80 000 rpm og trykkforholdet rundt 1,45, og ved å benytte kompressorkartet i figur 2.10 ser man at dette kan stemme bra med den grønne kvelningslinjen. Da kompressorkartet ikke tilhører turboladeren benyttet i oppgaven, vil det naturlig være noe usikkerhet. Alt i alt er det ingen spesiell grunn til å tro at turtallsmålingene er feil.

Basert på denne drøftingen anses trykk-, temperatur- og turtallsmålingene som plausible og nøyaktige nok til å kunne brukes i videre beregning av virkningsgrad. Det anbefales likevel å ta en kontrollmåling på turtallsensoren med en separat sensor for å bekrefte eller avkrefte kvaliteten til det målte turtallet.

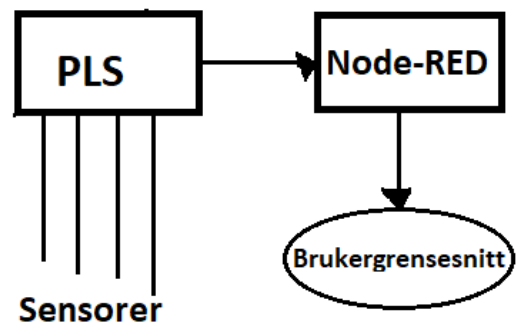
5.4 Videreutvikling og fremtidig bruk

For at gassturbinen skal kunne videreutvikles både innenfor det systemtekniske og det maskinfaglige, har oppgaven lagt vekt på et enkelt og åpent design. PLSen har kapasitet til å legge til flere sensorer i de allerede eksisterende modulene, samtidig som man kan legge til ytterligere moduler hvis det skulle være ønskelig. Det er også lagt til rette for å kunne installere den nevnte Wago-skjermen, som kan gi flere muligheter til å fremstille grafer o.l. på kontrollpanelet. Det som begrenser det elektriske anlegget, er imidlertid størrelsen på el-skabet, noe som kommer av at plattformen er avhengig av flere større komponenter (som DC-DC omformerer) for å kunne drive overvåking. Alternativet er å bytte ut skabet med et større hvis man f.eks. ønsker en større sikringsboks, men oppgaven

ser ikke el-skapet som noe nevneverdig hindring for videreutvikling av det elektriske anlegget på dette tidspunkt. Når det gjelder mulighetene for maskinfaglig utvikling, er det konstruert festeinnretninger for trykk-, temperatur- og turtallsensorene som gjør de enkelt å demontere hvis det skulle oppstå feil ved dem. På den andre siden er festeanordningen til trykk- og temperatursensorene inne i kanalene begrenset i tykkelse, hvis man ønsker å benytte sensorer med tykkere gods. Da må det i så fall konstrueres en ny festeanordning.

Det området som oppgaven har åpnet mest for videreutvikling, er utforming lagring, loggføring og valg av brukergrensesnitt. På grunn av prioriteringer og tid tilgjengelig, har oppgaven kun berørt overflaten av mulighetene som ligger innenfor dette området. Fordelen er at PLSen og E!cockpit gir mange mu-

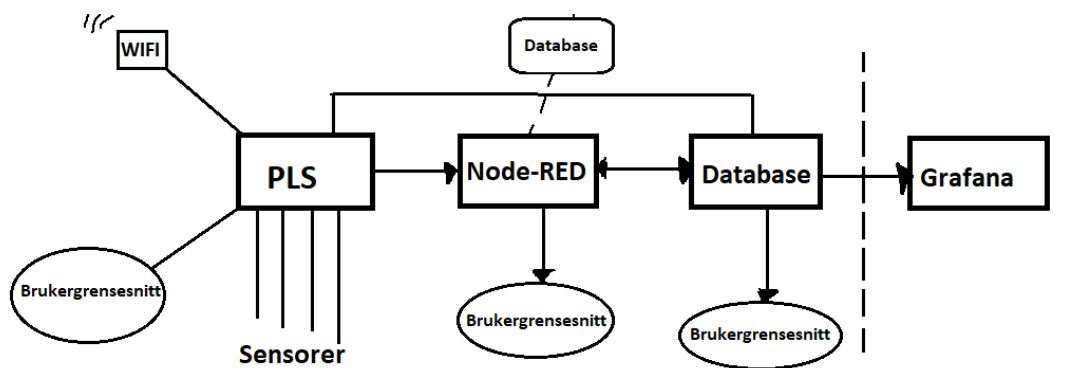
ligheter til hvilke program man ønsker å benytte til f.eks. visualisering av data. Denne oppgaven benytter eksempelvis et brukergrensesnitt i Node-Red til fremvisning av måledataene, og figur 6.1 viser hvordan PLSen her kommuniserer med Node-RED. Mer detaljert informasjon om programmeringen fins i vedlegg D. Fordelen med en slik



