

Nytt brennkammer til Institutt for Maskin- og Marinfag sin modell-gassturbin

Henriette Sørbotten
Rita Ones Fosse

Bacheloroppgave i Allmenn Maskinteknikk
Bergen, Norge 2019



Høgskulen
på Vestlandet

Nytt brennkammer til Institutt for Maskin- og Marinfag sin modell-gassturbin

Henriette Sørbotten
Rita Ones Fosse

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmer

English title: New combustion chamber for the Institute of Marine and Mechanical Engineering model gas turbine

Forfatter(e), studentnummer: Henriette Sørbotten 181322
Rita Ones Fosse 181338

Studieprogram: [Maskinteknikk]
Dato: Mai 2019
Rapportnummer: IMM 2019-M10
Veileder ved HVL: Lars Magne Nerheim HVL ansatt
Oppdragsgiver: HVL
Oppdragsgivers referanse: Lars Magne Nerheim

Antall filer levert digitalt: 1/1

Forord

Dette prosjektet er gitt ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL), og er en hovedoppgave ved bachelorstudiet i allmenn maskinteknikk. Veileder for denne oppgaven er førsteamanuensis Lars Magne Nerheim.

Vår motivasjon for å velge denne oppgaven var at vi fikk muligheten til å gjøre både teoretisk og praktisk arbeid. Vi syntes faget «Termiske maskiner» var et spennende fag og ønsket derfor en oppgave innenfor dette området.

Vi ønsker å takke alle de som har hjulpet oss med å gjennomføre dette prosjektet. Overingeniør Harald Moen som har stått for innkjøp av diverse utstyr som var nødvendig, Tekniker Sergio V. Martinez Castro som har gjort alt sveisearbeid på brennkammeret og forskningstekniker Kjetil Gravelsæter som har maskinert komponentene vi behøvde. Vi vil også takke laboratorieingeniør Frode Wessel Jansen som har vært vår «altmuligmann» og alltid vært behjelpelig dersom vi hadde behov for det. Alle de overnevnte har i tillegg vært hjelpsomme med tips og triks for det praktiske arbeidet og for kjøring av testen, noe vi setter stor pris på. Vi har følt oss godt tatt imot av laboratoriestaben og vil takke samtlige for god hjelp.

Vi vil gi en stor takk til bedriftene FRAMO Flatøy og FRAMO Holsnøy for rør til oppgaven og til Høgskulen på Vestlandet (HVL) for en spennende oppgave og finansiering av denne. Til slutt vil vi takke vår veileder Førsteamanuensis Lars Magne Nerheim for deling av kunnskap, i tillegg til god veiledning og engasjement gjennom hele prosjektet.

Sammendrag

Denne oppgaven er den syvende oppgaven på IMM sin modell gassturbin, og det har her vært fokus på en praktisk tilnærming med enkle utregninger for å, om mulig, forbedre dagens design.

Målet med det nye designet er en jevn temperaturfordeling sentrert i flammerøret i tillegg til en mer fullstendig forbrenning. Luftinnløpet er på toppen av brennkammeret for å unngå at flammen blåses mot en side. Brennerheten blir brukt for å lage en mer homogen blanding av luft og propan før det antennes, og på denne måten unngå høye spisstemperaturer midt i flammen. Utløpet av det nye brennkammeret er større enn det gamle for at åpningen skal samsvare bedre med turbinen, og videre unngå unødvendig trykktap. Flensen i toppen har åtte bolter som skal tette bedre mellom flensene.

For å få mest mulig sammenlignbart resultat er det viktig at forbruket av propan og luftstrømmen er lik gjennom testingen av begge brennkamrene. Testingen ble derfor gjort i en rigg for å ha bedre kontroll på de ulike parameterne, og forenkle testprosessen.

«Godheten» til brennkamrene sier noe om forholdet mellom praktiske målinger og teoretiske beregninger. Det var liten forskjell på godheten til brennkamrene, det er derfor vanskelig å si noe om hvilket kammer som er best basert på godheten. Når verdier for O_2 og CO_2 sammenlignes under ulike propantrykk viser forsøkene at det nye designet klarer å forbrenne større mengder propan enn det gamle. Med andre ord gir det mulighet for en ytelsesøkning med lavere luftoverskuddstall.

Abstract

This project is the seventh project done on IMM's model gas turbine. In this assignment the focus has been on solving the problem with a practical approach.

The goal with the new design is to get a more even distribution of temperature in the flame tube, as well as a more complete combustion. The air intake is at the top of the combustion chamber, to keep the flame centered. The burner is used to make a more homogenous mixture of air and propane before ignition. This is to avoid high peak temperatures in the flame. The outlet of the new combustion chamber is made larger than the previous one. By doing this the opening fits better to the turbine's inlet. The flange at top has eight bolts to avoid leakage.

It is important that the consumption of propane and the airflow is equal throughout the testing of both the chambers. This is to get a comparable result. The different tests were done in a rig to get better control over the different parameters and to simplify the process.

The "goodness" of the two combustion chambers says something about the ratio between practical measurements and theoretical calculations. There is little or no difference between "goodness" in the two combustion chambers. Therefore it is hard to say if the new combustion chamber is better or not. By comparing different values of O_2 and CO_2 under different amounts of propane the trend shows that the new chamber is able to combust more amounts of propane than the old one. In other words, this gives the possibility for increased performance with lower air-fuel-ratio.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	3
Sammendrag.....	5
Abstract.....	7
Nomenklatur.....	11
1. Innledning.....	13
1.1 Problemstilling.....	14
2. Teoretisk bakgrunn.....	15
2.1 Brayton-syklus.....	15
2.2 Homogen- og diffusjonsforbrenning.....	15
2.3 Lambda og utslipp.....	16
2.4 Målinger.....	16
2.4.1 Avgassmåling.....	16
2.4.2 Trykkmåling.....	18
3. Sammendrag av tidligere undersøkelser.....	19
3.1 “Numerical Study of a Microturbine Combustor “ fra 2018.....	19
3.2 “Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin” fra 2014.....	20
3.3 “Ferdigstilling av institutt for maskin- og marinfag sin modell-gassturbin” fra 2017....	20
4. Fremgangsmåte.....	21
4.1 Konklusjoner fra tidligere resultater.....	21
4.2 Noen antagelser for forsøkene.....	21
4.3 Nytt brennkammerdesign.....	21
4.3.1 Brenner.....	22
4.3.2 Utvendig design.....	24
4.3.3 Flammerør.....	25
4.3.4 Luftinnløpet.....	26
4.3.5 Målepunkter.....	26
4.4 Brennkammer-rigg.....	26
4.5 Endringer gjort på det gamle brennkammeret.....	27
5. Testing i rigg.....	29
5.1 Strategi.....	29
5.2 Målinger.....	29
5.3 Kald test.....	30
5.3.1 Fremgangsmåte.....	30
5.4 Varm test.....	31
5.4.1 Fremgangsmåte.....	31

6.	Resultater	33
6.1	Erfaringer med det nye designet.....	33
6.2	Måleresultater	34
6.2.1	Resultat fra kald test.....	35
6.2.2	Delforsøk 1.....	36
6.2.3	Delforsøk 2.....	37
6.2.4	Delforsøk 3.....	38
6.2.5	Delforsøk 4.....	39
6.2.6	Trend av temperaturfordeling.....	40
6.3	Usikkerheter	40
7.	Diskusjon	42
7.1	Designendringer.....	43
7.1.1	Resultater	45
7.2	Godhetsgrad.....	46
7.3	Forslag til videre arbeid med brennkammeret.....	47
8.	Konklusjon	48
	Referanser.....	49
	Figurliste.....	50
	Tabelliste	50
	Vedlegg.....	51
	Vedlegg 1: Formler	51
	Måleblende.....	51
	Måleresultat til graf	52
	Trykkmåling	53
	Godhetsgrad.....	54
	Vedlegg 2: Arbeidstegninger	56

Nomenklatur

$A = \text{Areal [m}^2\text{]}$

$AFR = \text{blandingsforhold [kg}_{\text{luft}}/\text{kg}_{\text{propan}}\text{]}$

$D = \text{Diameter [m]}$

$C_d = \text{Friksjonskoeffisient}$

$f = \text{Frekvens [Hz]}$

$I = \text{Strøm [mA]}$

$l = \text{Lengde [m]}$

$L_{\min} = \text{Støkiometrisk blandingsforhold [kg}_{\text{luft}}/\text{kg}_{\text{propan}}\text{]}$

$\dot{m} = \text{Massestrøm [kg/s]}$

$P = \text{Trykk [Pa]}$

$Q = \text{Volumstrøm [m}^3/\text{s]}$

$T = \text{Temperatur [K]}$

$T_0 = \text{Omgivelsestemperatur [K]}$

$v_{Lr} = \text{teoretisk luftbehov på volumbasis [Nm}^3_{\text{luft}}/\text{kg}_{\text{propan}}\text{]}$

$X = \text{Godhetsgrad basert på CO}_2$

$Y = \text{Godhetsgrad basert på O}_2$

$\beta = \text{Forholdstall, D2/D1}$

$\pi = \text{Pi [3,14159]}$

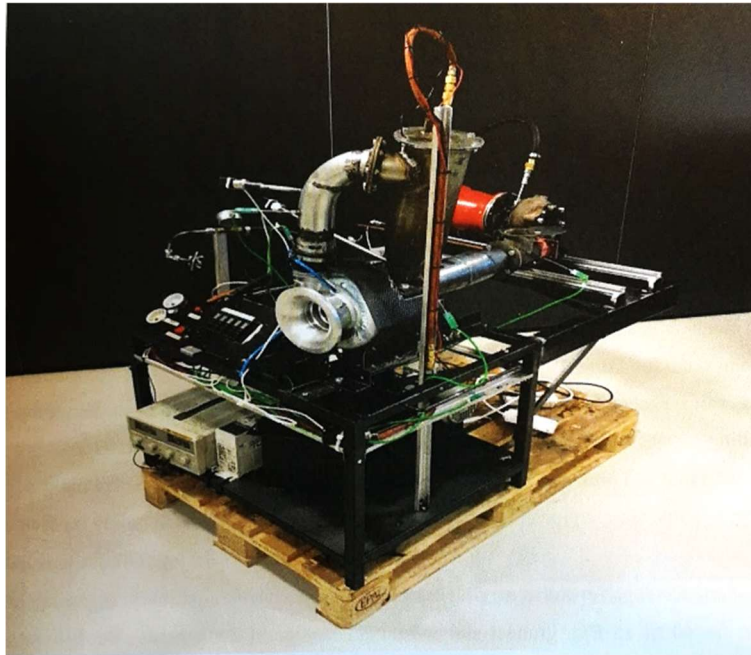
$\rho = \text{Tetthet [kg/m}^3\text{]}$

$\lambda = \text{Lambda, luftoverskuddstall}$

1. Innledning

I 1791 ble det tatt patent på gassturbin for første gang av engelskmannen John Barber. Den første gassturbinen som leverte positiv effekt ble bygget av Ægidius Elling, en norsk ingeniør, i 1903. Det var ikke før i 1939 at industri-gassturbinen kom på markedet. Denne ble bygget av Brown Boveri & Cie, et sveitsisk firma, i dag ABB.

IMM sin gassturbin ble bygget i 2012 som et hovedprosjekt, det har videre vært 4 andre oppgaver som har tatt utgangspunkt i forbedring av denne gassturbinen. Nye komponenter har blitt bygget, gamle komponenter fikset og målinger foretatt. Det har i tillegg vært en master oppgave som har sett på mulige forbedringer av brennkammeret, det er denne oppgaven som har vært utgangspunkt for vår oppgave. Ambisjonene med oppgavene er at gassturbinen skal være lett kjørbar for studenter og gi interessante resultat ved testing.



Figur 1: Bilde av gassturbin med dagens brennkammer [2]

Kompressoren er fra en Holset HX55 turbo, og passer til en 7-10 liters motor. Den kan levere en massestrøm av luft på 0,75 kg/s under optimale forhold [3]. Kompressoren er kombinert med en Holset H2C turbin som var ny da den ble montert til gassturbinen.

Å designe et brennkammer ved bruk av en teoretisk fremgangsmåte er tidkrevende og omfattende, det vil derfor i denne oppgaven bli fokus på en praktisk tilnærming med enkle utregninger for å, om mulig, forbedre dagens design. Test av det gamle brennkammeret og det nye brennkammeret vil bli gjort i en rigg for å forenkle forsøkene, da det tidligere har vært problemer med kjøring av gassturbinen, mer om dette under kapittel 5.

Det gamle brennkammeret har en del svakheter som gruppen ønsker å forbedre ved å lage et nytt brennkammer. Det gamle brennkammeret har problemer med skjev temperaturfordeling, ufullstendig forbrenning og høy spiss-temperatur som igjen gir høy NO_x . Med det nye designet er målet å få en jevnest mulig temperaturfordeling på et generelt lavere temperaturnivå. Dette forsøkes oppnådd gjennom høyere andel homogen-forbrenning. Antar da at det vil gi lavere maksimal temperatur (T_3) og lavere NO_x . I tillegg vil et lavere temperatur-nivå gi potensiale for ytelsesøkning.

1.1 Problemstilling

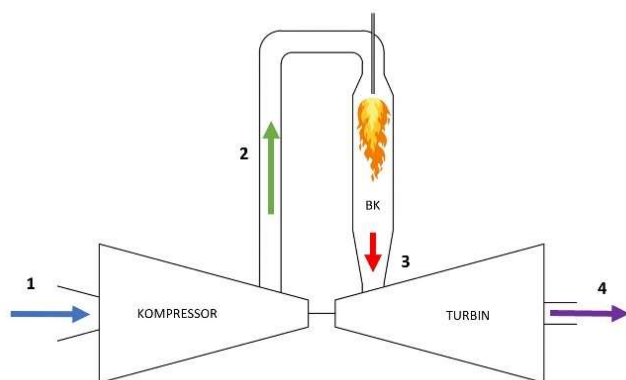
Mål for oppgaven er i hovedsak å få en jevnere temperaturfordeling i tillegg til en mer fullstendig forbrenning i brennkammeret til IMM sin modell gassturbin. Dette gjøres ved å designe, bygge og gjøre innledende tester av et nytt brennkammer, blant annet basert på en master-oppgave om dette brennkammeret fra V18.

2. Teoretisk bakgrunn

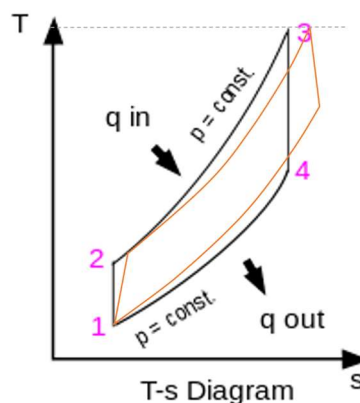
2.1 Brayton-syklus

Brayton-syklusen beskriver en lukket og ideell gassturbin-syklus som omdanner varm gass til mekanisk arbeid. Syklusen består av 4 trinn; adiabatisk kompresjon, isobar oppvarming, adiabatisk ekspansjon og isobar nedkjøling. Den brukes ofte i system der den utgående gassen ikke blir sendt ut som eksos men heller brukes på nytt. I en vanlig gassturbin brukes ikke eksosen på nytt, her blir heller frisk luft sugd inn i kompressoren, noe som medfører at syklusen er åpen istedenfor lukket [4]. Generelt ligner Brayton-syklusen på dieselsyklusen ved at den har konstant trykk under forbrenning, men den foregår på et lavere trykknivå og har lengre ekspansjon ned til omgivelsestilstand.

I kompressoren økes trykket gjennom kompresjon før den går inn i brennkammeret, vist som punkt 1-2 i Figur 3 og Figur 2. I brennkammeret blandes luften sammen med drivstoff og gassblandingen antennes under konstant trykk, punkt 2-3. Den oppvarmede gassen går videre inn i turbinen med høyt trykk og høy temperatur og blir ekspandert ned mot atmosfærisk trykk, punkt 3-4. Turbinen driver kompressoren og eventuell overskuddsenergi kan drive en kraftturbin som igjen kan drive en elektrisk generator. Den reelle syklusen er vist i oransje i Figur 2. Der er det trykktap under forbrenningen, og trykket blir ikke ekspandert helt ned til atmosfæren i turbinen. Kompresjonen og ekspansjonen er ikke adiabatisk [5]. Verdien for arealet i T-s diagrammet er lik arbeidet gassturbinen kan gi.



Figur 3: Skisse av de viktigste komponentene i en gassturbin



Figur 2: T-s diagram av Brayton-syklusen

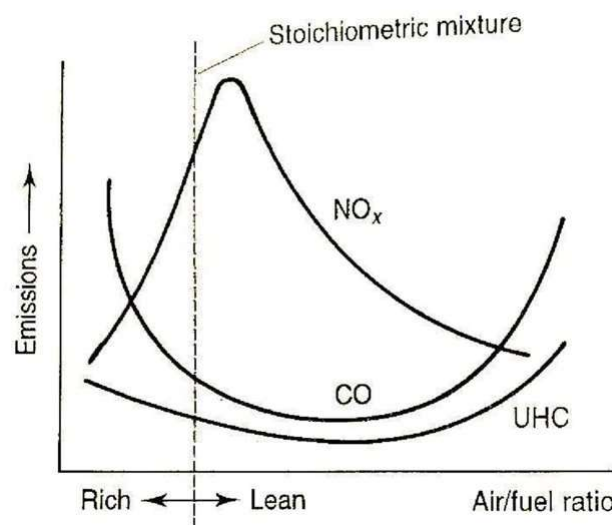
2.2 Homogen- og diffusjonsforbrenning

Det finnes to ulike typer forbrenning, homogen forbrenning og diffusjonsforbrenning. Homogen forbrenning er en forbrenning der brennstoff og luft blir blandet sammen før tenning. Denne typen forbrenning gjør at en unngår fete og magre områder i blandingen. I diffusjonsforbrenning er ikke luft og drivstoff blandet på forhånd. Drivstoff sprøytes inn i røret og diffunderer med oksygen for så å reagere. I denne typen forbrenning vil det være lokale forskjeller på luftoverskuddstallet i blandingen. Det vil være områder med fet blanding og områder med mager blanding. Utslipp og temperaturnivå vil være vanskelig å styre via blandingsforholdet lambda.

2.3 Lambda og utslipp

Luftoverskuddstall, eller lambda, er et tall på hvor mye oksygen det er i blandingen i forhold til teoretisk nødvendig oksygen. Høye verdier av lambda vil si at blandingen er mager. Ved en lambda lik 1 er det verken luft over- eller underskudd, da er forbrenningen støkiometrisk [6].

Figur 4 viser sammenhengen mellom lambda og utslipp. En magrere blanding gir mindre NO_x , men ved for mager blanding vil forbrenningen bli mer ufullstendig og dannelsen av CO vil øke. Det er da en fare for at flammen slukkes. Ved for fet blanding vil ikke forbrenningen bli fullstendig, dette fører til høye verdier av CO. I tillegg vil det bli tilført mye unødvendig drivstoff som ikke blir utnyttet.



Figur 4: Sammenheng mellom lambda og NO_x [5]

2.4 Målinger

2.4.1 Avgassmåling

Avgassmåling er et omfattende og komplisert fagfelt. Ved Høgskulen på Vestlandet har de flere ulike verktøy for å måle avgasser. En av disse er Horiba PG 350E, som er en avansert avgass analysator. Denne analysatoren måler NO_x , SO_2 , CO_2 , CO og O_2 .



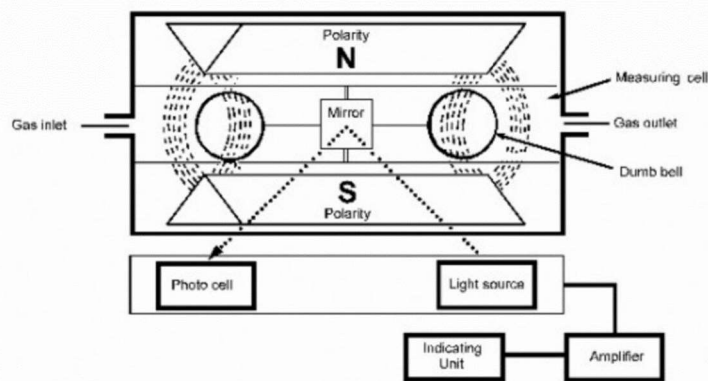
Figur 5: Horiba, avgassanalysator, med tørker og kalibreringsgasser

For å få mest mulig nøyaktige målinger av NO_x må en avgasstørker kobles på Horibaen. Dette fordi NO_2 er lett oppløselig i vann. For å måle konsentrasjonen av NO brukes en metode kalt chemiluminescence (CLD metoden). I den produserte NO gassen er det også NO_2 , det er NO_2 som gjør det mulig å bruke CLD metoden for å måle NO_x . Denne metoden benytter lyset fra reaksjonen når NO_2 endrer tilstand for å måle mengde NO_x .

I Horibaen er det en infrarød analysator som benyttes for å måle CO , SO_2 og CO_2 . Ulike molekyler kan absorbere infrarød stråling ved ulike bølgelengder, det er dette prinsippet som benyttes for å finne konsentrasjon på gassen som måles. CO og SO_2 blir målt ved at infrarød stråling strømmer inn i en detektor som er fylt med en kalibreringsgass. Den energien som ikke blir absorbert av kalibreringsgassen når selve detektoren. Den samme prosessen vil skje når gassprøven strømmer inn i detektoren. Hvis det er forskjell i energien fra kalibreringsgassen og energien fra gassprøven vil denne ulikheten føre til en forskyvning av membranen i detektoren. Denne forskyvningen blir forsterket og produsert som et elektrisk signal. Dette signalet blir kalkulert og prosessert av en CPU.

For å måle CO_2 blir det benyttet to sensorer, en hovedsensor som måler et absorpsjonsbånd av prøven av gass og en referansesensor som måler mengde lys ved en annen bølgelengde enn absorpsjonsbåndet. Den infrarøde strålingen går gjennom gassprøven og blir absorbert, dette fører til at signalene på hoved sensoren blir redusert. Ved å ta signalet fra referanse sensoren subtrahert med signalet fra hoved sensoren får man et signal for prøven av gass. Dette signalet blir dividert med referanse sensoren sitt konsentrasjonssignal. Resultatet av dette er gassprøven sitt konsentrasjonssignal som benyttes for å finne selve konsentrasjonen av CO_2 .

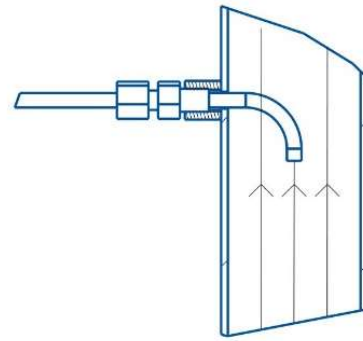
Oksygen er et paramagnetisk stoff, og dette blir utnyttet for å måle konsentrasjonen av oksygen. I detektoren henger det en aksling, med to glasskuler, horisontalt. Se Figur 6. Når en gassprøve strømmer gjennom detektoren vil denne akslingen begynne å rotere, et moment vil prøve å motvirke denne rotasjonen og få akslingen tilbake til sin originale posisjon. Dette momentet er lineært i forhold til konsentrasjonen av oksygen og vil bli produsert som dette [8].



Figur 6: Avgassmåling ved bruk av paramagnetisk celle [1]

2.4.2 Trykkmåling

Ved strømming av en gass vil det være både statisk trykk og dynamisk trykk. Det statiske trykket er trykket i en gass som står i ro, og det dynamiske trykket kommer av hastigheten gassen strømmet i. Stagnasjonstrykket er summen av statisk og dynamisk trykk. Et pitotrør måler stagnasjonstrykket ved strømming, og er et mindre rør med en 90 graders vinkel der åpningen av røret står mot strømningsretningen, se Figur 7. En trykktransmitter vil være festet i enden av røret og signalet denne transmitteren gir kan gjøres om til stagnasjonstrykket [9]. For formler se «Trykkmåling» i Vedlegg 1.



Figur 7: Prinsippskisse av pitotrør

3. Sammendrag av tidligere undersøkelser

Tidligere er det gjort fem bacheloroppgaver og én masteroppgave på gassturbinen. Gruppen har fokusert spesielt på to av bacheloroppgavene og masteroppgaven, det er disse som er mest relevante til problemstillingen.

Tittel	Etternavn	År
Prosjektering og bygging av gassturbin	Mjølhus, Andreassen	2012
Prosjektering og videreutvikling av gassturbin	Leknes, Myklebust, Ellingsen	2013
Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin.	Bergquist, Seth	2014
Videreutvikle IMM sin modell gassturbin for å drive en kraftturbin.	Larsson, Omar	2015
Ferdigstilling av institutt for maskin- og marinfag sin modell-gassturbin	Borsheim, Lunde, Navarsete	2017
Numerical Study of a Microturbine Combustor (Msc)	Møller-Pedersen	2018

Tabell 1: Oversikt over tidligere oppgaver på gassturbinen

Masteroppgaven «Numerical Study of a Microturbine Combustor» fra 2018 la grunnlaget for vårt design. Prosjektet fra 2014 hadde en mer teoretisk vinkling enn de to første prosjektene på gassturbinen. Her ble det gjort målinger og analyser som skal brukes i dette prosjektets utregninger. Da det er gjort en del på prosjektet siden 2014 er det også nødvendig å se på den siste bacheloroppgaven. Denne viser de ferskeste tallene på hvordan gassturbinen var før dette prosjektet, i tillegg til en oversikt over de nyeste komponentene.

3.1 “Numerical Study of a Microturbine Combustor” fra 2018

Det opprinnelige designet har høy topptemperatur, høy temperatur langs flammerøret og en svært varm flamme. Han konkluderer med at det opprinnelige designet er et dårlig design med tanke på dannelse av NO_x og CO. CFD-analysen viser en skjev flamme og ujevn temperaturfordeling, i tillegg er flammen mye nærmere utløpet av brennkammeret enn ønsket. En analyse av «mixture fraction O» viser at propanen ikke blir tilstrekkelig mikset, og det blir en ufullstendig forbrenning i brennkammeret.

Det nye designet forbedrer NO_x dannelsen, men det er fremdeles for mye CO. Den avanserte utformingen og "swirleren" danner et større trykktap. Studenten har konkludert med at det er et design med potensiale, men flere forbedringer er nødvendig for et optimalt design.

3.2 "Målinger og termodynamisk analyse av gassturbin" fra 2014

De har tre spørsmål de ønsker å få svar på i oppgaven. "Kan vi utarbeide en løsning for å oppnå stabil drift over tid? Hvilke nødvendige målinger må gjøres for å kunne utføre en termodynamisk analyse av gassturbin-modellen? Kan vi ut fra denne analysen fastslå om det er mulig å montere en kraftturbin med generator på gassturbin utløp, som leverer minst 500W i elektrisk effekt?".

Studentene plasserte propantanken i et varmt vannbad for å opprettholde propantrykket og sikre stabil drift. De utførte flere målinger av luftmassestrøm, oksygenprosent i avgassen, trykk etter kompressor og temperatur i alle tilstander. Målingene fra kompressoren stemte godt med kompressorkartet, men målingene ved turbinen stemte ikke med virkeligheten. De fikk en urealistisk verdi for virkningsgrad. De satt derfor spørsmål ved målenøyaktigheten til temperatursensoren ved høye temperaturer.

Basert på utregningene konkluderte de med at det skal være mulig å henge på en kraftturbin med generator som kan levere minst 500W.

3.3 "Ferdigstilling av institutt for maskin- og marinfag sin modell-gassturbin" fra 2017

Problemstillingen har to spørsmål som er utgangspunktet ved gjennomføring av oppgaven. "Er det mulig å bygge en gassturbin som opererer med stabil og sikker drift? Er det mulig å hente ut nok effekt fra gassturbinen til å koble på en kraftturbin og allikevel oppnå stabil og sikker drift?"

Studentene har gjort flere endringer på gassturbinen. De har oppdimensjonert kompressoren, endret dysen og flammerøret i brennkammeret, montert flere måleinnretninger, påmontert kraftturbinen og konstruert en diffusor for gjenvinning av trykk mellom gassturbin og kraftturbin.

Ut fra enkle beregninger basert på måledata fra testkjøringene mener studentene at gassturbinen har tydelige forbedringspotensial. For å hente ut mer elektrisk effekt bør propantilførsel og brennkammerets utforming og virkningsgrad forbedres.

4. Fremgangsmåte

4.1 Konklusjoner fra tidligere resultater

Ved oppstart av bacheloren er det nødvendig å skaffe seg et godt underlag. Det settes av mye tid til å lese de tidligere bacheloroppgavene om gassturbinen for å få et innblikk av hva som er blitt gjort før. I tillegg er det viktig å lese seg opp på teori om gassturbiner, dette for å best kunne finne en god løsning for det nye brennkammeret.

Det blir raskt oppdaget sprikende resultat i det tidligere bacheloroppgavene, det blir derfor vanskelig å stole på målinger som har blitt gjort. Dette gjør at utregningene må forenkles mye for å kunne dimensjonere brennkammeret. Det blir derfor lagt mer fokus på andre viktige komponenter i brennkammeret, som for eksempel brenneren. Gruppen bestemmer seg også for å lage bedre målepunkter slik at eventuelle senere prosjekt ikke møter på de samme utfordringene.

Gruppen visste på forhånd at det har vært problemer med kjøring av gassturbinen før, det blir derfor nødvendig å finne ut tidlig hva som må gjøres for å fikse dette. Det viser seg at det er problemer med turboen, denne ble sendt til overhaling der det kom frem at lageret til turboen var ødelagt. Dette ble byttet ut, og turboen ble i tillegg utbalansert og rengjort. Det ble også gjort modifikasjoner på turbininnløpet. Veggen mellom det to innløpene ble slipt ned, dette for å minke trykktapet.

På grunn av problemer med turboen får ikke gruppen teste gassturbinen med det gamle brennkammeret. Det er heller ikke ønskelig å montere på igjen det gamle brennkammeret etter at turboen har vært til overhaling. Derfor blir det bestemt at en brennkammer-rigg er den beste løsningen for å kunne teste det nye brennkammeret mot det gamle.

4.2 Noen antagelser for forsøkene

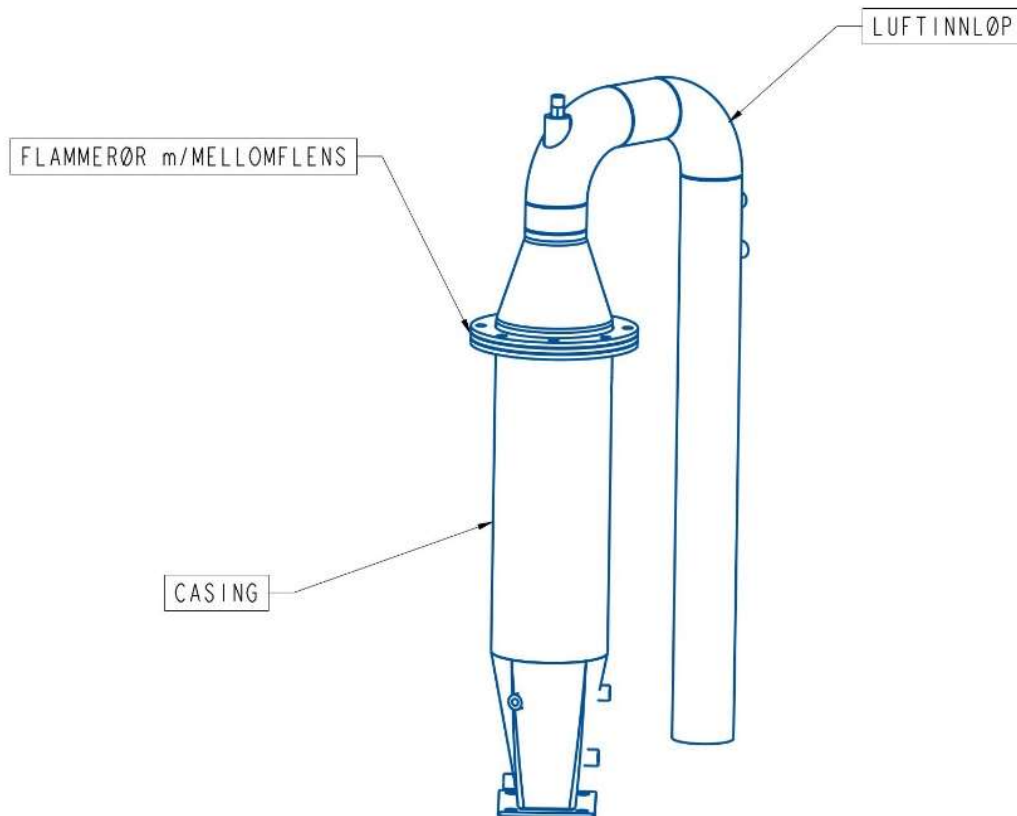
Flere antagelser må til for å kunne utføre noen av utregningene nødvendig i dette prosjektet.

- Luft er inkompressibel ved lave hastigheter, $Ma < 0,3$.
- Avgassen er tørr på grunn av tørkeren.
- Det er tilstrekkelig turbulens i avgassen slik at blandingen blir homogen.
- Stagnasjonstrykket i punkt 2, se Figur 3, er likt stagnasjonstrykket i ventilasjonsrøret. Basert på Bernoullis formel der høydeforskjell og trykktap blir neglisjert.
- Massestrøm av propan er lik ved likt propantrykk
- Massestrøm luft og propan er lik 0,3kg/s gjennom brennkammeret. Basert på tidligere prosjekt med gassturbinen.
- Støkiometrisk blandingsforhold mellom luft og propan er 15,6kg luft/kg brennstoff.

4.3 Nytt brennkammerdesign

Basert på tidligere design, design i handbok [10] og begrensningene turboen gir kommer gruppen frem til dette designet. Gruppen ønsker å lage et design som gjør det enklere for andre å gjøre videre forbedringer på brennkammeret.

Luften vil bli tilført fra toppen, slik det er mange eksempel på fra fagbøker. Dette vil forhindre en skjev flammefordeling. En utskiftbar «mellomflens», se Figur 12, gjør at det er lettere å justere forholdet mellom primærluft og sekundærluft, ved å endre størrelsen på åpningene i flensen. Den gir også muligheter for å enkelt feste et nytt flammerør. Rørene, albuene, ekspansjonsrøret og flensene vil alle være i rustfritt stål, dette fordi denne typen materiale tåler høye temperaturer godt.



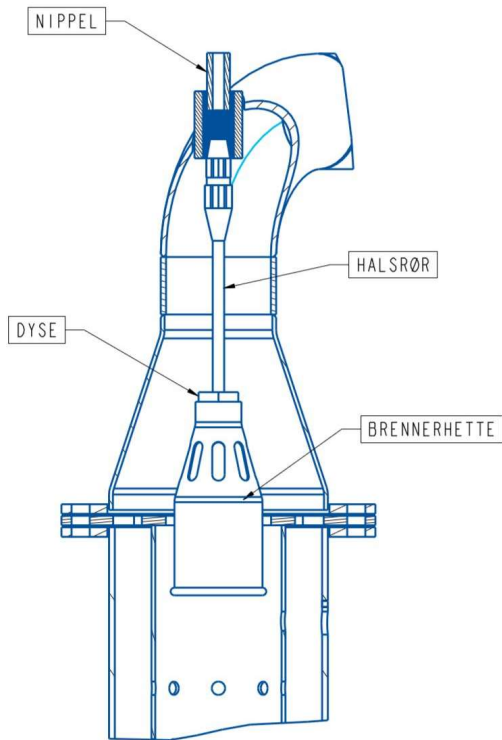
Figur 8: Skisse av hovedkomponentene i brennkammeret

4.3.1 Brenner

Valg av brenner blir essensielt for videre arbeid med gassturbinen. På grunn av de usikre målingene bestemmer gruppen seg for at det ikke er mulig å regne seg fram til den rette brenneren. Brenneren blir derfor valgt på bakgrunn av anbefalinger fra Gasservice, et spesialfirma for blant annet propanutstyr, og etter møter med veileder. Det blir valgt en brenner som er en størrelse større enn den forrige brenneren, denne vil kunne tilføre mer propan til brennkammeret. Brenneren består av tre deler; brennerhette, dyse og halsrør. Brennerhetten har en flammeholder som kan bidra til å stabilisere flammen. Tidligere har de valgt å fjerne brennerhetten, denne vil gruppen beholde i et forsøk på å få en mer homogen blanding av luft og propan før antenning.

Halsrøret som tilfører propan til brenneren vil stå loddrett ned i brennkammeret. Det er derfor nødvendig med en gjennomgang i det ene bendet. Halsrøret blir solgt med en bøy, røret må derfor rettes for å få det slik designet krever. Gruppen velger å sveise i et emne med innvendige gjenger slik at halsrøret kan skrues inn på innsiden. På utsiden vil en nippel skrues i emnet som videre festes i slangen som er koblet til propantanken. Dette vises på Figur 10. Ved å gjøre det på denne måten blir det lettere å demontere og eventuelt bytte ut dysen.

Figur 9 viser hvordan flammen blir med ny dyse og påmontert brennerhette. Man kan se at det er en jevn blå flamme som er sentrert i midten av brennerhetten. Dette er ønskelig i det nye brennkammeret.



Figur 10: Skisse av brennerhette montert i brennkammeret.



Figur 9: Ny dyse med brennerhette

4.3.2 Utvendig design

Diameter til casingen vil bli bestemt ut fra kompressorens innsugsdiameter, ved hjelp av enkle utregninger [11]. Der 2,1 er et gitt forholdstall. Kompressoren som er montert på gassturbinen har en innsugsdiameter $I=55\text{mm}$. Diameteren til casingen blir ifølge kalkulasjoner da:

$$D_{casing} = 2,1 \cdot I = 2,1 \cdot 55\text{mm} = 115,5\text{mm}$$

Siden leverandører av rør har standard størrelser velger gruppen et 4" rør som er 114,3mm, litt mindre enn det som er blitt regnet ut. Dette røret, sammen med det rette rørdelene til toppen, får gruppen av FRAMO Flatøy.