Figur 6.1 Oppgavens oppbygging

kommunikasjon, er at den er enkel og oversiktlig siden den kun består av to "ledd". Ulempen er som nevnt i kapittel 3, problemet med at lagring av data pga PLSens prosesseringsenhet. Det er derfor tiltenkt å benytte en egen fysisk adskilt database til lagring av større mengder data over lengre tid, for å hindre overbelastning av PLSen. Figur 6.2 illustrerer noen av de mange mulighetene som fin. En av disse kan være at Node-RED videresender data fra PLSen til en egen database inne på skolenettet. Deretter kan f.eks. et visualiseringsprogram slik som Grafana, hente data ut fra denne databasen og fremstille de grafisk på nettet. De ulike mulighetene åpner det for at man kan endre brukergrensesnittet etter ønske, i tillegg til at man kan ha flere brukergrensesnitt som kan velges ut etter behov. Ulempen er at flere program og kommunikasjonsledd krever mer programmering, samtidig som det kompliserer feilsøking med ved å inkludere mange ledd.

Oppsummert har denne plattformen sitt største videreutviklingspotensial innenfor det systemtekniske området. Samtidig er det mulig å endre/oppgradere både fysiske komponenter og datateknisk oppsett uten å måtte lage alt fra bunnen av.



Figur 5.2 Muligheter innenfor det systemtekniske

5.5 Beregning av virkningsgrad

Ved å sammenligne verdiene for kompressoreffekten ($P_{kompressor}$), turbineffekten (P_{turbin}) og energien tilført i brennkammeret gjennom varmeoverføring ($\dot{Q}_{tilført}$), ser man at det er en sammenheng mellom det som skjer i komponentene. Energien tilført i brennkammeret må ha størst verdi, siden denne representerer brennstoffenergien og energien til luften (tilført i kompressoren) som samles i brennkammeret. Energien per tidsenhet tilført i brennkammeret ble beregnet til en effekt på 52,7 kW, men representerer kun brennstoffenergien da det er den eneste vi har kunnet måle. Den komprimerte luften fra kompressoren vil være med å øke den totale energien, mens propanens lave temperatur i det den tilføres brennkammeret vil derimot bidra til å redusere denne energien noe. Energien går deretter fra brennkammeret og videre inn i turbinen i form av varme og trykk, hvor det oppstår tap i mekanisk energi i form av friksjon og varmetap til omgivelsene. Det medfører at energien turbinen leverer, i teorien må være betydelig lavere enn energien som er tilført brennkammeret. Det kan se ut til å stemme med den beregnede turbineffekten på 2 kW, men er samtidig vanskelig å stadfeste da tapene som oppstår underveis er vanskelig å estimere. I tillegg driver turbinen kompressoren, som betyr at kompressorarbeidet (og dermed også kompressoreffekten) må derfor være lavere enn for turbinen. Dette ser ut til å være tilfelle, da beregningene gir; $P_{kompressor} = 1,1$ kW. Det kan samtidig stilles spørsmålsteget om det egentlig er et reelt tap ved å drive kompressoren, sett vekk ifra friksjonstap. Dette er fordi kompressoren tilfører denne energien på 1,1 kW til

luften, som igjen går til brennkammeret og videre til turbinen. Selv om dette ikke er tilfellet, kan man på denne måten anta at kompressorarbeidet "går i 0", og at $P_{kompressor}$ også da blir 0. Det ville gitt en virkningsgrad på ca. 3,8 %, noe som ville vært mer enn en dobling fra den beregnede virkningsgraden på 1,7 %. I teorien betyr dette at 3,8 % kan være den høyest oppnåelige virkningsgraden til anlegget, gitt at målingene og beregningene er "feilfri". På den andre siden er dette fortsatt en usikker verdi.