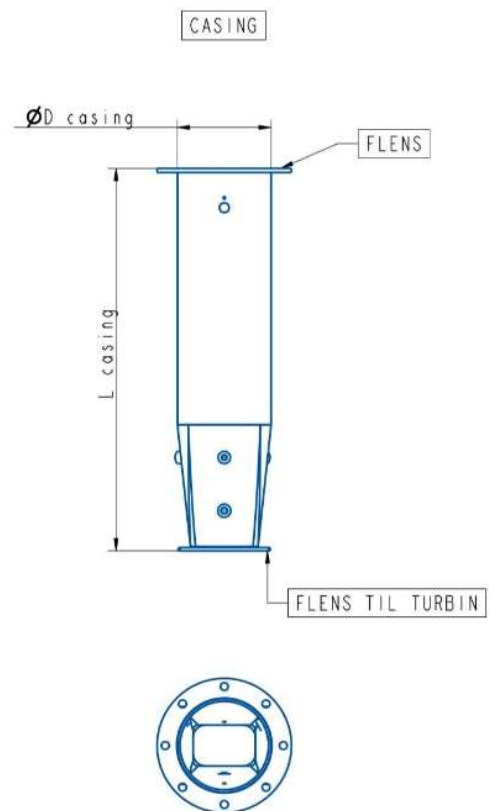
Den samme nettsiden har også formler for å regne ut lengden på casingen. Disse velger gruppen å se bort fra, da det er fare for at flammen vil stå inn i turbinen. Dette kan gjøre skade på turbinen og er derfor ikke ønskelig. CFD-analysen i masteroppgaven viser også at det er uforbrent drivstoff ved utløp og dårlig blanding, ved å øke lengden på casingen er håpet at dette unngås. Lengden blir derfor valgt ut ifra anbefalinger i «Gas Turbine Engineering Handbook» [10]. Den sier at casingens lengde skal være 2-4 multiplisert med diameteren til casingen. Det blir valgt en faktor på 4 på bakgrunn av CFD-analysen fra masteroppgaven.

$$l_{casing} = 4 \cdot D_{casing} = 4 \cdot 114,3\text{mm} = 457,2\text{mm}$$

Lengden på casingen blir til slutt 450mm, da det var denne rørlengden som var tilgjengelig med den valgte diameteren.

Innløpet på turbinen er rektangulært, utløpet på casingen må derfor tilpasses til dette. Ifølge tekniker Sergio Victor Martinez Castro ved IMM vil den enkleste måten å få dette til være å kutte opp røret og bøye inn sidene. Dette er samme metode som ble benyttet på det gamle brennkammeret. Det er viktig at utløpet blir likt som eller større enn innløpet til turbinen for å unngå unødvendige trykktap.

Det har tidligere vært brukt en tennplugg for å lage flammen, i det nye brennkammeret vil en tenner bli benyttet. Det må derfor bores to hull i casingen, ett som tenneren skal stå i og ett gjenget hull hvor bolten, som fester tenneren til casingen, skal skrues inn i. Må også bore hull til ulike målepunkt, for detaljert tegning se Vedlegg 2.



Figur 11: Skisse av casingen

4.3.3 Flammerør

Flammerørets diameter blir, som casingens, bestemt ut fra kompressorens innsugsdiameter og enkle utregninger [11]. Der 1,3 er et gitt forholdstall. Diameteren ifølge kalkulasjonen blir da:

$$D_{\text{flammerør}} = 1,3 \cdot I = 1,3 \cdot 55\text{mm} = 71,5\text{mm}$$

Igen velges en standard størrelse og flammerøret blir da 2 1/2" som er 76,1mm, litt større enn det som er utregnet. Dette røret får gruppen av FRAMO Holsnøy.

Flammerørets lengde vil, som for casingens lengde, bli bestemt ut ifra anbefalinger i «Gas Turbine Engineering Handbook» [10]. Her står det at flammerørets lengde skal være 3-6 multiplisert med flammerørets diameter.

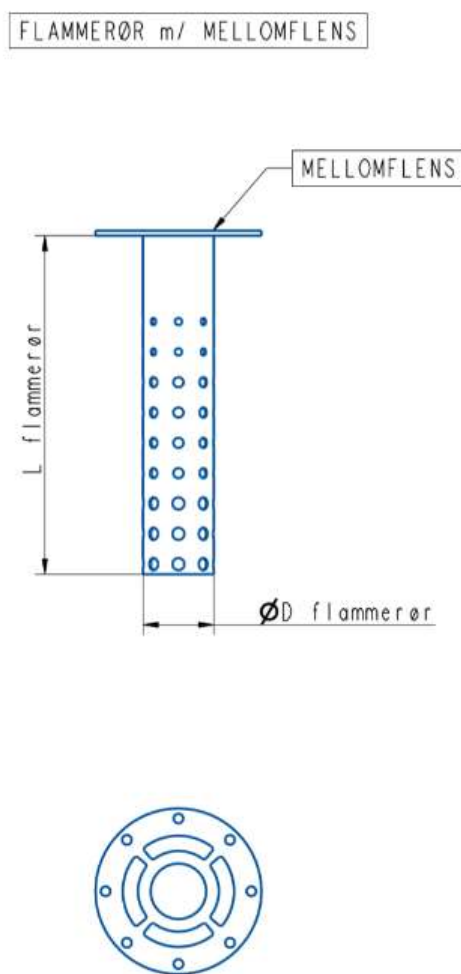
$$l_{\text{flammerør}} = 5 \cdot D_{\text{flammerør}} = 5 \cdot 76,1\text{mm} = 380,5\text{mm}$$

Lengden på flammerøret blir satt til 375mm, litt kortere enn utregnet. Dette fordi det var denne rørlengden som var tilgjengelig.

De anbefaler også at flammerøret skal ha 80 hull fordelt på ti rader for å få best ytelse, disse hullene skal ha ulik diameter der det henholdsvis skal være diametere på 8, 10 og 12 mm. Gruppen har i det nye designet tatt utgangspunkt i dette men fjerner en rad i toppen, dette fordi stor del av primærluften blir tilsett i brennerhetten. Sekundærluften tilsettes som før i hull lengre nede for kjøling av luftstrømmen. Ved å ha designet på denne måten er målet at forbrenningen blir mer homogen.

Flensen til flammerøret har fire åpninger, disse fire åpningene er der for å slippe gjennom sekundærluft til flammerøret. Flensen er punktet på flammerøret slik at den enkelt kan fjernes dersom studenter, som ønsker å gjøre videre arbeid, vil ha et annet design på enten flens eller flammerør. I tillegg til disse fire åpningene har flensen en åpning i midten som brennerhetten skal gjennom. Her blir det en liten klaring mellom hull og brennerhette siden brennerhette har en litt større diameter ved enden. Det blir derfor maskinert en ring som settes på brennerhette for å tette denne klaringen og holde brenneren i ro, se Vedlegg 2 for detaljert tegning.

Det må lages et hull i flammerøret slik at tenneren kommer inn til brenneren og elektroden til tenneren må rettes ut slik at antenningen skjer rett under brenneren. I tillegg må en form for jording festes i flammerøret. Dette blir gjort på samme måte som det gamle designet, med et sveisetilsett på tvers av to hull i flammerøret.

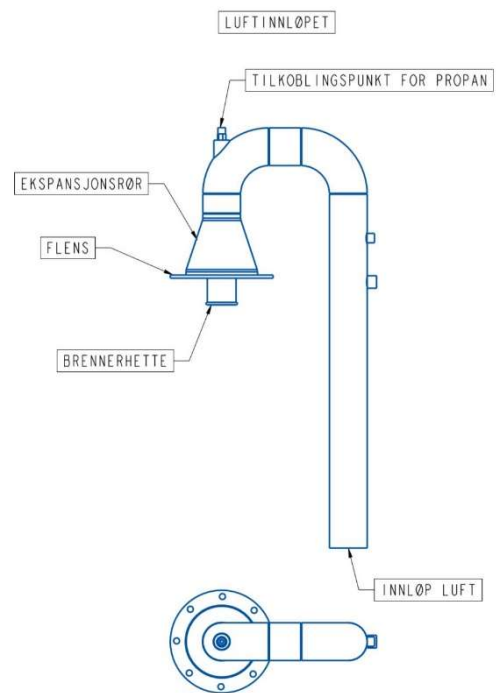


Figur 12: Skisse av flammerøret

4.3.4 Luftinnløpet

Dimensjonering av rørene i topp vil bli bestemt ut ifra kompressorutløp, der det er ønsket å komme så nær denne diameteren som mulig. 2" rør blir derfor valgt, siden det er nær diameteren til kompressorutløpet og i tillegg er det et rør som er enkelt å få tak. Disse rørene får gruppen av FRAMO Flatøy.

Det benyttes et ekspansjonsrør for å ekspandere dimensjonen fra 2" til 4". Denne vil være med på å bremse ned innløpsfarten. For at brenneren ikke skal gå for langt ned i selve brennkammeret må det skjøtes på en liten bit mellom dette ekspansjonsrøret og den første 90° albuen. Videre vil det være en bit mellom de to albuene for å få korrekt avstand mellom turbin innløp og kompressorutløp. Et lengre rør vil gå fra den siste albuene og til slangen som skal koble sammen røret og kompressorutløpet. I dette røret vil målepunktene være plassert. Ekspansjonsrøret og de to albuene blir bestilt fra firmaet Ahlsell.



Figur 13: Skisse av luftinnløpet

Selv med ekspansjonsrøret vil det være en risiko for at farten blir for stor på grunn av liten innløpsdiameter.

Dette kan føre til at flammen blåses ut. Mer om løsninger for dette i delkapittel 5.1.

4.3.5 Målepunkter

Det vil bli plassert tre temperatursensorer rett under flammerøret. Disse blir plassert her for å kunne sammenligne temperaturfordelingen i det nye versus det gamle brennkammeret. En temperatursensor vil bli montert ved innløpet og en ved utløpet av brennkammeret. Sensorene vil bli festet med klemringer.

Ved innløpet til brennkammeret vil det være en trykkmåler for å måle trykket ved innløpet, P2. På grunn av turbulent strømning ved kompressor utløp blir trykkmåleren plassert så nært toppen av brennkammeret som mulig, men den må plasseres før albuene for å ha minst mulig trykktap før P2 måles.

Ved utløpet av brennkammeret vil det være høy hastighet og temperatur, det er derfor ugunstig med en måleinnetning her. Dette målepunktet vil derfor bare bli benyttet under den kalde testen for å se trykktapet i brennkammeret.

Når et målepunkt ikke er i bruk, er det nødvendig med en plugg for å tette åpningen. Det er maskinert to ulike plugger til dette formålet, en til temperaturmålerne og en til trykkmålerne. Detaljerte tegninger av pluggene kan ses i Vedlegg 2.

4.4 Brennkammer-rigg

For testing av brennkammer er det nødvendig med en rigg som gir like og stabile forhold ved alle testene. Det må derfor bygges et stativ som både det gamle og det nye brennkammeret kan monteres til. Stativet består i hovedsak av et rør med en flens i en ende og en blende, for å lage mottrykk, i andre enden. Flensen må ha et hullbilde som passer til begge brennkamrene sine utløp.

I røret vil det være et målepunkt for avgassmåling med Horibaen. For at flammen fra brennkammeret ikke skal stå ned i bakken vil stativet bli bygget på en slik måte at brennkammeret ligger horisontalt, se Figur 15 og Figur 14. Siden brennstoffet er i gassform vil ikke retningen brennkammeret står ha stor betydning.



Figur 15: Gammelt brennkammer montert på stativet



Figur 14: Nytt brennkammer montert på stativet

Det vil bli vanskelig å få et mottrykk som tilsvarer mottrykket under kjøring. Det blir derfor, etter avtale med veileder, valgt å simulere et mottrykk på maksimalt 0,5bar og fokusere på å holde det likt i begge testene, da formålet er å sammenligne de to ulike designene. Denne formelen blir benyttet:

$$\Delta P = \left(\frac{4 * Q}{c_d * \pi * D_2^2} \right)^2 * \frac{(1 - \beta^4)}{\rho}$$

Resultat av denne beregningen viser at en blende åpning med en diameter på 55mm gir et mottrykk på 0,45bar. For grunnligning og utregning se «Måleblende» i Vedlegg 1.

For å tilføre luft til brennkamrene vil en vifte bli brukt, den kan kjøre stabilt på maksimalt 50Hz. Fra denne viften blir det montert et ventilasjonsrør med en vindmåler, denne skal måle farten luften har. Denne verdien vil bli brukt til å finne massestrømmen til luften. Det blir benyttet et ventilasjonsrør, som har vært montert til denne viften ved tidligere prosjekt, til denne målingen. Dette røret har en diameter på 200mm, det må derfor lages en overgang som kan redusere denne diameteren slik at røret passer inn på slangen som går fra brennkammerinnløpet. En kon vil fungere best som overgang, dette for å forhindre mest mulig trykktap. En plate i rustfritt stål blir brent ut og bøyes til en kon, videre sveises en flens til denne konen som vil ha samme hullbilde som flensen montert på slangen. For å gjøre mest mulig reversible endringer på ventilasjonsrøret blir det besluttet at konen skal teipes på enden av røret.

4.5 Endringer gjort på det gamle brennkammeret

For at både det gamle og det nye brennkammeret skal ha de samme forutsetningene, må det gjøres noen endringer på det gamle brennkammeret. Den nye brenneren må benyttes på dette brennkammeret for å få mest mulig lik massestrøm av propan. Brennerheten må skrues av for at det skal være mulig å bare bruke dysen. Pakningene kunne ikke gjenbrukes, det blir derfor laget nye pakninger tilpasset det gamle brennkammeret. Siden tennpluggen i det gamle brennkammeret ikke fungerer må dette brennkammeret tilpasses det nye tenningsystemet. Det må lages en plate for å kunne montere tenneren i det eksisterende hullet.

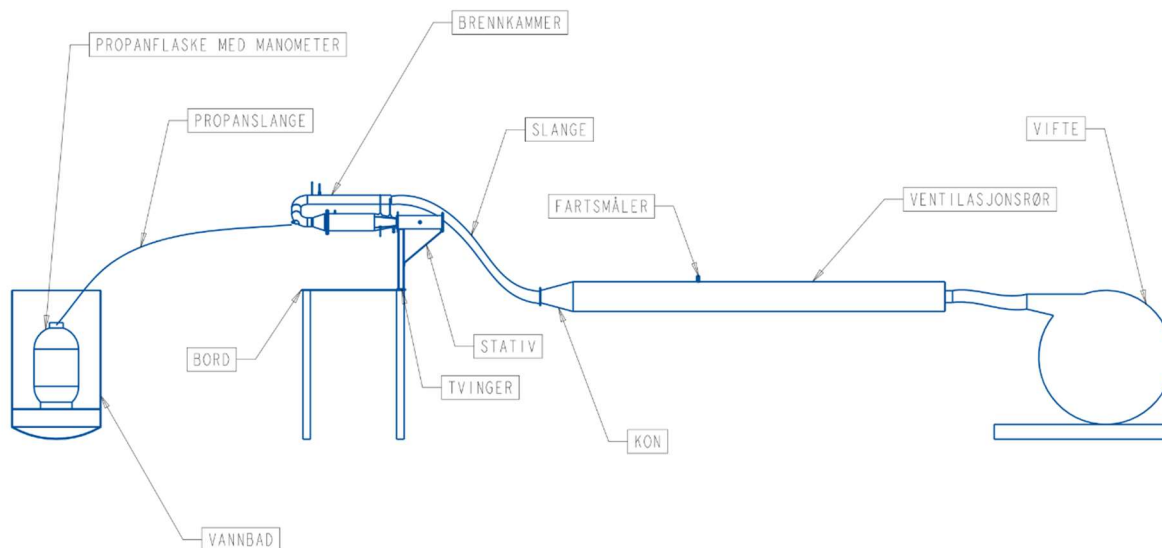
Innløpsrøret til brennkammeret må kuttes for å få slangen fra ventilasjonsrøret til å passe. Det må også lages tre nye hull i brennkammerets casing, dette for å kunne måle temperaturfordelingen på samme måte som ved det nye designet. En liten del av flammerøret må kuttes for at disse temperaturmålerne skal passe.

5. Testing i rigg

5.1 Strategi

For å få mest mulig sammenlignbart resultat er det viktig at forbruket av propan og luftstrømmen er lik gjennom testingen av begge brennkamrene.

Først skal det gamle brennkammeret testes. Det er ønskelig å ha luftstrøm og propanforbruk nær de forholdene som er under kjøring av gassturbinen, men luftstrømmen blir begrenset av viftens kapasitet. Det er viktig at disse parameterne holdes mest mulig like. Deretter skal det nye brennkammeret testes. Det vil kanskje være nødvendig å gjøre noen tilpasninger av brennkammeret under de første testene, da en utfordring kan være at flammen blåses ut. På forhånd vil det bli laget ulike ringer for å dekke til noe av åpningene i brennerhetten, dette vil redusere mengden primærluft. Når de nødvendige endringene er gjort, vil det nye brennkammeret testes ut med like parametere som det gamle. Det vil også bli kjørt noen tester for å se hvilke kombinasjoner av luft og propan som gir best resultat. Disse blandingsforholdene vil igjen være utgangspunkt for en ny test av det gamle brennkammeret.



Figur 16: Illustrasjon av testriggen

5.2 Målinger

Som nevnt i kapittel 4.3.5 vil det bli mulighet for flere ulike målinger. De kan bli målt fire ulike temperaturer til enhver tid, hvilke målepunkter som blir benyttet kan tilpasses etter hva som er ønsket i de ulike testene. En trykktransmitter blir koblet opp for å kunne måle trykket ved innløpet av brennkammeret.

For å måle avgass må det i tillegg til Horibaen benyttes en avgasstørker som nevnt i 2.4.1. I dette prosjektet er det mest interessant å se på O_2 , CO , CO_2 og NO . SO_2 vil også bli avlest men er ikke en av de mest sentrale parameterne for oppgaven.

5.3 Kald test

Den kalde testen brukes for å sammenligne trykktap i det nye og det gamle brennkammeret og for å finne hvilken massestrøm viften klarer å levere med den motstanden brennkammeret gir. Den vil i tillegg bli brukt til å forsikre at riggen fungerer og at det ikke er noen store lekkasjer i systemet. Under denne testen er det bare viften som kjører, det vil altså ikke bli tilført noe propan. Denne testen blir gjort etter råd fra høyskolelektor Mathias Christian Mathiesen ved IMM. Det er under disse forholdene målingene av trykk ved utløpet av brennkammeret blir mest mulig nøyaktig. Under en varm test, der det blir tilført propan, vil det bli for mye turbulens ved utløp som vil gi unøyaktige målinger.



Figur 17: Gammelt brennkammer montert for kald test.

5.3.1 Fremgangsmåte

For å kjøre den kalde testen må brennkamrene monteres opp som vist i Figur 16, bortsett fra propantanken som ikke er nødvendig her. Testen vil først bli gjennomført på det gamle brennkammeret, for så å teste det nye brennkammeret.

For å se om trykket endrer seg ved ulike luftstrømmer stilles frekvensomformereren på ulike verdier. En test på maksimal styrke 50Hz, vil bli kjørt for å finne en omtrentlig maksimal luftstrøm og trykktap over brennkamrene.

Utstyrliste for kald test:

- Brennkammer
- Stativ
- Bord
- Støtte til brennkammer
- 2 tvinger
- Bolter, skiver og mutre til montering
- Slange Ø64mm og Ø80
- Flens til slange, Ø64mm og Ø80mm
- Kon fra ventilasjonsrør til slange
- Ventilasjonsrør Ø200mm
- Vifte med frekvensomformer
- Vindmåler
- Temperaturmålere
- Trykkmåler 2.5 bar

5.4 Varm test

Den varme testen anses som hovedtesten i denne oppgaven. Det som skiller den varme testen fra den kalde er at her blir propantanken koblet til og en tenning av flamme vil skje, derav navnet varm test. Under den varme testen vil det bli målt temperaturer og mengde avgass, i tillegg vil trykket ved innløp bli lest av. Det er ikke mulig å måle trykk ved utløp nå, da for mye turbulens gir unøyaktige målinger.

5.4.1 Fremgangsmåte

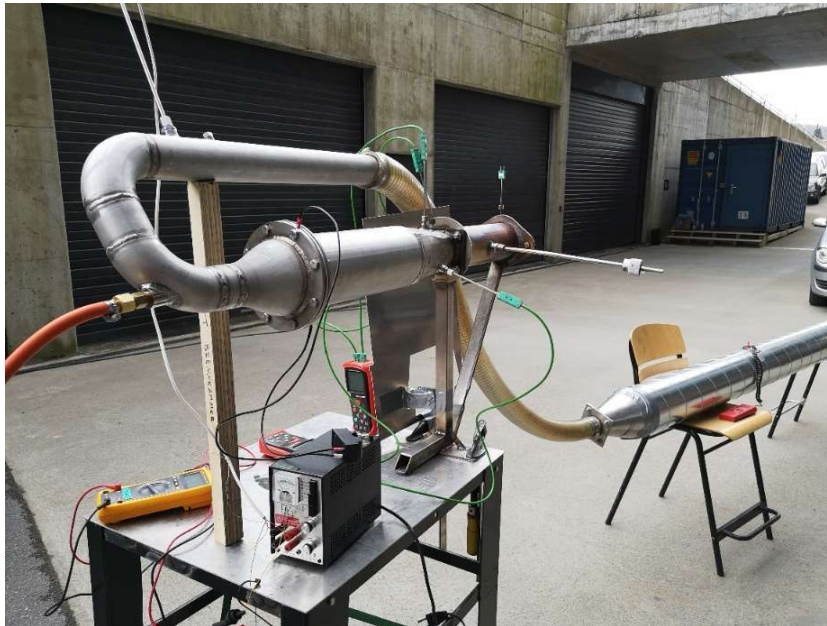
Horibaen er det første som må startes ved den varme testen, denne trenger 30 min til å varme opp og må i tillegg kalibreres. Denne kalibreringen må gjøres på nytt hvert 30. minutt under kontinuerlig kjøring. I tillegg må vannbadet varmes opp til rundt 35 grader celsius. Alle nødvendige komponenter blir montert opp som vist i Figur 16.

For å tenne brennkammeret startes viften på lav frekvens, 5 Hz, for å få nok luft til å tenne propanen. Det er viktig at vi starter tenneren før vi tilsetter propan, slik at det ikke samler seg opp propan inne i brennkammeret. En slik oppsamling av propan vil føre til at ekspansjonen skjer inne i selve brennkammeret og det ikke blir mulig å få en stabil flamme. Når det er mulig å holde på flammen kan massestrømmen av propan og luftstrømmen tilpasses slik at vi får en stabil og blå flamme. For å finne propanforbruket må propanbeholderen veies med et gitt tidsintervall i hvert delforsøk.

Det skal kjøres flere delforsøk med det gamle og det nye brennkammeret. Ved bytte fra et brennkammer til et annet må tilhørende slange, mellom brennkammer og ventilasjonsrør, monteres. Må påse at alle nødvendige komponenter til brenneren er montert.

Det gamle brennkammeret vil bli kjørt først ved ulike blandingsforhold av luft og propan. Resultat fra målinger vil bli avlest før det nye brennkammeret vil bli testet ved det samme blandingsforholdene. Etter det nye brennkammeret har blitt testet ved disse blandingsforholdene vil en undersøkelse ved ulike kombinasjoner av luftstrøm og propanforbruk gi et blandingsforhold der det nye brennkammeret fungerer best mulig. Disse kombinasjonene vil så bli testet på det gamle brennkammeret for å se mulige forskjeller.

Brannslukningsapparat og sveisehansker, for å beskytte mot varme, må være lett tilgjengelig under hele testen for sikkerhets skyld.



Figur 18: Nytt brennkammer montert for varm test.

Utstysrliste

- Brennkammer
- Stativ
- Bord
- Støtte til brennkammer
- 2 tvinger
- Bolter, skiver og mutre til montering
- Slange Ø64mm og Ø80
- Flens til slange, Ø64mm og Ø80mm
- Kon fra ventilasjonsrør til slange
- Ventilasjonsrør
- Vifte med frekvensomformer
- Vindmåler
- Temperaturmålere
- Trykkmåler 2.5 bar
- Propanflaske med manometer
- Propanslange
- Vannbad til propanflaske
- Vekt
- Brannslukningsapparat
- Hansker

6. Resultater

6.1 Erfaringer med det nye designet

Ved sveising av rørstykkene trakk rør-albuene seg. Dette medførte vanskeligheter ved tilpassing til turboen. I tillegg måtte halsrøret til brenneren bøyes for at den skulle passe i flenshullet til flammerøret.

Ved tenning ble det oppdaget at det nye tennersystemet ikke fungerte. En mulig årsak til dette er at gnisten er for svak til at propanen antennes. Det ble derfor besluttet å bruke metoden som har blitt brukt tidligere. En propanbrenner blir satt foran hullet der tenneren egentlig skulle stå, denne tenner propanen i kammeret. En lukkemekanisme ble designet for å unngå tidligere problemer med at den som tenner brennkammeret brenner seg i prosessen, og for å unngå at det kommer luft inn eller ut av denne åpningen. Den samme lukkemekanismen ble benyttet på begge brennkamrene. På Figur 19 er lukkemekanismen vist åpen, vris med klokken for å lukke den.

Etter å ha kjørt det nye brennkammeret en stund ble det oppdaget at brennerhetten delvis har smeltet. Dette kommer av at brennerhetten er konstruert for å brukes til taktekking og ikke ment å stå over lenger tid i en slik varme som skapes i brennkammeret [12].

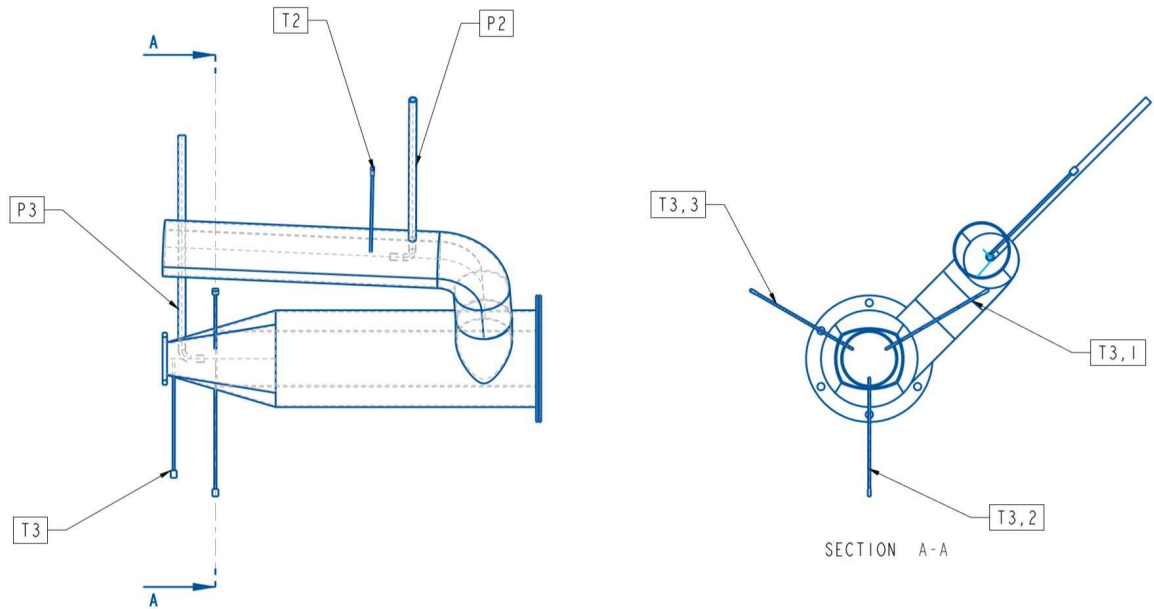
Ringene designet for å begrense luftstrøm inn i brennerhetten ble ikke benyttet da det ikke oppsto problem med at luften blåste ut flammen.



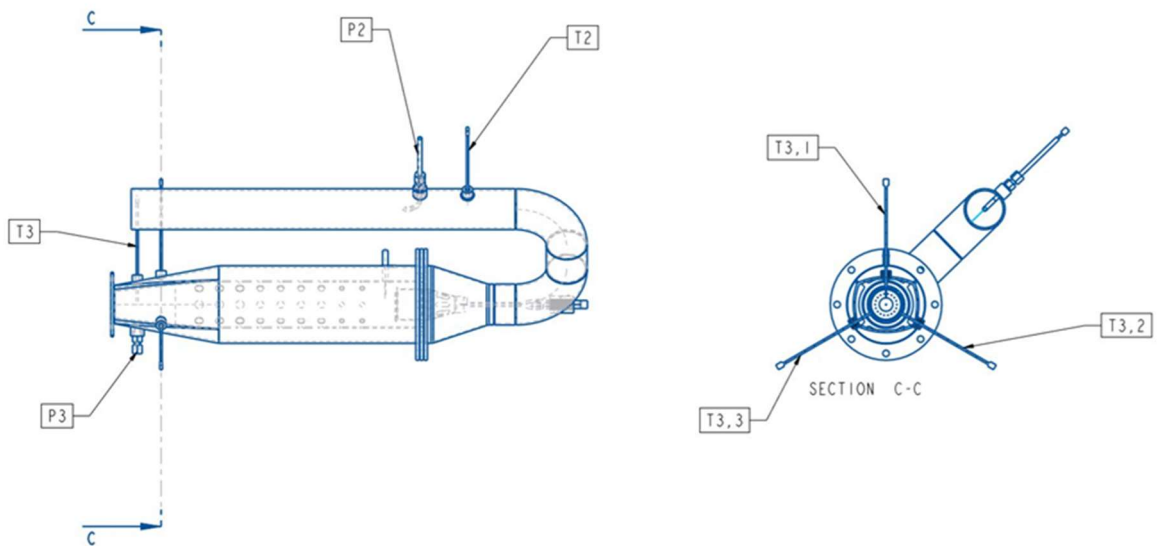
Figur 19: Lukkemekanismen montert på casingen

6.2 Måleresultater

I disse resultatene vil det bli vist til ulike målepunkter. Målepunktene for det nye brennkammeret er vist i Figur 21, målepunktene for det gamle brennkammeret er vist i Figur 20. Målepunkt T_2 og T_3 er sentrert i røret i begge brennkamrene. Målepunktet T_{stativ} er satt i enden av røret i stativet, med målepunkt i senter av åpningen. Det vil bli vist resultat fra en kald test, i tillegg til fire varme tester.



Figur 20: Målepunkter gammelt brennkammer



Figur 21: Målepunkter nytt brennkammer

6.2.1 Resultat fra kald test

	Gammelt	Nytt
Minimum fart (25Hz)	2,26m/s	1,98m/s
Minimum massestrøm	0,0923kg/s	0,0809kg/s
Maksimum fart (50Hz)	4,2m/s	3,81m/s
Maksimum massestrøm	0,172kg/s	0,156kg/s
Trykk ved innløp	0,0406bar	0,0406bar
Trykk ved utløp	0,0188bar	0,0203bar
Trykktap	0,0219bar	0,0203bar

Tabell 2: Målinger kald test

Under kjøring av den kalde testen ble det oppdaget lekkasje mellom boltene i toppen på det gamle brennkammeret. Tabell 2 viser at det ikke er betydelig forskjell i trykktap mellom de to brennkamrene. Dette betyr at det skal være mulig å oppnå samme massestrøm under varm test, noe som vil gjøre sammenligning mellom det nye og det gamle brennkammeret lettere.

6.2.2 Delforsøk 1

	Nytt	Gammelt
Propantrykk	1bar	1bar
Strømning, luft	0,0597m ³ /s	0,0597m ³ /s
Massestrøm, propan	0,000809kg/s	0,00100kg/s
Temperatur		
T _{3,1}	456K	553K
T _{3,2}	311K	834K
T _{3,3}	558K	518K
Avgass		
NO _x	7ppm	8ppm
CO	424ppm	191ppm
CO ₂	2,69vol%	1,82vol%
O ₂	16,77vol%	18,14vol%
SO ₂	6,4ppm	0,2ppm

Tabell 3: Målinger delforsøk 1

Det viser seg at temperaturfordelingen, se Tabell 3, i begge brennkamrene er noe ujevn. I det gamle brennkammeret ser vi at $T_{3,1}$ og $T_{3,3}$ er omtrent lik, og 300 K lavere enn $T_{3,2}$. Dette kan komme av at luftstrømmen blåser flammen mot $T_{3,2}$. I det nye brennkammeret er det en temperaturforskjell på 100-200 K, med høyeste temperatur i $T_{3,3}$ og laveste temperatur i $T_{3,2}$.

Resultat fra avgassmålingen, se Tabell 3, viser at NO_x-verdien er lavere i det nye brennkammeret enn det gamle. CO-verdien er lavere i det gamle brennkammeret, og dette samsvarer med at lav NO_x gir høy CO. Det er høyere CO₂ og SO₂, og lavere O₂ i det nye brennkammeret.

Her ble en badevekt brukt til å måle vekten på propanflasken ved start og slutt av testen, da den var for tung for å bruke Precisa Lab-vekten. Dette gir oss et omtrentlig propanforbruk.

6.2.3 Delforsøk 2

	Nytt	Gammelt
Propantrykk	3bar	3bar
Strømning, luft	0,0950m ³ /s	0,0990m ³ /s
Temperatur		
T ₃		1135K
T _{3,1}	552K	647K
T _{3,2}	323	
T _{3,3}	749K	594K
T _{stativ}	830K	768K
Avgass		
NO _x	9ppm	6ppm
CO	1021ppm	544ppm
CO ₂	4,49vol%	2,02vol%
O ₂	13,9vol%	17,8vol%
SO ₂	3,3ppm	0,3ppm

Tabell 4: Målinger delforsøk 2

Det er ikke mulig å sammenligne temperaturfordelingen under disse forholdene, mer om dette i kapittel 7. Det er kun mulig å sammenligne T_{stativ} , og den er høyere i det nye brennkammeret enn i det gamle, se Tabell 4.

Dette forsøket blir brukt til å sammenligne avgassmålingene i de ulike testene. Både NO_x, CO og vol% CO₂ er høyere i det nye brennkammeret under denne testen. Vol% O₂ er høyere i det gamle brennkammeret, og SO₂ er lavere.

6.2.4 Delforsøk 3

	Nytt	Gammelt
Propantrykk	2bar	2bar
Strømning, luft	0,0942m ³ /s	0,0974m ³ /s
Massestrøm, propan	0,00132kg/s	0,00149kg/s
Temperatur		
T ₃	802K	840K
T _{3,2}		990K
T _{3,1}	981K	
Trykk		
P ₂	0,0453bar	0,0500bar
Avgass		
NO _x	0ppm	3ppm
CO	455ppm	309ppm
CO ₂	1,9vol%	1,73vol%
O ₂	18,04vol%	18,4vol%
SO ₂	11,3ppm	2,7ppm

Tabell 5: Målinger delforsøk 3

I delforsøk 3 var hovedformålet med temperaturmålingen å se hvor mye den synker ved utløpet. Det ble derfor målt T₃ og T_{3,2} i det gamle brennkammeret, og T₃ og T_{3,1} i det nye brennkammeret. Målepunktene var sentrert i brennkammeret under denne testen. Resultatene fra disse målingene, se Tabell 5, viser at temperaturen i det nye brennkammeret synker raskere. Her går temperaturen fra 981K til 802K, mens i det gamle brennkammeret går temperaturen fra 990K til 840K. NO_x er tilnærmet lik null og ppm CO er forholdsvis lavt i det nye brennkammeret. Noe høy SO₂ i forhold til det gamle brennkammeret. Litt høyere vol% CO₂ i det nye brennkammeret.

Her ble det også tatt målinger for å få et tall på massestrømmen til propan som skal bli brukt i videre utregninger blant annet godhetsgrad, mer om dette i kapittel 7.2.

6.2.5 Delforsøk 4

	Nytt	Gammelt
Propantrykk	1,8bar	1,8bar
Strømning, luft	0,0927m ³ /s	0,0974m ³ /s
Massestrøm, propan	0,00138kg/s	0,00130kg/s
Temperatur		
T ₃	742K	780K
T _{3,2}		947K
T _{3,1}	923K	
Trykk		
P ₂	0,0438bar	0,0484bar
Avgass		
NO _x	0ppm	1ppm
CO	391ppm	292ppm
CO ₂	1,82vol%	1,65vol%
O ₂	18,18vol%	18,53vol%
SO ₂	10,4ppm	2,5ppm

Tabell 6: Målinger delforsøk 4

I delforsøk 4 blir det samme parameterne som i delforsøk 3 sett på. Her synker også temperaturen raskere ved utløp på det nye brennkammeret enn det gamle brennkammeret. Temperaturen i det nye brennkammeret synker med 181K, mens temperaturen i det gamle brennkammeret synker med 167K.

Det nye brennkammeret har fortsatt lavest verdi for NO_x, men i dette forsøket er også verdien for CO i det nye brennkammeret noe nærmere verdien for CO i det gamle brennkammeret. Det er en høyere vol% CO₂ i det nye brennkammeret, men en lavere vol% O₂. SO₂ er fortsatt mye høyere i de nye brennkammeret enn i det gamle.

6.2.6 Trend av temperaturfordeling

Gammelt		
	Resultat 1	Resultat 2
T _{3,1}	553K	657K
T _{3,2}	834K	876K
T _{3,3}	518K	602K
Nytt		
	Resultat 3	Resultat 4
T _{3,1}	456K	473K
T _{3,2}	311K	297K
T _{3,3}	558K	588K

Tabell 7: Temperaturfordeling ved ulike delforsøk

Disse resultatene er plukket fra ulike forsøk som er gjort underveis i testingen og vil ikke sammenlignes direkte med hverandre. De skal bare bli brukt for å vise en mulig trend på hvordan temperaturfordelingen ved utløp av de to brennkamrene er.

To av temperatursensorene i det gamle brennkammeret viser forholdsvis lik temperatur, mens en av temperatursensorene, T_{3,2}, viser en høyere verdi. Dette stemmer for både resultat 1 og for resultat 2. Resultat fra målinger i det nye brennkammeret viser ulike temperaturer i alle 3 punkter.

6.3 Usikkerheter

Det er flere usikkerheter som må tas hensyn til under testingen av de to ulike brennkamrene.

Temperatursensorene:

De samme temperatursensorene ble benyttet på begge brennkamrene, og siden det gamle brennkammeret ble testet først var det mulig å tilpasse disse sensorene bedre til dette kammeret. I tillegg har det nye brennkammeret en asymmetrisk kon som gjorde det vanskeligere å plassere temperatursensorene med lik avstand fra senter av de to brennkamrene. Dette ble gjort på øyemål og vil derfor gi usikkerheter ved resultatene fra testingen av temperaturfordeling i brennkamrene.

Horiba:

Horibaen er kjøpt inn for å måle mye høyere verdier av blant annet NO_x. Kalibreringsgassen for denne gassen er derfor høyere enn det som behøves. Den er kalibrert for NO_x opp mot 450ppm, mens brennkamrene vil sannsynligvis ligge mellom 0-10ppm.

Det er også knyttet usikkerhet til målingen da det ikke blir målt et snitt av hele strømmingen, men i et punkt i riggen.

Måleusikkerhet i måleutstyret:

Flere av måleinstrumentene har måleusikkerhet.

Horiba PG 350E har en repeterbarhet på $\pm 1,0\%$ av full skala [13].

Vekten er en Presica 24000D SCS, den har en repeterbarhet og en lesbarhet på 0,1g [14]. I tillegg ble det benyttet en vanlig badevekt med en nøyaktighet på 0,1kg.

Temperaturmålerne er av typen RS PRO RS42 Digital Thermometer med en usikkerhet på $\pm(0.5\% \text{ rdg} + 1^\circ\text{C}) - 0^\circ\text{C to } 1000^\circ\text{C}$ [15].

Multimeteret er et Goldstar DM-312 multimeter. Dette multimeteret har en usikkerhet på $\pm(1.2\% + 1\text{dgt})$ [16].