Av den grunn er det veldig stor forskjell i tilført og utnyttet effekt, noe som gir gassturbinen i oppgaven en meget lav virkningsgrad på 1,7 % sammenlignet med rundt 35-40 % som er vanlig for eksempelvis LM2500 (GE, 2020). Når det er sagt, er en virkningsgrad på over 35 % urealistisk å kunne forvente av gassturbinen nyttet i oppgaven, siden den hovedsakelig er konstruert med mål om å være selvgående, men ikke nødvendigvis for å være mest mulig effektiv. En LM2500 på sin side er et resultat av flere år med utvikling og testing, og kan derfor forventes med en god del høyere virkningsgrad. Det vil i tillegg alltid oppstå tap mellom brennkammeret og turbinen, men et tap på 98,3 % må diskuteres. En mulig forklaring kan være at en turbolader ikke er effektiv nok til å kunne brukes som en gassturbin, hvor man (etter samtale med veileder) setter en virkningsgrad på rundt 10 % som et minimumskrav. Turboladeren er konstruert for å øke energien til luften som skal inn i brennkammeret, og ikke for å produsere energi som skal utnyttes videre. Dette kan kunne forklare hvorfor virkningsgraden er så lav til en gassturbin å være. I et forsøk, på en tilsvarende turboladerbasert gassturbin ved maskiningeniør instituttet i Lahore (Pakistan) i 2019, ble det konstruert en liten turbolader-basert gassturbin med en turbolader fra en bil. Forsøket konkluderte med at deres gassturbin hadde en virkningsgrad på under 6 % (Butt, 2019). Dette støtter forklaringen om turboladerens bruk som gassturbin, men reiser samtidig spørsmålet om denne oppgaven fortsatt har en noe lav virkningsgrad.

På den andre siden kan det være vanskelig å si noe om 1,7 % i virkningsgrad er sannsynlig, da både turbin- og kompressoreffekten er beregnet ut fra antatt luft- og avgassmengde. Ved å beregne en antatt luftmengde (\dot{m}_l) ender vi opp med en luftfaktor¹⁷ på 2,2, som er veldig lavt i forhold til en mulig oppnåelig verdi på over 70 (Rolls-Royce 2005, s.13). Det vil samtidig være noe usikkerhet ved beregningen av brennstoffmengden (\dot{m}_B) på grunn av den utførte testens målenøyaktighet av brennstoffet før og etter testkjøring. Ved feil luftmengde følger også at avgassmengden (\dot{m}_g) blir påvirket, da disse to avhenger av

¹⁷ Forholdet mellom total luftmengde tilført, og teoretisk luftmengde per kg brennstoff.

hverandre. Ser man på den beregnede luftmengden på 0,0428 kg/s i forhold til kompresorkartet, tyder også dette på ukorrekte verdier i luftmengde, siden man ikke kommer innenfor turboladerens driftsområde ved 81 000 rpm. Denne antakelsen i seg selv er ikke god nok til å slå fast at den beregnede luftmengden er feil, men oppsummert anses det likevel som godt nok til å konstatere at det trengs mer nøyaktige målinger av luftmengde for å kunne si med sikkerhet om virkningsgraden på 1,7 % er rimelig eller usannsynlig. En anbefaling ville derfor vært å montere en form for luftmengdemåler ved innløpet av kompressoren. Hvis dette kunne blitt kombinert med en mer nøyaktig metode for måling av brennstoffmengde, ville det vært enklere å estimere en mer nøyaktig virkningsgrad. En annen mulighet som kunne bidratt til å øke virkningsgraden, samtidig med å undersøke hvor mye varmetapet har og si, er å isolere med en form for varmeisolerende bandasje. Dette er bl.a. benyttet på gassturbinen fra HVL, men virkningen av bandasjen er ikke blitt diskutert videre i den oppgaven.

5.6 Fremtidig bruk

Gjennom drøftingen som nå er gjort, ser det ut til at det har åpnet seg flere muligheter for denne plattformen til fremtidig bruk. Et viktig punkt som er nevnt, er blant annet et ønske om å videreføre gassturbinen som en læringsplattform for fremtidige kadetter. Gjennom implementering av PLS som kontrollsystem, har det åpnet for mange muligheter innenfor elektro og automasjon. Dette gjør det mulig å samarbeide på tvers av de tre tekniske linjene ved fremtidige bacheloroppgaver ved Sjøkrigsskolen, hvor det nå spesielt har blitt flere muligheter innenfor det datatekniske. I undervisningssammenheng kan plattformen brukes til å forstå prinsippet og oppbyggingen av en gassturbin, men bør fortsatt videreutvikles før de målte dataene blir benyttet til matematiske beregninger. Dette med hensyn på eksempelvis usikkerheten knyttet til mengde luft tilført i gassturbinen. Uavhengig av målingene, vil det også være en interessant læringsarena for å bedre kunne forstå virkningsgrad og hvilke faktorer den påvirkes av. Selv om prinsippet med gassturbiner er mest interessant for maskinkadetten, er det også muligheter til å bruke plattformen i den generelle ingeniørfaglige undervisningen. Hvis eksempelvis PLS fortsetter å være en del av pensumet for de tekniske linjene, er plattformen en ypperlig mulighet til å vise hvordan elektriske komponenter samspiller med hverandre og systemet de er en del av. Det åpner også mulighetene for lab undervisning på tvers av fagfelt.