Vindmåleren er et TMA10A Anemometer. Denne vindmåleren har en nøyaktighet på $\pm 2\%$ av full skala. [17]

Viften:

Viften er følsom for mottrykk.

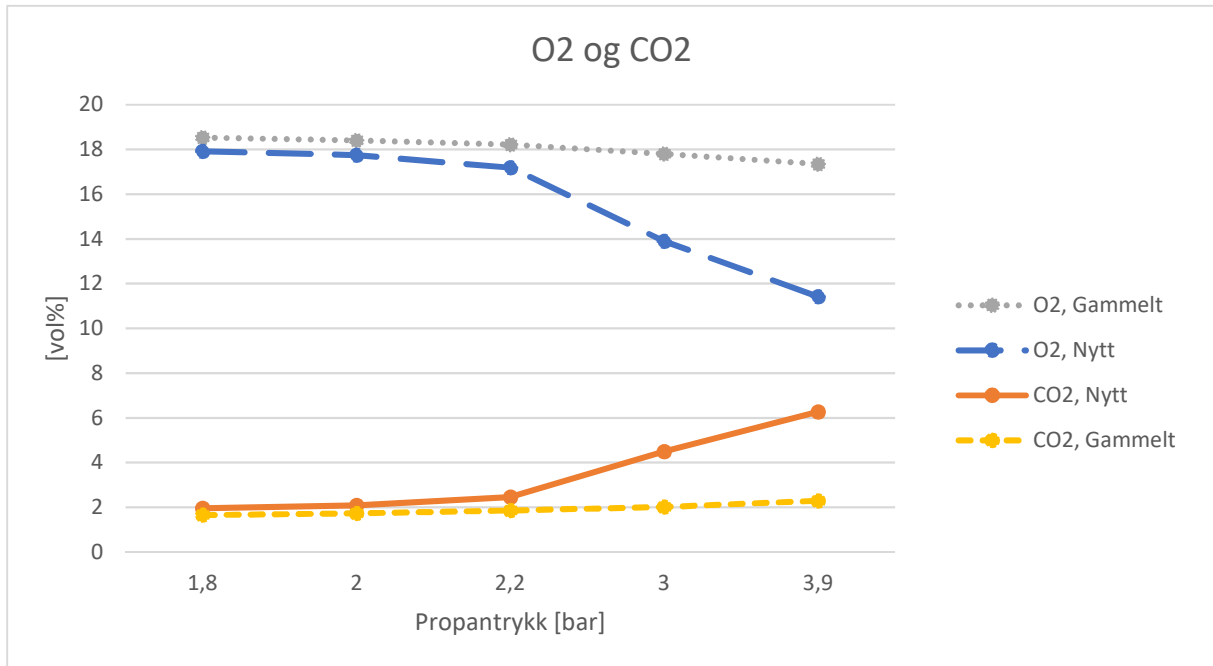
7. Diskusjon

Gruppen har i dette prosjektet designet og bygget et nytt brennkammer som fungerer. Brennkammerets design kommer av enkle utregninger og modifikasjoner i forhold til hvilke dimensjoner på materiale som var tilgjengelig. Gruppen valgte bevisst åtte bolter i flensen i det nye designet for bedre tetning mellom flensene, istedenfor seks bolter som det er i det gamle brennkammeret. Allerede under den kalde testen var det mulig å se forbedringen, det var lekkasje i toppen av det gamle brennkammeret og ikke i det nye som nevnt i kapittel 6.2.

Trendmålingene av temperaturfordelingen viser en tydelig skjev flamme i det gamle brennkammeret, der to av sensorene har tilnærmet lik temperatur mens den tredje har mye høyere temperatur. Dette samsvarer med resultatene funnet i masteroppgaven der CFD-analysen viste en skjev flamme. I det nye brennkammeret viser alle tre sensorene ulik temperatur. Dette gir ingen tydelig indikasjon på at flammen er skjev mot en side. På grunn av usikkerhetene ved trend målingene, se kapittel 6.3, er det vanskeligere å tolke resultatene av målingene.

Selv om trykktapet i brennkamrene var likt ble ikke samme massestrøm luft oppnådd ved lik frekvens på viften. Dette bidrar til ulike verdier for det teoretiske blandingsforholdet (AFR), som igjen gjør det vanskeligere å få gode sammenligninger av blant annet godhetsgraden, se kapittel 7.2. Resultat av temperaturmålingene viser at temperaturene går ned ved utløp på brennkammeret. Dette betyr at flammens høyeste temperatur vil være inne i brennkammeret og ikke på skovlene i turbinen.

Figur 22 viser ulike verdier for O_2 og CO_2 ved ulike propantrykk og lik luftstrøm. For å kunne sammenligne disse må antagelsen om at likt propantrykk gir lik massestrøm stemme. Denne grafen trenger ikke stor grad av nøyaktighet for å vise forskjellen, og derfor kan vi godta avviket, mellom propantrykk og massestrøm propan, som har vist seg å ligge under 10%. Grafene viser at ved høyere propantrykk stiger andel CO_2 og andel O_2 synker. I det gamle brennkammeret er CO_2 -verdien forholdsvis lik ved de ulike propantrykkene, noe som vil si at selv om det blir tilført mer propan klarer ikke brennkammeret å forbrenne mer. Dette er ikke tilfellet i det nye brennkammeret. Der øker andel CO_2 ved økende propantrykk, det vil si at jo mer propan som blir tilført jo høyere blir andel CO_2 . Det viser at det nye brennkammeret har bedre miksing med variabel last. For verdier til grafen se «Måleresultat til graf» i Vedlegg 1.



Figur 22: Sammenligning av CO₂ og O₂

På grunn av oppdagelser underveis i testingen ble de gjort endringer med hvilke punkter som ble målt. Dette gjorde at mange av forsøkene ikke kunne sammenlignes da gruppen ikke var konsekvent nok på hvilke målepunkter som skulle være med i hvilke forsøk. Dette er en erfaring som andre grupper bør bite seg merke i.

7.1 Designendringer

På bakgrunn av resultatene fra testene ble det besluttet, sammen med veileder, å gjøre noen endringer. Basert på høy CO i det nye brennkammeret var det et ønske om å tvinge frem en bedre blanding av propan og luft. Det ble gjort tre ulike endringer for å prøve og oppnå dette. Disse endringene ble gjort på en slik måte at det enkelt kunne reverseres.

Deler av brennerhetten ble kuttet av i et forsøk på å tilføre sekundærluft tidligere i prosessen, se Figur 23. En ny brennerhette kan kjøpes inn fra Gasservice. På grunn av dette ble det også boret flere hull i toppen av flammerøret. Den siste endringen som ble gjort var å tette igjen åpningen mellom enden av flammerøret og casingen, dette ble gjort for å tvinge luften inn i flammerøret. En plate ble skjært ut i rustfritt stål og tilpasset til flammerøret og casingen, se Figur 24. Ved å gjøre disse endringene vil luften bli tvunget inn i flammerøret og blande seg mer med propanen.



Figur 23: Kutting av brennerhette



Figur 24: Flammerør montert i casing med modifikasjoner

Mottrykket som oppstod når åpningen mellom enden på flammerøret og casingen gjorde at det ikke var mulig å kjøre ved ønskede hastigheter. Måtte derfor fjerne blenden som lagde mottrykket i stativet.

7.1.1 Resultater

Nytt brennkammer med designendringer			
Propantrykk	1,8bar	2bar	2,2bar
Strømning, luft	0,101m ³ /s	0,101m ³ /s	0,0974m ³ /s
Massestrøm, propan	0,00137kg/s	0,00146kg/s	0,00151kg/s
Temperatur			
T ₃	520K	560K	591K
T _{3,2}	590K	635K	670K
Trykk			
P ₂	0,0375bar	0,0375bar	0,0344bar
Avgass			
NO _x	0ppm	1ppm	1ppm
CO	968ppm	1187ppm	1347ppm
CO ₂	2,35vol%	2,61vol%	2,88vol%
O ₂	16,82vol%	16,34vol%	15,84vol%
SO ₂	5,8ppm	5,2ppm	4,8ppm

Tabell 8: Resultat av designendringer

Resultatene av designendringene viser en betydelig høyere verdi for CO, men fortsatt ganske lav verdi NO_x. En noe lavere vol% O₂, men høyere vol% CO₂. Testen med 2 bar propantrykk tilsvarer delforsøk 3, og testen med 1,8 bar propantrykk tilsvarer delforsøk 4.

Temperaturmålingene viser at disse endringene har ført til at temperaturen har gått ned. Dette kan være en mulig forklaring på hvorfor CO-verdien er blitt så høy, da lav temperatur gir høy andel CO. Dette gir imidlertid ikke en forklaring på hvorfor andelen CO₂ også er blitt høyere, da høyere CO₂ skal gi lavere CO.

På grunn av dårlig tid måtte flere og større endringer gjøres på samme tid for å gi mest mulig utslag på målingene. Dette gjør at det ikke er mulig å vite hvilke endringer som har ført til negativ effekt.

7.2 Godhetsgrad

Gruppen har definert to faktorer, X og Y for å si noe om «godheten» til brennkamrene. Et «godt» brennkammer vil ha verdier for CO₂ og O₂ nær de teoretiske verdiene. Kan da anta at mesteparten av propanen er forbrent, og vi har en fullstendig forbrenning. En X- og Y-verdi nær 1 er et godt brennkammer. X-verdien skal ikke overstige 1, det kan ikke bli mer karbon i avgassen enn det som blir tilført. Y-verdien skal være over 1, det er ikke mulig å bruke mer oksygen enn det som er teoretisk mulig.

Under delforsøk 3 og delforsøk 4 var det mulig å bruke Precisa Lab-vekten da det ble benyttet en mindre propanflaske som ikke oversteg maksimal vekt på 24kg. Siden en badevekt, som ikke er like nøyaktig, ble benyttet i de andre forsøkene var det bare disse to forsøkene som ble brukt til å finne X og Y. For formler og beregninger se «Godhetsgrad» i Vedlegg 1.

$$X = \frac{CO_2\text{målt}}{CO_2\text{teoretisk}} \qquad Y = \frac{O_2\text{målt}}{O_2\text{teoretisk}}$$

	Delforsøk 3			Delforsøk 4		
	Nytt	Gammelt	Nytt m/ modifikasjoner	Nytt	Gammelt	Nytt m/ modifikasjoner
X	0,811	0,830	1,163	0,805	0,805	1,121
Y	0,967	0,969	1,076	0,966	1,036	1,059

Tabell 9: Godhetsgrad

Teoretisk AFR er et av nøkkeltallene for å regne ut X og Y. Denne verdien skal være tilnærmet lik for både det nye og det gamle brennkammeret, da den kun er avhengig av massestrøm propan og luft. Resultatene viser at det er opp til 10% avvik på AFR i det gamle i forhold til det nye, der verdien for AFR er større i det gamle. Den høye verdien for AFR kommer av at det ble oppnådd høyere massestrøm luft og lavere massestrøm propan som gir en mer mager blanding, se Tabell 5 og Tabell 6.

I Tabell 9 kan man se at det er liten forskjell i godhetsgraden av CO₂. I begge delforsøkene har vi fetere blanding i det nye brennkammeret. Det er marginal forskjell på verdiene for X i det nye og det gamle brennkammeret. På grunn av mange usikkerheter ved måling er det derfor vanskelig å slå fast hvilket av brennkamrene som har en mer fullstendig forbrenning. Det nye brennkammeret med modifikasjoner får en X-verdi over 1, noe som ikke er mulig da den målte CO₂-verdien ikke kan være høyere enn den teoretisk mulige. Dette sammen med de usammenhengende resultatene, nevnt i kapittel 7.1.1, kan bety at det har vært noe feil med CO₂ målingen i Horibaen under testen av det nye brennkammeret med modifikasjoner.

Forskjellen i godhetsgrad av O₂ er også marginal, spesielt for delforsøk 3. I delforsøk 4 er Y-verdien over 1 noe som, nevnt tidligere i dette kapitlet, ikke er mulig. Det kan være flere årsaker til dette, men mest sannsynlig kommer dette av måleusikkerhet med Horibaen, se kapittel 6.3. Det nye brennkammeret med modifikasjoner hadde Y-verdi over 1 i begge delforsøkene, dette gjør det vanskelig å si noe om graden av godhet har blitt bedre.

Ut ifra Figur 22 kan man se at andelen O₂ og CO₂ er relativt lik for det nye og det gamle brennkammeret under delforsøk 3 og 4. Dette kan være årsaken til liten forskjell i godhetsgraden.

Godhetsgraden i de mer «ekstreme» forsøkene kunne gitt et større utslag. Precisa Lab-vekten kunne ikke brukes i disse forsøkene, det var derfor ikke mulig å få nøyaktige nok målinger til å gjøre utregningene som er nødvendig for å finne godhetsgraden.

7.3 Forslag til videre arbeid med brennkammeret

Brennkammeret er designet med den intensjon om at det skal være enkelt å gjøre endringer uten å måtte lage et helt nytt brennkammer. Siden gruppen ikke fikk tid til å teste brennkammeret montert til gassturbinen er dette en av tingene som først bør gjøres. Dette for å teste brennkammeret under de faktiske forholdene.

Det anbefales å kjøpe en ny brennerhette for å se om det var denne som gav negativ effekt. I tillegg bør det ses på nytt tenningsystem, da det som ble brukt i dette prosjektet ikke fungerte. Et tenningsystem med en større gnist eller eventuelt en flamme, da gnisten i dette tenningsystemet mest sannsynlig var for svak.

Med flammerøret er det flere design som kan prøves. Siden selve flammerøret bare er punktet på flensen er det lett å fjerne denne og prøve et annet flammerør eller eventuelt en annen flens. I dette prosjektet ble et rett rør benyttet til flammerør, men det er også brennkammer som har et konisk flammerør. For videre arbeid kan dette være et design som kan testes ut. Når det gjelder flensen kan det forsøkes med mindre eller større åpninger og se mulige utslag fra dette.

Det ble tidlig i prosjektet diskutert nytten av en «swirl» i innløpet av flammerøret. En swirl gjør strømmingen mer turbulent og bedrer miksingene. Gruppen valgte i dette prosjektet å ikke designe en swirl da det ble sett på som for omfattende og tidkrevende i tillegg til å designe og bygge et helt nytt brennkammer. Dette er en mulig forbedring fremtidige grupper kan teste ut og se virkningen av.

8. Konklusjon

Hovedmålet med dette prosjektet var å få en mer fullstendig forbrenning og en jevnere temperaturfordeling. De resultatene som er blitt fokusert mest på er derfor temperaturfordeling, avgassmåling og godhetsgrad. På grunn av flere usikkerheter ved temperaturmålingene var det ikke mulig å konkludere om temperaturfordelingen var blitt bedre eller dårligere. Det som var tydelig var at temperaturfordelingen i det gamle brennkammeret var skjev. Ut ifra grafen, se Figur 22, er det mulig å se at det nye brennkammeret klarer å utnytte den tilførte propan bedre enn det gamle. Dette er et tegn på mer fullstendig forbrenning. Økt propantrykk fører til økt andel CO₂ på samme tid som at verdien for O₂ synker. Modifikasjonene på det nye brennkammeret, som ble gjort etter første testing, gav en tilsynelatende negativ effekt med sprikende resultat i forhold til teori. Godhetsgraden viser at det nye og det gamle brennkammeret har forholdsvis lik forbrenning.

Testing av det gamle brennkammeret viser at det er bedre enn antatt. Dette medførte at de endringene gruppen gjorde ikke var omfattende nok til å få større utslag. Tatt i betraktning alle testene og resultatene som er blitt frembrakt i dette forsøket, kan ikke gruppen si med sikkerhet om det nye brennkammeret har jevnere temperaturfordeling enn det gamle brennkammeret. Det som kan sies er at det nye brennkammeret har bedre miksing ved ulik mengde propan, noe som gir mulighet for ytelsesøkning med lik luftmengde.

For videre arbeid bør fremtidige grupper se på andre typer design på flammerøret, for eksempel et konisk flammerør. Det bør også ses på muligheter for å bruke en probe som måler et snitt av strømmingen istedenfor proben som måler et lokalt punkt. Dette kan gi mer nøyaktige og sammensvarende resultat. Siden brennkammerteknologi er avansert og komplekst anbefaler gruppen en prøve-og-feile-metode for å finne det beste designet.

Referanser

- [1] Systech Instruments Ltd (UK). "Paramagnetic Cells Technology For Our Paramagnetic O2 Analyser." Systech Instruments Ltd (UK). <https://www.systechillinois.com/en/support/technologies/paramagnetic-cells> (accessed 29. april 2019).
- [2] Borsheim, Lunde, and Navarsete, "Ferdigstilling av institutt for maskin- og marinfag sin modell-gassturbin," Høgskulen på Vestlandet, 2017.
- [3] H. Turbochargers. "Holset HX55 Turbochargers." <http://www.myholsetturbo.com/holsethx55.html> (accessed 2019).
- [4] K. Hofstad. "Brayton Syklus." <https://snl.no/Brayton-syklus> (accessed 30. Jan, 2019).
- [5] L. M. Nerheim, "Gassturbiner – 1: Oppbygging og prosess," ed. Høgskulen på Vestlandet, 2018.
- [6] L. M. Nerheim, "Litt om avgassforurensing fra forbr.motorer, reduserende tiltak og målemetoder," ed: Høgskulen på Vestlandet, 2018.
- [7] H. I. H. Saravanamuttoo, H. Cohen, G. F. C. Rogers, and P. V. Straznicky, *Gas turbine theory*, 6th ed. ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [8] Horbia, "Portable Gas Analyzer PG-350E Instruction manual," ed.
- [9] Ø. Grøn. "Trykk - fysikk." <https://snl.no/trykk - fysikk> (accessed 12. Mars, 2019).
- [10] M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*, 4 ed. Elsevier Science, 2011.
- [11] D. Giandomenico. "GR-1 Turbojet Project 3/8/04." http://rcdon.com/html/gr-1_turbojet_project_3_8_04.html (accessed 2019).
- [12] *Varmeverktøy for profesjonelle*, Sievert AB, 2019.
- [13] HORIBA. "PG-350E Portable Gas Analyzer." HORIBA. <http://www.horiba.com/it/process-environmental/products/combustion/transportable/details/pg-350e-portable-gas-analyzer-19617/> (accessed 2019).
- [14] Precisa. Precisa. <https://www.precisa.com/products?f=Industrial%20Scales> (accessed 2019).
- [15] RS-Pro, "RS PRO DIGITAL THERMOMETER Product Datasheet," ed: RS-Pro.
- [16] L. LG Precision Co., "Adjustment and Test procedure Manual for digital multimeter," ed: LG Precision Co., Ltd., 1999.
- [17] Amprobe, "TMA10A Anemometer User Manual," ed. Amprobe.
- [18] Neutrium. "CALCULATION OF FLOW THROUGH NOZZLES AND ORIFICES." Neutrium. https://neutrium.net/fluid_flow/calculation-of-flow-through-nozzles-and-orifices/ (accessed 2019).
- [19] K. Reif, K.-H. Dietsche, and H. Robert Bosch Gmb, *Automotive handbook*, 9th rev. and extended ed. ed. Karlsruhe Cambridge, MA: Robert Bosch Bentley, 2014.

Figurliste

Figur 1: Bilde av gassturbin med dagens brennkammer.....	13
Figur 3: T-s diagram av Brayton-syklusen	15
Figur 2: Skisse av de viktigste komponentene i en gassturbin	15
Figur 4: Sammenheng mellom lambda og NO_x [5].....	16
Figur 5: Horiba, avgassanalysator, med tørker og kalibreringsgasser	16
Figur 6: Avgassmåling ved bruk av paramagnetisk celle [1]	17
Figur 7: Prinsippskisse av pitotrør	18
Figur 8: Skisse av hovedkomponentene i brennkammeret.....	22
Figur 10: Ny dyse med brennerhette.....	23
Figur 9: Skisse av brennerhette montert i brennkammeret.	23
Figur 11: Skisse av casingen	24
Figur 12: Skisse av flammerøret	25
Figur 13: Skisse av luftinnløpet.....	26
Figur 15: Nytt brennkammer montert på stativet	27
Figur 14: Gammelt brennkammer montert på stativet.....	27
Figur 16: Illustrasjon av testriggen	29
Figur 17: Gammelt brennkammer montert for kald test.....	30
Figur 18: Nytt brennkammer montert for varm test.	32
Figur 19: Lukkemekanismen montert på casingen.....	33
Figur 20: Målepunkter gammelt brennkammer	34
Figur 21: Målepunkter nytt brennkammer	34
Figur 22: Sammenligning av CO_2 og O_2	43
Figur 23: Kutting av brennerhette	44
Figur 24: Flammerør montert i casing med modifikasjoner.....	44

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over tidligere oppgaver på gassturbinen.....	19
Tabell 2: Målinger kald test.....	35
Tabell 3: Målinger delforsøk 1	36
Tabell 4: Målinger delforsøk 2	37
Tabell 5: Målinger delforsøk 3.....	38
Tabell 6: Målinger delforsøk 4.....	39
Tabell 7: Temperaturfordeling ved ulike delforsøk	40
Tabell 8: Resultat av designendringer.....	45
Tabell 9: Godhetsgrad	46

Vedlegg

Vedlegg 1: Formler

Måleblende

	Opprinnelig	Etter kald test	Enheter
\dot{m}	0,3	0,16	kg/s
Cd	0,6	0,6	
D1	0,083	0,083	m
D2	0,055	0,055	m
β	0,663	0,663	D2/D1
ρ	0,8	0,3	m ³ /kg
ΔP	0,447	0,339	bar

$$\Delta P = \left(\frac{4 \cdot Q}{C_d \cdot \pi \cdot D_2^2} \right)^2 \cdot \frac{(1 - \beta^4)}{\rho}$$

Utleddet fra:

$$Q = C_d A_o Y \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho (1 - \beta^4)}} \quad [18]$$

Der:

D1 - rørdiameter

D2 - huldiameter i måleblende

Opprinnelige antagelser: $T = 700^\circ\text{C}$, $P = 220000\text{Pa}$ $\rho = 0,8\text{m}^3/\text{kg}$

Antagelser etter kald test: $T = 800^\circ\text{C}$, $P = 105000\text{Pa}$ $\rho = 0,3\text{m}^3/\text{kg}$

1 bar = 10^5Pa

Måleresultat til graf

	Nytt					Gammelt					
Propantrykk	1,8	2	2,2	3	3,9	1,8	2	2,2	3	3,9	bar
Fart luft	3,2	3,2	3,1	3,02	3,15	3,1	3,1	3	3,15	3,15	m/s
Volumstrøm luft	0,101	0,101	0,097	0,095	0,099	0,097	0,097	0,094	0,099	0,099	m ³ /s
CO ₂	1,96	2,08	2,46	4,49	6,27	1,65	1,73	1,85	2,02	2,29	vol%
O ₂	17,92	17,74	17,19	13,9	11,42	18,53	18,4	18,21	17,8	17,35	vol%

Trykkmåling

	$I [mA]$	$P [bar]$
<i>Kald test gammelt</i>		
<i>P2</i>	4,26	0,0406
<i>P3</i>	4,12	0,0188
ΔP	-	0,0219
<i>Kald test nytt</i>		
<i>P2</i>	4,26	0,0406
<i>P3</i>	4,13	0,0203
ΔP		0,0203
<i>Delforsøk 3</i>		
<i>P2 nytt</i>	4,29	0,0453
<i>P2 gammelt</i>	4,32	0,0500
<i>P2 nytt mod</i>	4,24	0,0375
<i>Delforsøk 4</i>		
<i>P2 nytt</i>	4,28	0,0438
<i>P2 gammelt</i>	4,31	0,0484
<i>P2 nytt mod</i>	4,24	0,0375

$$P = \frac{2,5 \cdot (I - 4)}{16} [bar]$$

$$\Delta P = P_2 - P_3$$

Godhetsgrad

$$A_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} [m^2]$$

$$Q = A_v \cdot v [m^3/s]$$

$$\dot{m} = \rho_{luft} \cdot Q [kg/s]$$

$$\lambda_{m\ddot{a}lt} = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$AFR_{m\ddot{a}lt} = \lambda_{m\ddot{a}lt} \cdot AFR_{st\ddot{o}kiometrisk} [kg_{luft}/kg_{propan}]$$

$$\lambda_{teoretisk} = \frac{AFR_{st\ddot{o}kiometrisk}}{AFR_{teoretisk}}$$

$$v_{Lr} = \frac{22,4}{0,21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} \right) [Nm^3_{luft}/kg_{propan}]$$

$$CO_{2,teoretisk} = \frac{22,4 \cdot \left(\frac{c}{12} \right) \cdot 100}{22,4 \cdot \left(\frac{c}{12} \right) + v_{Lr} \cdot (\lambda - 0,21)} [vol\%]$$

$$O_{2,teoretisk} = \frac{0,21 \cdot v_{Lr} \cdot (\lambda - 1) \cdot 100}{22,4 \cdot \left(\frac{c}{12} \right) + v_{Lr} \cdot (\lambda - 0,21)} [vol\%]$$

$$X = \frac{CO_{2,teoretisk}}{CO_{2,m\ddot{a}lt}}$$

$$Y = \frac{O_{2,teoretisk}}{O_{2,m\ddot{a}lt}}$$

Der:

$D_v =$ Diameter ventilasjonsrør (0,2m)

$A_v =$ Areal ventilasjonsrør

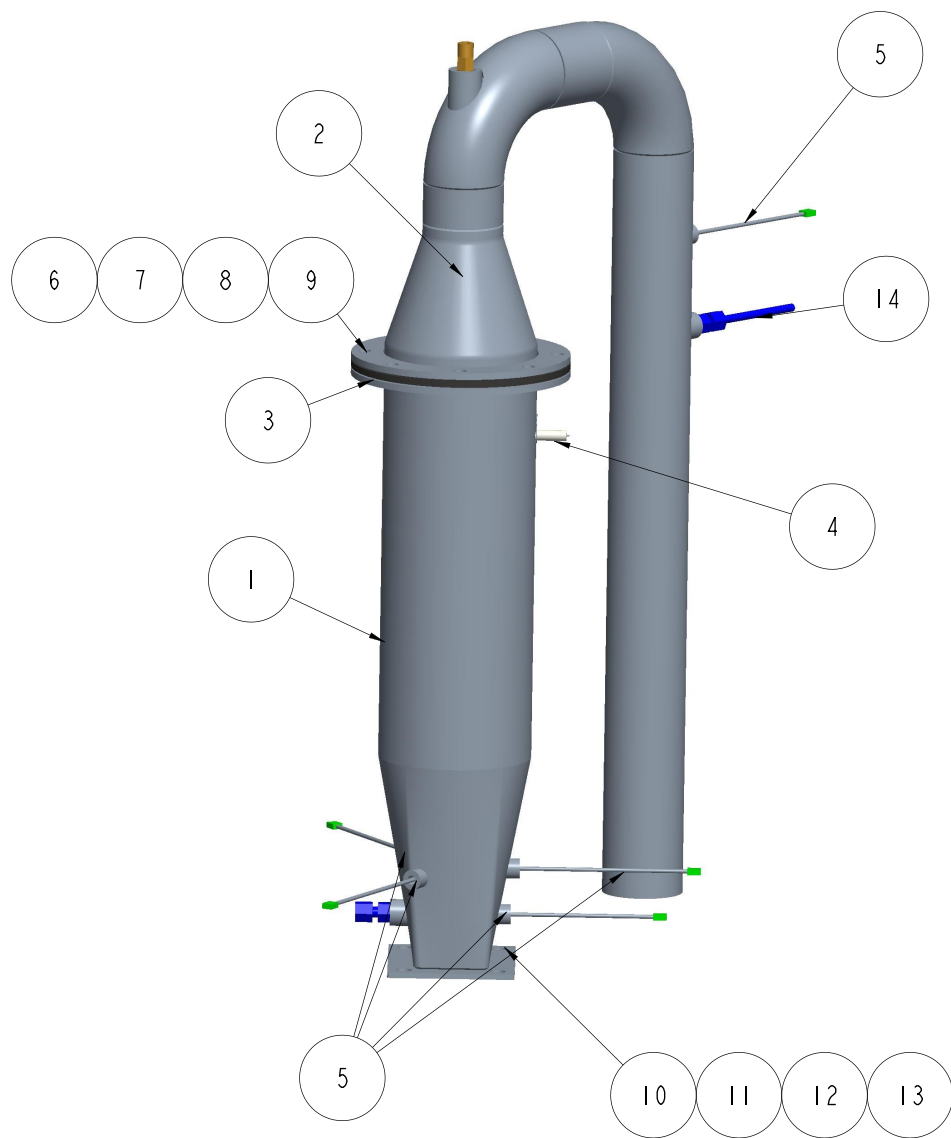
$c = 0,82$, $h = 0,18$, $s = 0$ [19]

$L_{min} = 15,6$ [kg_{luft}/kg_{propan}] ($AFR_{st\ddot{o}kiometrisk}$)

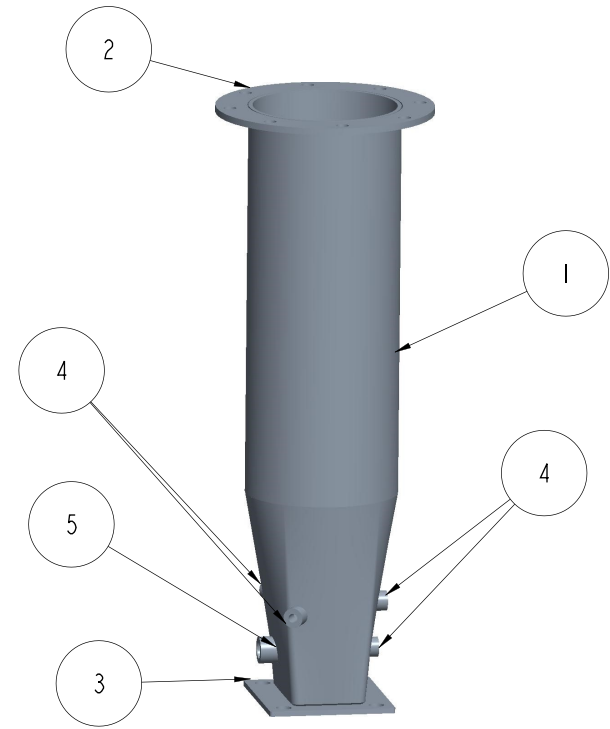
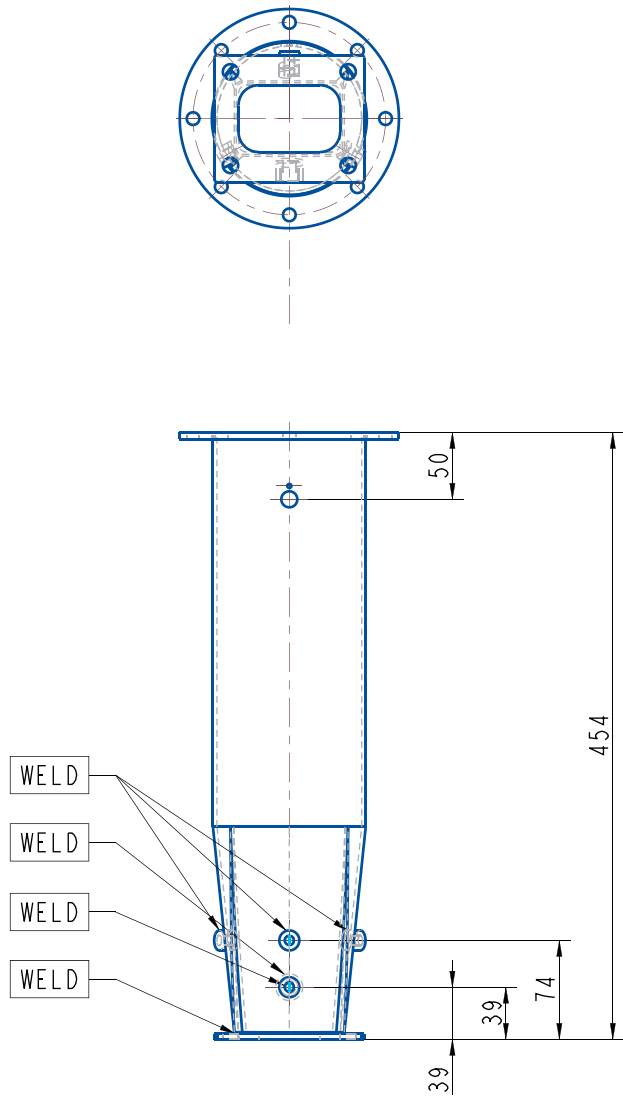
	Delforsøk 3			Delforsøk 4			Enheter
	Nytt	Gammelt	Nytt med mod.	Nytt	Gammelt	Nytt med mod.	
V	3	3,1	3,2	3,0	3,1	3,2	m/s
Q	0,094	0,097	0,101	0,093	0,097	0,101	m ³ /s
ρ_{luft}	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	kg/m ³
Massestrøm luft	0,123	0,127	0,131	0,120	0,127	0,131	kg/s
Propanforbruk	892,1	810,8	469,8	507,2	785,4	489,7	g
Tid	600	615	321	367	606	358	s
Massestrøm propan	0,00149	0,00132	0,00146	0,00138	0,00130	0,00137	kg _{propan} /s
Avgass							
NO _x	0	3	1	0	1	0	ppm
CO	455	309	1187	391	292	968	ppm
CO ₂	1,90	1,73	2,61	1,82	1,65	2,35	vol%
O ₂	18,04	18,40	16,34	18,18	18,53	16,82	vol%
SO ₂	11,3	2,7	5,2	10,4	2,5	5,8	ppm
Beregninger							
$AFR_{støki.}$	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	kg _{luft} /kg _{propan}
$\lambda_{m\ddot{a}lt}$	7,095	8,077	4,506	7,447	8,502	5,024	
$AFR_{m\ddot{a}lt}$	110,676	126,000	70,300	116,170	132,632	78,373	kg _{luft} /kg _{propan}
$AFR_{teoretisk}$	82,405	96,032	89,297	87,177	97,687	95,542	kg _{luft} /kg _{propan}
λ , teoretisk	5,282	6,156	5,724	5,588	6,262	6,125	
v_{Lr}	12,089	12,089	12,089	12,089	12,089	12,089	Nm ³ _{luft} /kg _{propan}
$CO_{2,teoretisk}$	1,898	1,623	1,748	1,792	1,595	1,632	vol%
$O_{2,teoretisk}$	17,393	17,914	17,677	17,594	17,967	17,898	vol%
X _{CO₂}	0,999	0,938	0,670	0,984	0,967	0,694	M\ddot{a}lt/teoretisk
1-X	0,001	0,062	0,330	0,016	0,033	0,306	
Y _{O₂}	0,964	0,974	1,082	0,968	0,970	1,064	M\ddot{a}lt/teoretisk
1-Y	0,036	0,026	0,082	0,032	0,030	0,064	