6 Konklusjon

Denne oppgaven har arbeidet med å **videreutvikle en turbolader-basert gassturbin slik at det er mulig å beregne anleggets termiske virkningsgrad**. For å oppnå dette har plattformen blitt instrumentert med trykk- og temperatursensorer i følgende målepunkter: kompressorinnløpet, kompressorutløpet, turbininnløpet og turbinutløpet. Det har også blitt montert en turtallssensor på kompressorsiden av turboladeren, for å kunne overvåke turtallet til gassturbinen under drift. I tillegg har det gamle kontrollsystemet blitt erstattet med PLS, som nå gjør det mulig å lese av data ved bruk av PC.

Gjennom testing, analyse og drøfting er det kommet frem til at både turtall-, trykk- og temperatursensorer gir ut nøyaktige verdier nok til å kunne nyttes i beregning av termisk virkningsgrad. Dette krever imidlertid flere antakelser, hvorav den tilførte luftmengden til gassturbinen er av så stor usikkerhet, at virkningsgraden kun kan estimeres grovt. Anleggets termiske virkningsgrad er her estimert til 1,7 %. Konklusjonen er derfor at det trengs mer nøyaktige målinger av luftmengde for å kunne si med sikkerhet om virkningsgraden ligger på 1,7 %.

Gitt at oppgavens virkningsgrad ikke er så langt fra sannheten, er en mulig forklaring at turboladere ikke er effektiv nok til å kunne brukes som en gassturbin. Ved å selv definere virkningsgraden til en "effektiv nok" gassturbin til minimum 10 %, er det derfor interessant å se om instrumentering av luftmengdemåler vil kunne avkrefte eller bekrefte nettopp dette. Hvis det senere blir estimert en mer nøyaktig virkningsgrad som fortsatt er under 10 %, vil dette uansett kunne brukes som en motivasjon til å finne ut av hvor effektiv man kan konstruere denne gassturbinen.

Til slutt har gassturbinen blitt utviklet til en plattform som åpner for samarbeid på tvers av alle de tekniske linjene ved Sjøkrigsskolen. Dens prinsipp og oppbygging kan benyttes i undervisningen til maskinkadettene, mens det datatekniske oppsettet kan brukes i undervisningen til kadettene som går elektronikk eller automasjon. Oppgaven har dermed lagt til rette for en felles plattform som kan nyttes i den tekniske utdanningen ved skolen.

6.2 Anbefaling og videreutvikling

Denne oppgaven åpner som for videreutvikling på tvers av de ulike fagfeltene. Det fins mange muligheter ved en slik oppgave, og det vil være mulig å se på flere ulike utviklingsområder samtidig. Basert på hva oppgaven anser som interessante og viktige, har det blitt utarbeidet noen anbefalinger til videre arbeid.

6.2.1 Måleinnretning for luft- og brennstoffmengde

Som nevnt i konklusjonen er oppgaven avhengig av mer nøyaktige målinger av luftmengde for å kunne si med sikkerhet om den beregnede virkningsgraden er rimelig eller usannsynlig. Det anbefales derfor å montere en luftmengdemåler ved kompressorinnløpet. Ved å kombinere dette med en innretning som kan måle brennstoffmengden mer nøyaktig, vil det minimere/fjerne de største usikkerhetsmomentene som plattformen har i dag. Dette vil gjøre det mulig å si noe mer sikkert om hvor god gassturbinen faktiske er, samtidig som det ville tilføre gassturbinen en mer komplett sensorpakke.

6.2.2 Selvstendig oppstart

Gassturbinen i denne oppgaven krever et hvis turtall for å starte forbrenningen, noe som gjøres ved hjelp av en løvblåser. Ved å utnytte PLSens muligheter til styring av elektriske komponenter, skal det være mulig å få til en automatisk oppstart ved bruk av en elektrisk blåser. Dette vil gjøre oppstartsprosessen betydelig enklere.

6.2.3 Kraftturbin

På grunn av at overvåkingssystemet krever en stabil spenningskilde til å fungere tilfredsstillende, ser vi på montering av en kraftturbin som en anbefaling til videreutvikling. Kraftturbinen vil da, forhåpentligvis, kunne produsere nok spenning til å drifte det elektriske systemet, samtidig som den opprettholder tilfredsstillende spenningen på batteriet. Det vil da være mulig å nyttiggjøre seg av energien som gassturbinen produserer, istedenfor at den kun forbruker brennstoff uten noe "nytteverdi" slik den er nå.

6.2.4 Videreutvikling av fremvisning og lagring av data

Et annet videreutviklingspotensial er innenfor fremvisning og lagring av data. På grunn av den begrensede prosesserings kapasiteten til PLSen, anbefaler vi å se på andre muligheter for behandling og lagring av data ved bruk av en egen database. I tillegg ble det anbefalt av Wago Norge å nytte programmet Grafana til å framstille måleverdiene grafisk, og videreformidler derfor dette. Oppgaven anbefaler også å benytte en egen skjerm til grafisk framvisning av måledata på kontrollpanelet. Kontrollpanelet er i utgangspunktet designet for en 7" skjerm type 762-4103 fra Wago, men dette er ingen fasit.

Bibliografi

Litteratur

1. Bernhardt, Frank, Günter Ackermann, og Hansheinrich Meier-Peter, red (2009). *Compendium marine engineering: operation, monitoring, maintenance*. Hamburg: Seehafen Verlag.
2. Boyce P. Meherwan (2012). *Gas turbine engineering handbook* (4. utg.). Butterworth-Heinemann.
3. Norges Tekniske høyskole, institutt for forbrenningsmotorer (1967). *Måleteknikk for forbrenningsmotorer* (2. utg.). Trondheim: ukjent forlag.
4. Lund, Ansgar (2012). *Termodynamikk og strømningslære*. (2. utg.). Bergen: Fagbokforlag.
5. Hanssen, Dag Håkon (2015). *Programmerbare logiske styringer: en praktisk tilnærming til standarden IEC 61131-3: basert på CoDeSys*. 4. utg. Bergen: Fagbokforlag.
6. Bergquist Espen og Seth Magnus (2014). *Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin*. HVL, Bergen.
7. Johannes Bøe Finden Olav og Panfilovs Mihails (2019), *Konstruksjon av gass-turbin til undervisningsformål*, Sjøkrigsskolen.
8. H. I. H. Saravanamuttoo, Cohen, H. og G. F. C. Rogers (2009). *Gas turbine theory*. 6th ed. Harlow: Addison Wesley Longman.
9. Rolls-Royce (2005). *The jet engine*. London: Rolls-Royce.
10. Engebretsen, Bjørn Vidar (2013). *Automatiseringsanlegg*. 2. utg. Trondheim: Akademika.

-
11. Soares, Claire (2008). *Gas turbines: a handbook of air, land, and sea applications*. Amsterdam: Elsevier.
 12. Sauter, Alexander (2018) *Ingeniørfaglig systemtenkning*. Bergen: Sjøkrigsskolen

Nettsider

1. BorgWarner Turbo Systems (2020) Design and Function of a Turbocharger - Turbine. Hentet 23. mai 2020. <http://www.turbos.borgwarner.com/en/products/turbochargerTurbine.aspx>
2. BorgWarner Turbo Systems (2020). Design and Function of a Turbocharger—Compressor. Hentet 27. mai 2020, fra <http://www.turbos.borgwarner.com/en/products/turbochargerCompressor.aspx>
3. BorgWarner (2020). «Downloads | BorgWarner Turbo Systems». Hentet 27. mai 2020. <http://www.turbos.borgwarner.com/en/press/downloads.aspx>.
4. Node-RED (2020). Lecture 1 – A Brief Introduction to Node-RED – Node RED Programming Guide». Hentet 3. juni 2020. <http://noderedguide.com/nr-lecture-1/>.
5. Gasnor (2020). Typiske data energi. Hentet 2. juni 2020. <https://gasnor.no/naturgass/typiske-data-energi/>.
6. Jumo (2020). Termoelement i mantelutførelse med kabel iht. DIN 43710 og DIN EN 60584 (901250). Hentet 3. juni 2020. <http://www.jumo.no/produkter/temperatur/termoelementer/etter-egenskaper/b%C3%B8yelig/901250/termoelement-i-mantelutf%C3%B8relse-med-kabel-iht-din-43710-og-din-en-60584-901250.html?parentId=3033>.
7. Nauticalweb (2020). NAUTICALweb - MTU, 8V 183 TE 92 - Marine engines catalogue 002395. Hentet 26. mai 2020. http://www.nauticalweb.com/annuario/marine-engines/id_002395/mtu-8v-183-te-92.htm.
8. Elma-instruments (2020). K0234D Universalføler». Åpnet 5. juni 2020. <https://elma-instruments.no/produkter/k0234d-universalføler.aspx>.