Vedlegg 2: Arbeidstegninger

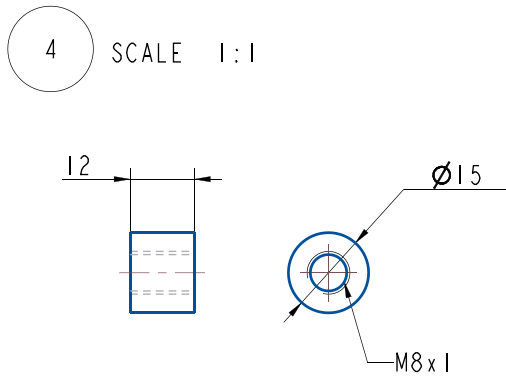
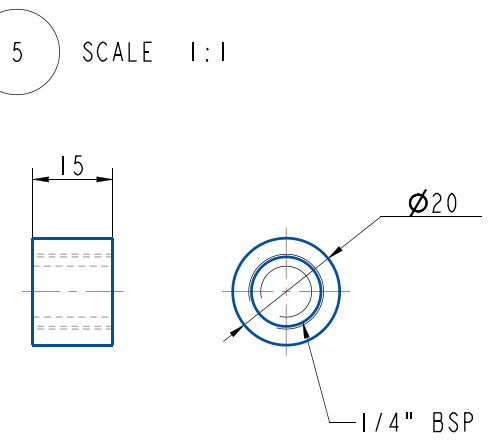
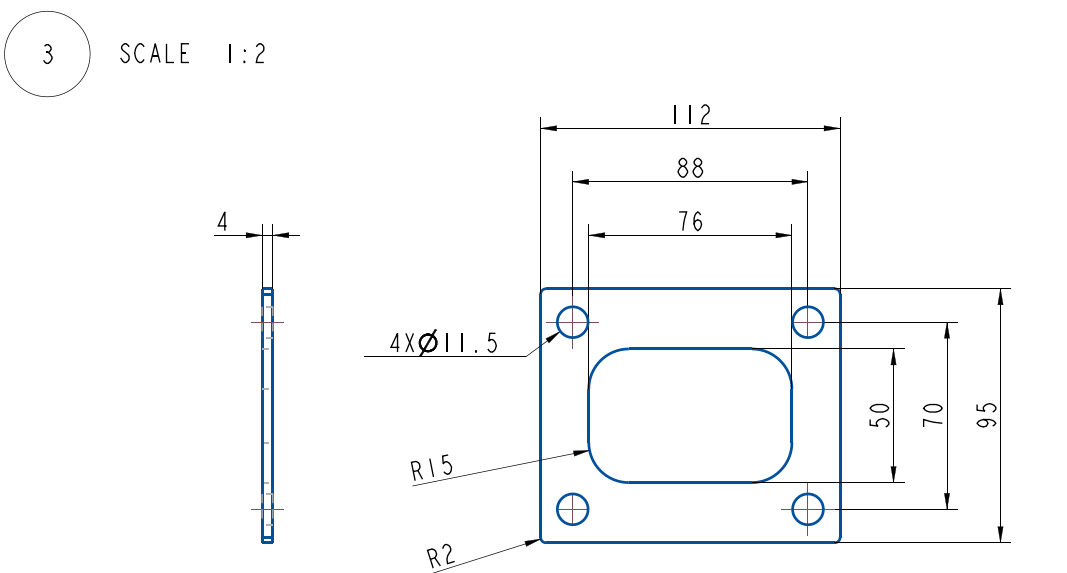
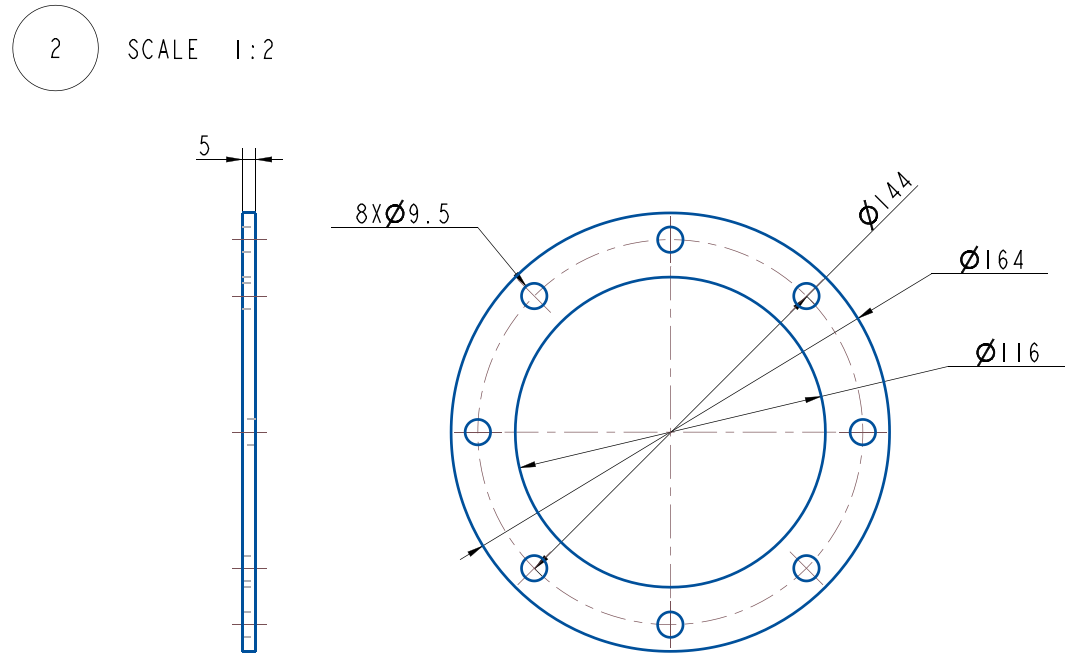
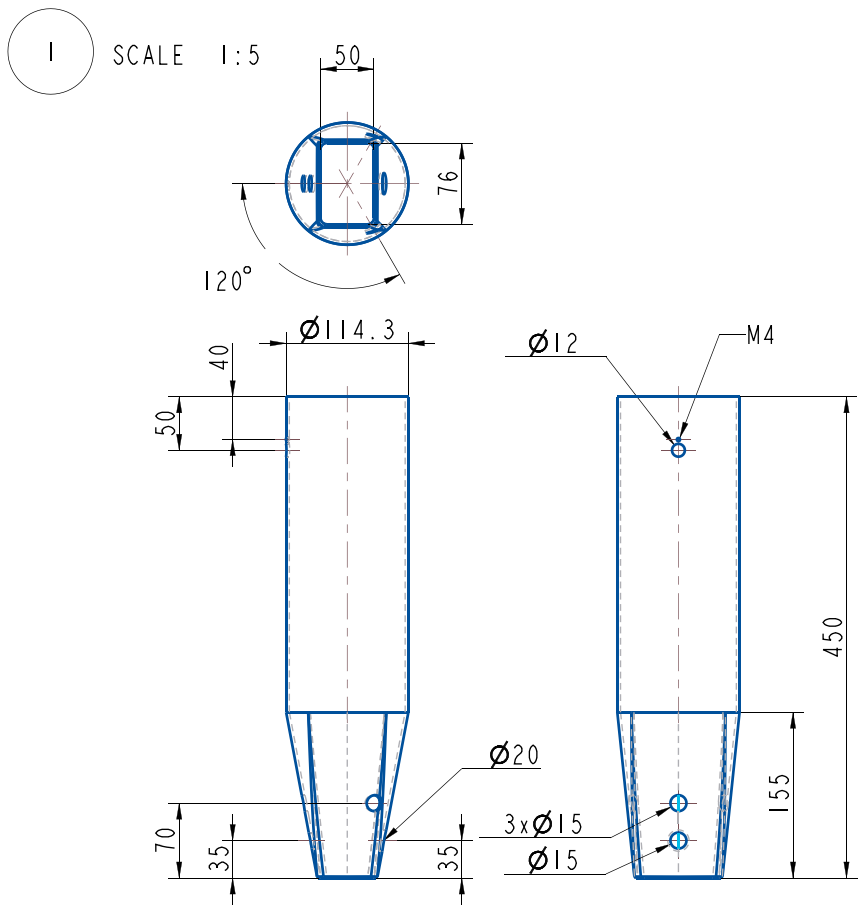
1	Brennkammer	
	1.1	Casing
	1.2	Luftinnløp
	1.2.1	Emne med innvendig gjenge
	1.3	Flammerør m/ mellomflens
2	Testrigg	
	2.1	Stativ
	2.2	Overgang
	2.3	Flens til slange
3	Tilbehør	
	3.1	Plugg 1 - M8x1
	3.2	Plugg 2 - 1/4" BSP



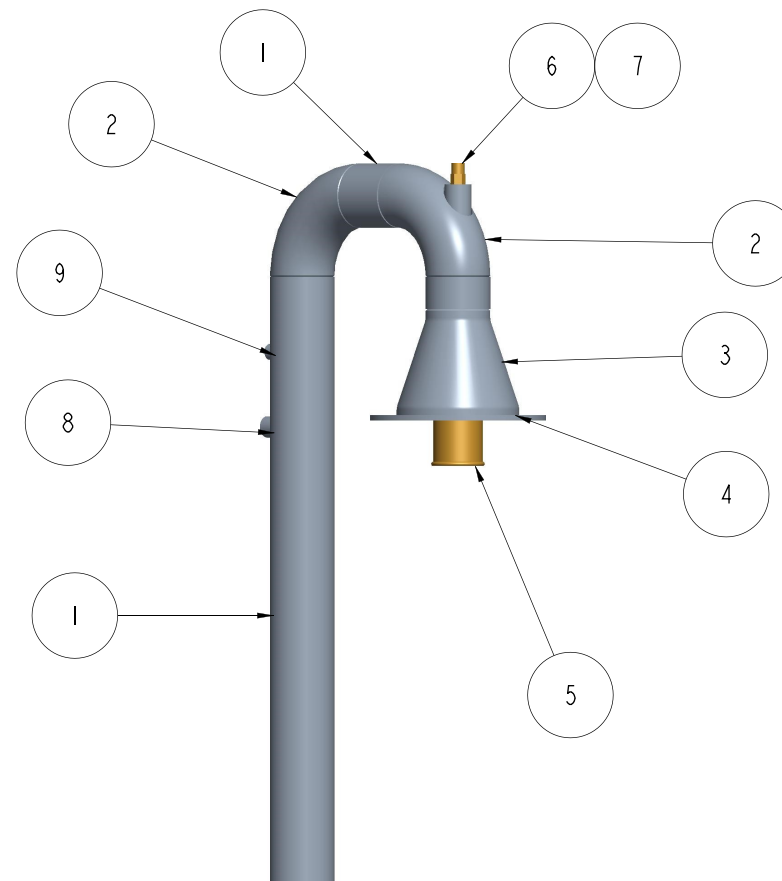
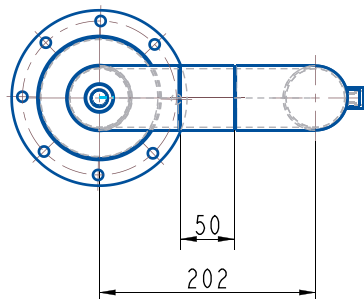
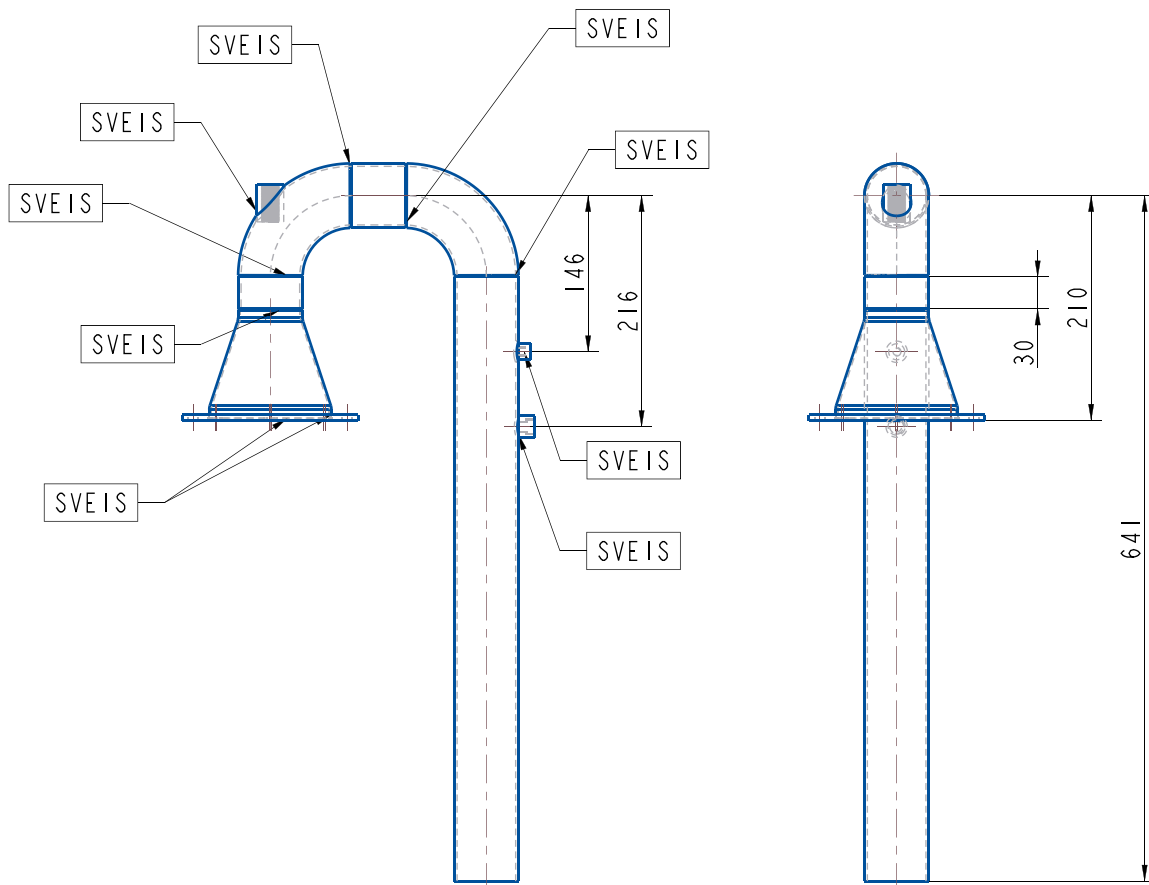
14	2		TRYKSENSOR	-		
13	4		PAKNING	-		
12	4		SKIVE	-	11.0	
11	4		MUTTER	-	M10	
10	4		BOLT	-	M10	
9	8		PAKNING	-		
8	8		SKIVE	-	9.0	
7	8		MUTTER	-	M8	
6	8		BOLT	-	M8	
5	5		TEMP. SENSOR	-		
4	1		TENNER	-		
3	1	1.3	FLAMMERØR M/ MELLOMFLENS	316L		
2	1	1.2	LUFTINNLØP	-		
1	1	1.1	CASING	316L		
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon	
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
	Henriette			1:4	A3	1(1)
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell BRENNKAMMER	Dato		26-Feb-19
			Beskrivelse BRENNKAMMER	Tegning		1



5	1	SE "ARK 2"	EMNE MED GJENGER	316	3/8"	
4	4	SE "ARK 2"	EMNE MED GJENGER	316	M5X1	
3	1	SE "ARK 2"	FLENS	316	76X50	
2	1	SE "ARK 2"	FLENS	316	4"	
1		SE "ARK 2"	RØR	316	4"	
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon	
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
	Rita			1:4	A3	1(4)
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell CASING	Dato		04-Mar-19
			Beskrivelse CASING	Tegning		1.1



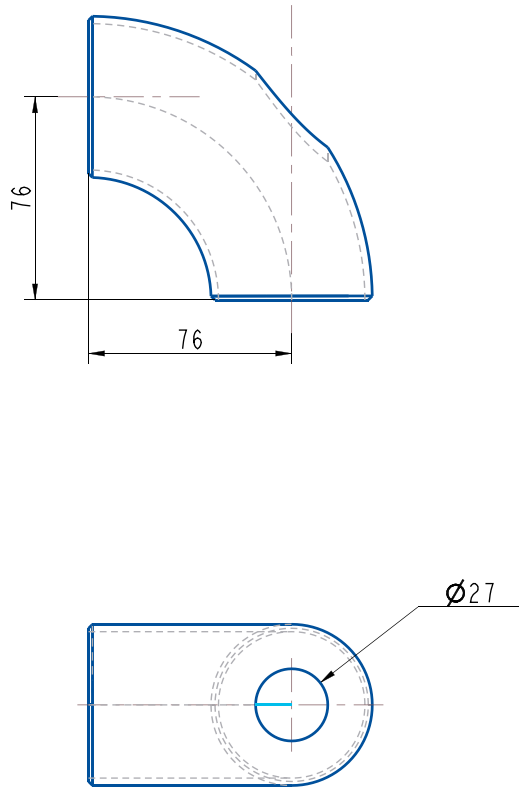
SVEISING



9	1	POS4 "CASING"	EMNE MED GJENGER	-	M8X1	
8	1	POS5 "CASING"	EMNE MED GJENGER	316	1/4"BSP	
7	1		NIPPEL	-	1/4"BSP	
6	1		EMNE MED GJENGER	316	R3/8"	
5	1		BRENNER	-	-	
4	1	POS2 "CASING"	FLENS	316	4"	
3	1	1967207	EKSPANSJONSØR	316	4"-2"	
2	2	SE "ARK 2"	ALBUE 90	316	2"	
1		SE "ARK 2"	RØR	316	2"	
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon	
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
	Rita			1:5	A3	1(2)
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell LUFTINNØP Beskrivelse LUFTINNØP	Dato	28-Feb-19	
				Tegning	1.2	

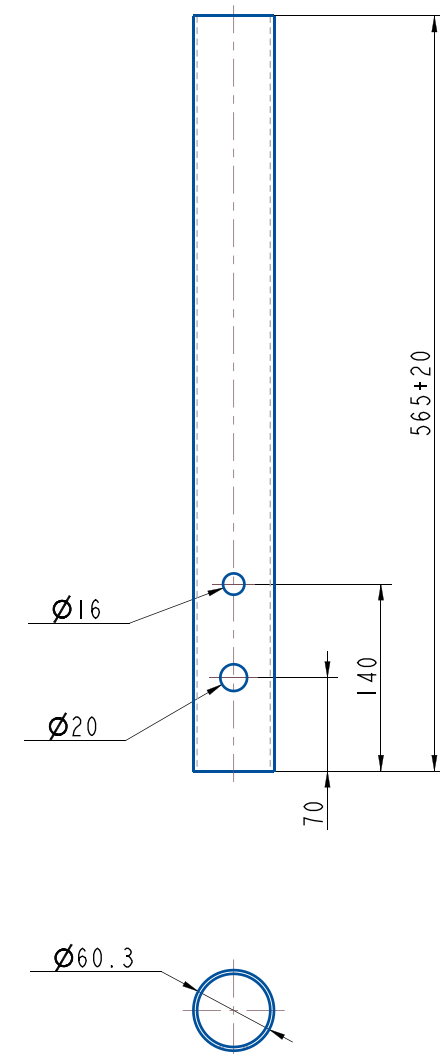
3

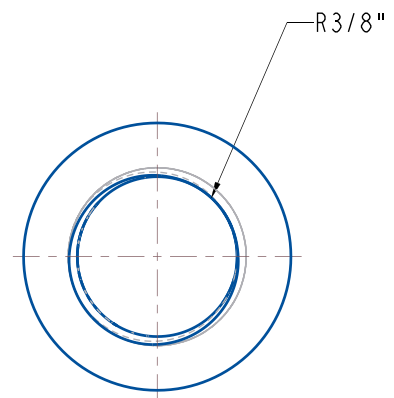
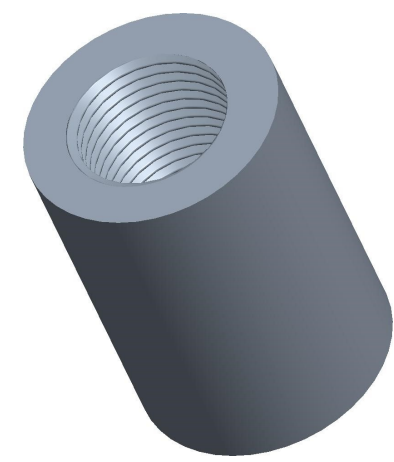
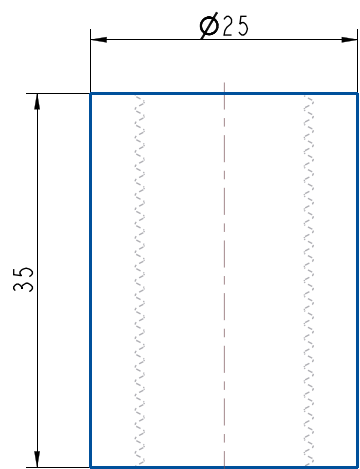
SCALE 1:2