-
9. Elma-instruments (2020). 108 Temperaturføler Luft/Røykgass. Åpnet 5. juni 2020. <https://elma-instruments.no/produkter/108-temperaturfoeler-luft-roeyk-gass.aspx>.
 10. Impex Produkter (2020). Comark AK27M luftføler. Hentet 5. juni 2020. <https://www.impex.no/produkt/temperaturmaaler/temperaturfoeler/comark-ak27m-luftfoeler/>.
 11. Marfag (2020). F05 Skipsmaskineri I. Bok. Hentet 14. juni 2020. <https://www.marfag.no/f05>.
 12. OEM Automatic (2020). OEM Automatic AS. Hentet 14. juni 2020. <https://www.oem.no/>.
 13. Marfag (2020). K08 Skipsmaskineri II. Bok. Hentet 14. juni 2020. <https://www.marfag.no/k08>.
 14. Turbokits (2020). Garrett Turbocharger Speed Sensor Kit - with Gauge - 781328-0001. Hentet 14. juni 2020. https://www.turbokits.com/Turbo_Chargers/Garrett/GTX_Gen_II_Series/Garrett_Turbocharger_Speed_Sensor_Kit_-_with_Gauge/6755/.
 15. WAGO Norge. Reliable Solutions for Many Sectors and Industries. Hentet 14. juni 2020. <https://www.wago.com/no>.
 16. HowStuffWorks (2000). How Turbochargers Work, Hentet 4. desember 2019. <https://auto.howstuffworks.com/turbo.htm>.
 17. Shengzhou Beno Electric Appliance Co. (2020). Termoelement: Grunnleggende prinsipp og design. Hentet 21. juni 2020. <http://no.benoheating.com/info/thermo-couple-basic-principle-and-design-22776143.html>.
 18. Statistisk sentralbyrå (2019). Energistatistikk, Statistisk sentralbyrå og Oljedirektoratet Hentet 21. juni 2020. <https://www.ssb.no/a/magasinet/miljo/tabell.html>.
 19. Asme. Anderson, Mark R (2019). Comprehensive Smith Charts for Axial Compressor Design. Hentet 4. Juni 2020. <https://doi.org/10.1115/GT2019-91569>.
 20. Celetron (2020). «Turbo Kompressoren ~ Celeroton AG - Ultrahochdrehende elektrische Antriebssysteme». Åpnet 22. juni 2020. <https://www.celeroton.com/de/technologie/turbo-kompressoren.html>.
 21. Steemit (2020). «Detailed Working of a Gas Turbine Engine Combustion Chamber». Steemit, 12. oktober 2017. <https://steemit.com/aircraft/@aeroatoz/detailed-working-of-a-gas-turbine-engine-combustion-chamber>.

-
22. Howtomechatronics (2020). «What is Hall Effect and How Hall Effect Sensors Work - HowToMechatronics». Åpnet 22. juni 2020. <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/hall-effect-hall-effect-sensors-work/>.
 23. SimScale (2020). «What Is Laminar Flow?» Åpnet 22. juni 2020. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-laminar-flow/>.
 24. Made-in-China.com (2020). «[Hot Item] Factory Price for Programmable Logic Controller PLC for Intelligent Control (Programmable Relay PR-14DC-DA-R)». Åpnet 22. juni 2020. <https://rievtechplc.en.made-in-china.com/product/PBCnxIevEOcg/China-Factory-Price-for-Programmable-Logic-Controller-PLC-for-Intelligent-Control-Programmable-Relay-PR-14DC-DA-R-.html>.
 25. Thermocoupleinfo (2020). «Thermocouple Types - Types of thermocouples - Comparison of Thermocouple Types». Åpnet 22. juni 2020. <https://www.thermocoupleinfo.com/thermocouple-types.htm>.
 26. Butt, M. U. (2019). Converting an automobile turbocharger into a micro gas turbine. Hentet 19.06.2020 fra <file:///C:/Users/eatha/Zotero/storage/P2XE7A6W/Butt%20-%202019%20-%20Converting%20an%20automobile%20turbocharger%20into%20a%20micro.pdf>

Vedlegg A Budsjett

Leverandør	Produktinformasjon	Kostnad
Ahlsell	Innvendig kopling slange 3/8"	116
Ahlsell	Nippel utvendig 1/4"	25
Biltema	Oljefilter biltema	94,9
Biltema	Alumin rør for sportluftfilter	139
Biltema	Slangeklemme 3`` 2stk	51
Biltema	Olje 10w-40 4 L biltema	189
Biltema	sportluftfilter	179
Biltema	Kantlist	95
Biltema	Albuebend 1/4" (R8)	37
Biltema	Fenderfeste 5mm	40
Biltema	2 stk. slangesokkel 1/2"x 1/2"	94
Clas Ohlson	Kabelsamler Svart x2	140
do88	Silikonslange overgang 3"-4"	235
do88	Slangeklemme 4"	14
EL materialer AS	4 stk skapmuffer 16 mm	68
EL materialer AS	4 stk skapmuffer 20 mm	76
EL materialer AS	Fordelingsskap ABB MISTRAL (EL-skap)	895,7
Elfra distrelect	DC/DC Omformer 12-24 V	1492,19
Elma instruments	108 Luft/røykgass/vent.temp.føler type K	748
Elma instruments	K0234D Universalføler Type K	795
Gass Service AS	Fylling av 11kg propantank	329
Impex produkter AS	2 stk. Comark AK27M luftføler	1916
OEM Automatic	4x Trykktransmittere + mva	7075
Turbokits.com	Garret speedsensor kit	3444,48
Økonomi-deler	Strupeventil 400 bar 1/2"	455
	Totalt brukt	18743,27

Vedlegg B Avvik i forhold til brukermanualen

Det har blitt gjort endringer på gassturbinen som gjør at brukermanualen som ble skrevet etter konstruksjonen avviker fra nåværende brukermanual.

Endringene er som følger;

- Steg en i oppstarten forklarer hva som må gjøres for å sikre brennstofftilførsel til brennkammeret. Det som avviker slik gassturbinen er nå fra brukermanualen er at **nød ventilen er fjernet** fra brennstoffsystemet.
- Det som er tilføyd gassturbinen er alt tilhørende som representerer PLSen, tur-tallsensorer, trykksensorer og temperatursensorer. Spesifikasjonene og plasseringene om overnevnte komponenter finnes i Vedlegg C

Vedlegg C Elektriske tilkoblinger og innhold i EI-skapet

Deler som er koblet til PLS`en og modulene er;

Hva modulen brukes til	Produktnummer	Inngangssignaler	Tilkoblinger	Produsent
Kontroller	750-8212	-	Kobler sammen modulene	WAGO
Frekvensteller	750-404/000-003	DC 24V	Turtallsensor	WAGO
Temperatursensorer	750-458	Termoelement, Lav Spenning	T1, T02, T03, T04	WAGO
Trykksensorer	750-455	DC 4-20mA	P1, P02, P03, P04	WAGO
Omformer DC 12V/DC 24V	8862	-	Koblet til PLS og sikringsboksen	Mascot
Transistor fra 5V til 24V	-	-	Forsterker signalet fra turtallsensoren	Egenprodusert på skolen
Rød rekkeklemme	-	24V	PLS og omformer	WAGO
Sort rekkeklemme	-	0V	Jordingspunkt	WAGO
Wago klemmer	-	12V	Turtalsensor og sikringsboks	Wago

Vedlegg D Notater til videreutvikling av overvåkingssystemet

Notater til hjelp for videreutvikling av overvåkingssystemet.

PLS'en har IP-adressen 192.168.118.137. Enten den er del av skolenettverket eller lager et eget nettverk (da må DHCP-service slås på i PLSen). Når DHCP er på så kan man koble seg til med nettverkskabel og får en IP-adresse som passer (192.168.118.10-192.168.118.100). Når PLSen er del av skolenettverket så har den internett-tilgang. For at man får tilgang til PLSen og for at PLSen finner internett-sider må NTP, gateway og DNS settes i web-based-management (stort sett default-innstillingene for skolen).

Tidsserver: 192.168.3.233

DNS: 8.8.8.8

Gateway: 192.168.118.1 (static routs enabled)

Dessuten ble det også aktivert: FTP, SSH (brukes snart), HTTP og HTTPS

e!Runtime webserver er 'enabled' for at man kan lage en webvisualisering.

PLSen heter PFC200V3-46DFB6 (brukes i OPC-UP-kommunikasjonen i Node-RED)

Physical location er satt til «TurboTurbine» (uten at det har noe å si).

Firmware er som levert av Wago (ikke oppdatert til nyeste).

Når PLSen er i nettverket så kan man installere Dokker, Portainer (for å administrere dokker) og influxdb og grafana som vist i

Dokker installasjon etter <https://www.youtube.com/watch?v=NeVhWc4ReHc> til 1:50

Portainer installasjon etter <https://www.youtube.com/watch?v=EswrYVnwUW8>

Sjekk for influxdb og grafana: <https://www.youtube.com/watch?v=BBcj-ZoufMw>

Dokker-hub images (=programvaren) som ble brukt:

mariadb: `docker pull mariadb`

influxDB: `docker pull influxdb`

Node-RED: docker pull nodered/node-red

Grafana: docker pull grafana/grafana

mariadb: webhippie/mariadb

(Installeres under images -> add command
without 'docker pull')

Mariadb (og mysql) ville ikke fungere helt, litt uklart hvorfor. Muligens var programvaren ikke optimert for denne type prosessoren. Derfor er det 'bare' Node-RED, influxDB som database og Grafana tilgjengelig.

Alle (foreløpig uten grafana) startes automatisk ved oppstart og med tilgjengelig port

Volumes:	Port:
node-red_data	1880
influxdb_data	8086
grafana_data	3000
mariadb	3306

Grafana er default user og passord:

admin admin

I Node-RED er det installert følgende paletter (ikke alle brukt):

node-red-contrib-netvar

node-red-contrib-opcua

node-red-dashboard

node-red-contrib-influxdb

Influxdb måtte først få en database som man så kan lagre data i:

Det kan gjøres fra en linux-maskin som har curl-installert (jeg hadde en i skolenettet; ellers kan det installeres via `sudo apt install software-properties-common curl`) via:

```
curl -G http://192.168.118.137:8086/query --data-urlencode "q=CREATE DATABASE mydb"
```

som lager en database med navn 'mydb' (går også an via node-red)

Man kan også legge inn datapunkter på samme måte, i stil etter følgende:

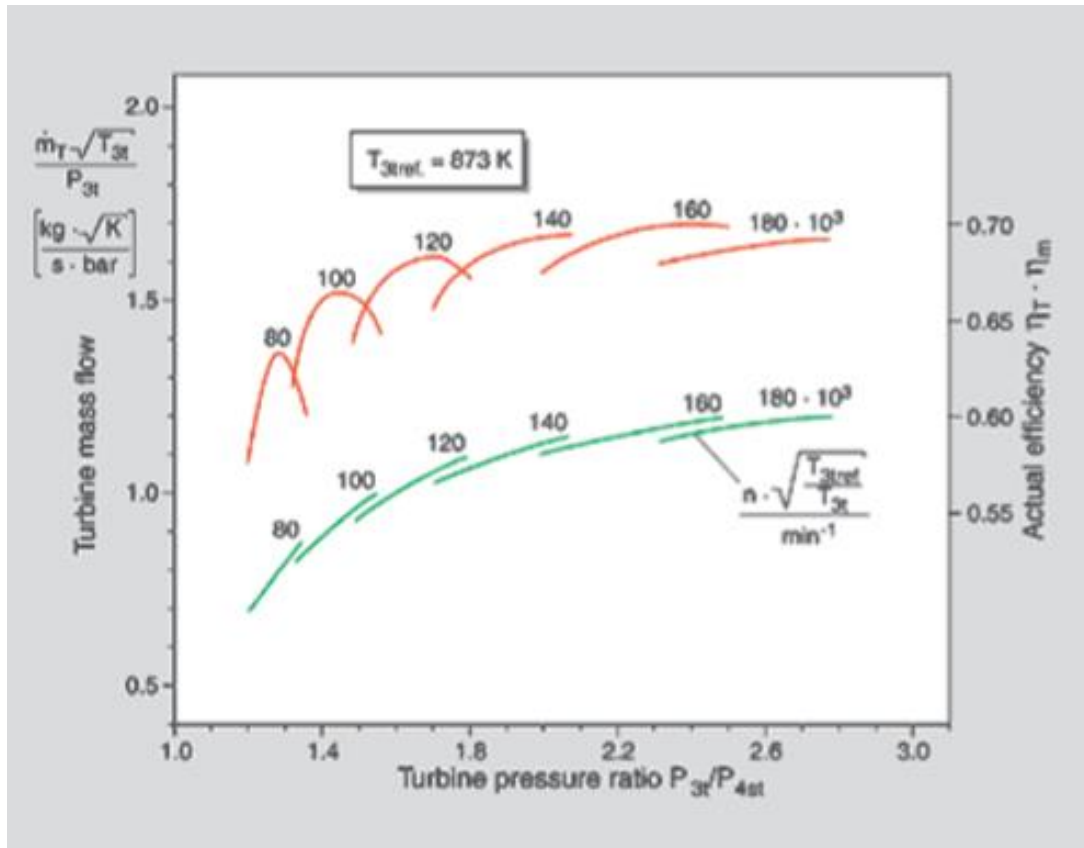
```
curl -i -XPOST 'http://localhost:8086/write?db=mydb' --data-binary 'cpu_load_short,host=server01,region=us-west value=0.64 1434055562000000000'
```

mer informasjon under:

https://hub.docker.com/_/influxdb

<https://devconnected.com/how-to-create-a-database-on-influxdb-1-7-2-0/>

Vedlegg E Radialturbin karakteristik



Vedlegg F Eksterne Vedlegg

1. Monteringsanvisning Garret Turbo Speedsensor
2. Datablad Jumo Termoelement
3. Datablad Comark AK27M termoelement
4. Datablad PCE-28 Aplisens trykksensorer 0-4bar og 0,8-1,2bar.
5. Brukermanual til gassturbin
6. Datablad til de ulike modulene og PLS kontrolleren.