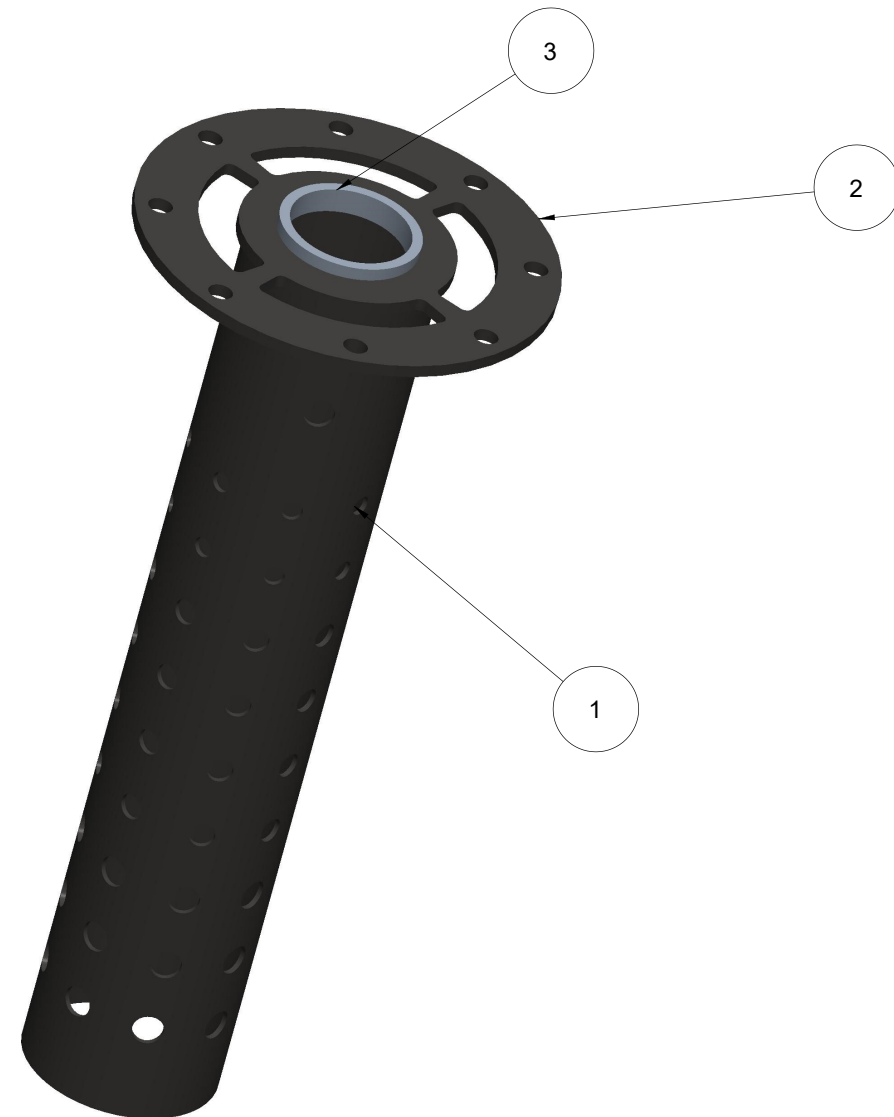
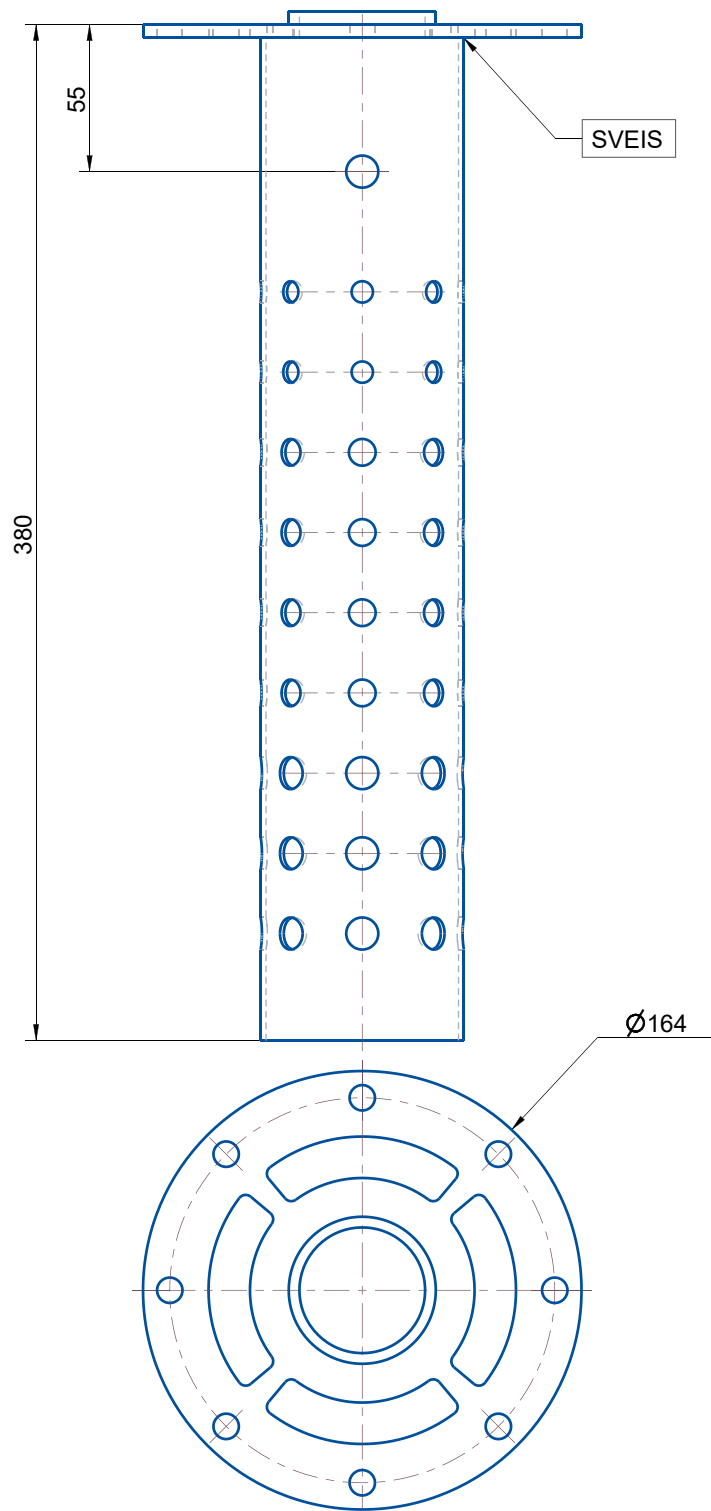
1

SCALE 1:4



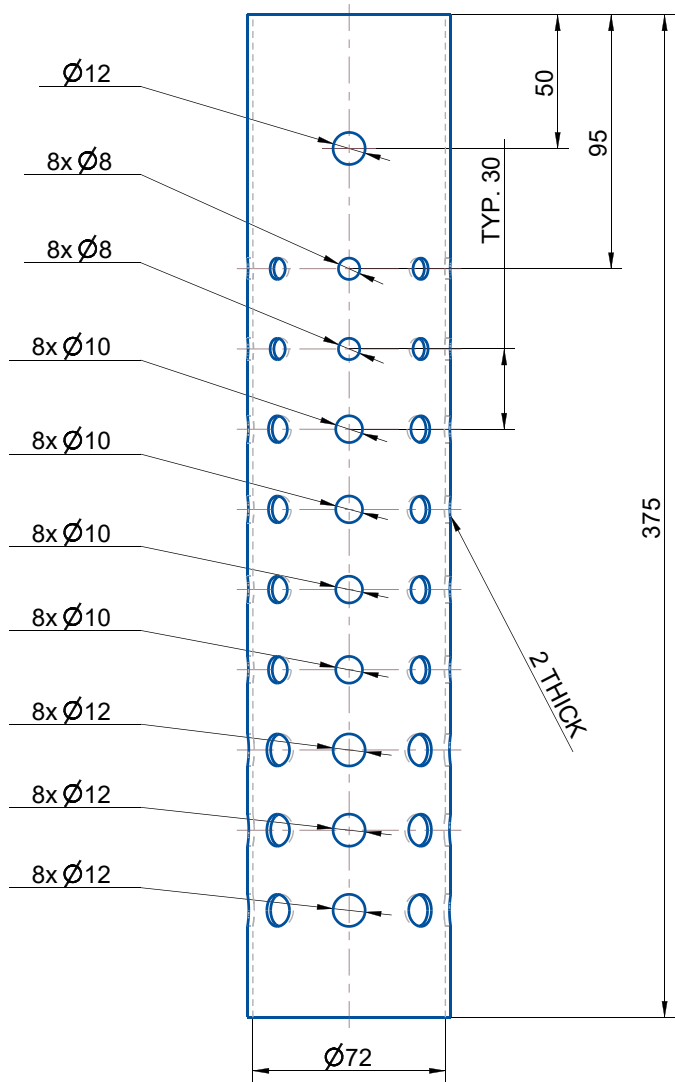


Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format
	Henriette			2:1	A3
		Artikkel/Modell			Dato
Høgskulen på Vestlandet		Beskrivelse			05-Mar-19
IMM		Emne med innvendig gjenge			Tegning
					1.2.1



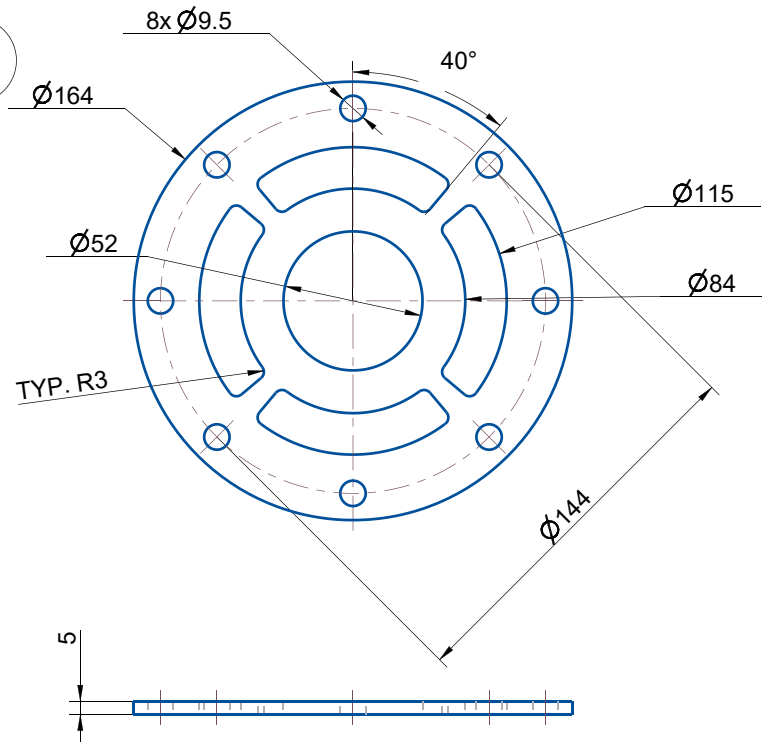
3	1	SE "ARK 2"	MASKINERT RING	316		
2	1	SE "ARK 2"	MELLOMFLENS	316	4"	
1	350m	SE "ARK 2"	FLAMMERØR	316	76mm	
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon	
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
	Henriette			1:2	A3	1(3)
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell	Dato		
			Beskrivelse	26-Feb-19		
			FLAMMERØR MED MELLOMFLENS	Tegning		
				1.3		

1



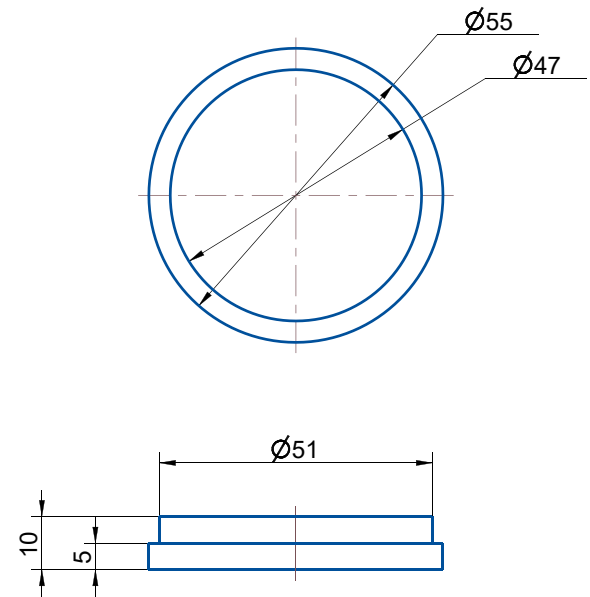
SCALE 1:2

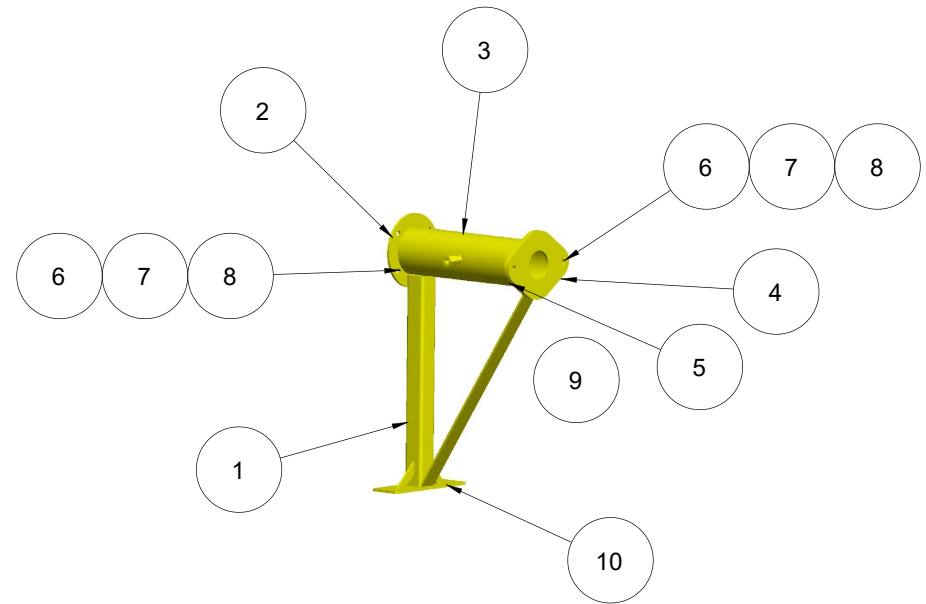
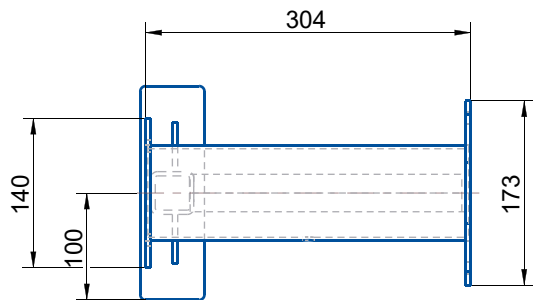
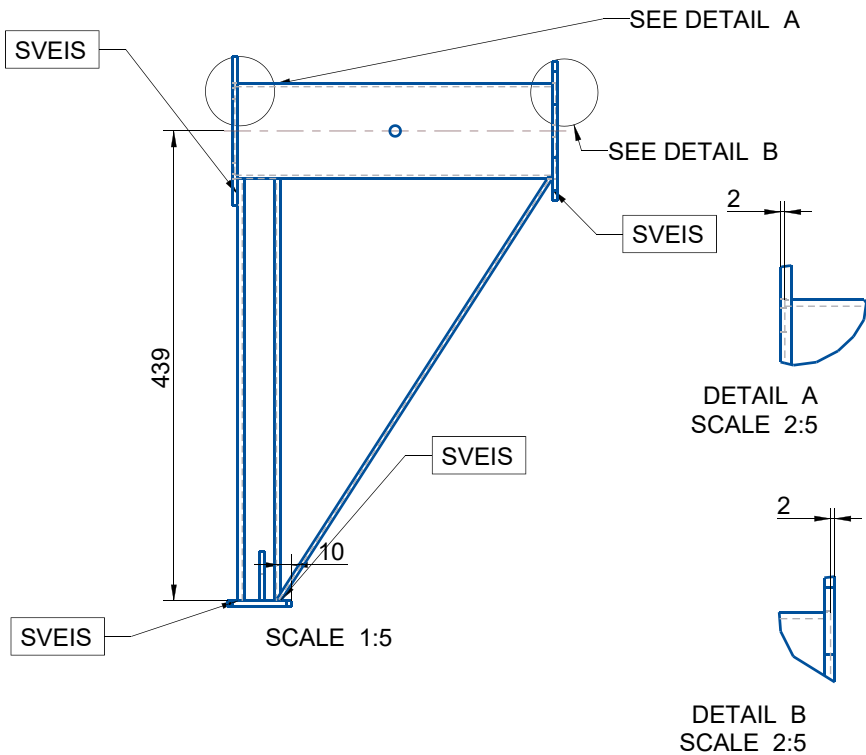
2



SCALE 1:2

3

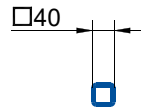
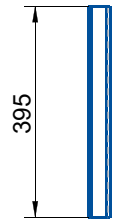




10	1	SE "ARK2"	PLATE		60x200	
9	1	SE "ARK2"	STØTTE			
8	12		SKIVE		11.0	
7	6		MUTTER		M10	
6	6		BOLT		M10	
5	1	SE "ARK2"	BLENDE			
4	1	SE "ARK2"	FLENSE			
3	1	SE "ARK2"	RØR			
2	1	SE "ARK2"	FLENSE			
1	1	SE "ARK2"	FIRKANTRØR		4MM PLATE	
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon	
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
	Rita			1:10	A3	1(6)
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell	Dato		18-Mars-19
			Beskrivelse STATIV	Tegning		2.1

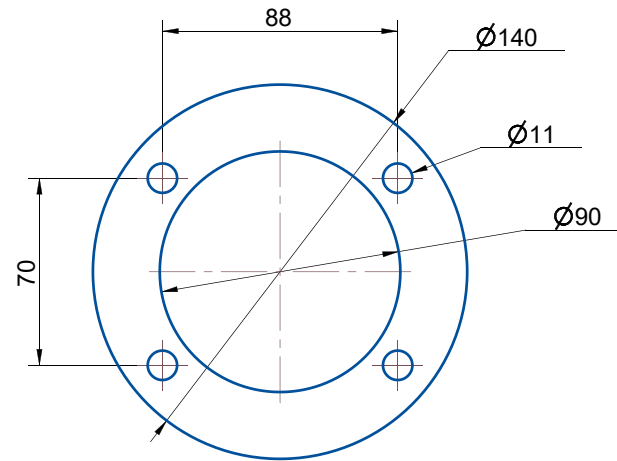
1

SCALE 1:10



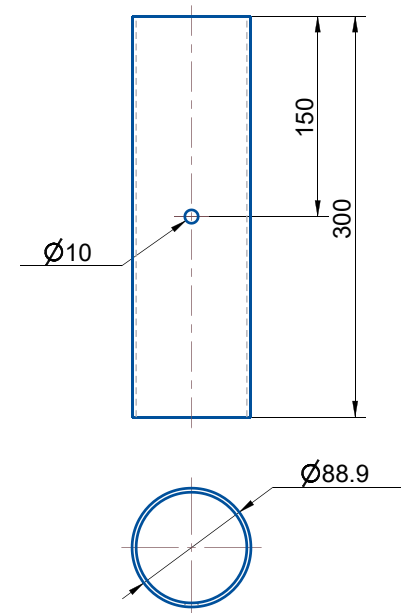
2

SCALE 1:2



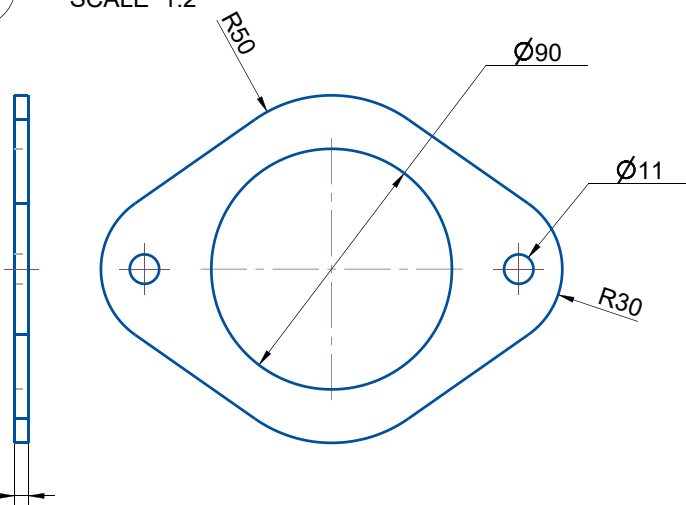
3

SCALE 1:4



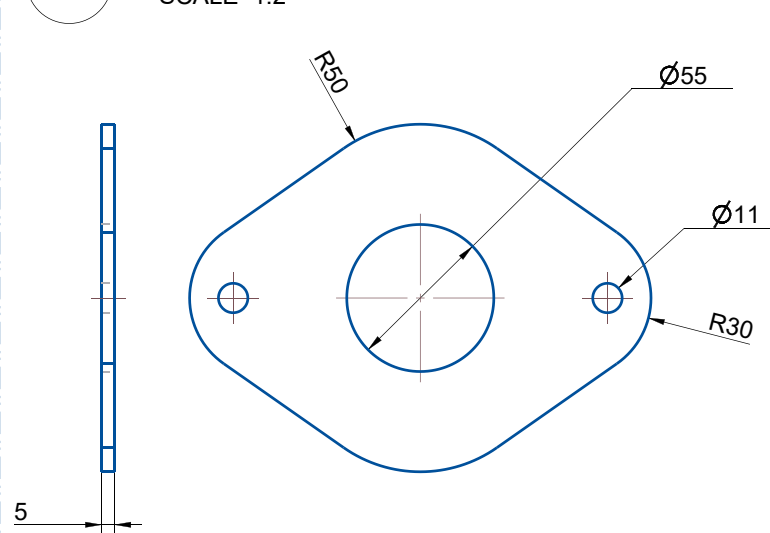
4

SCALE 1:2



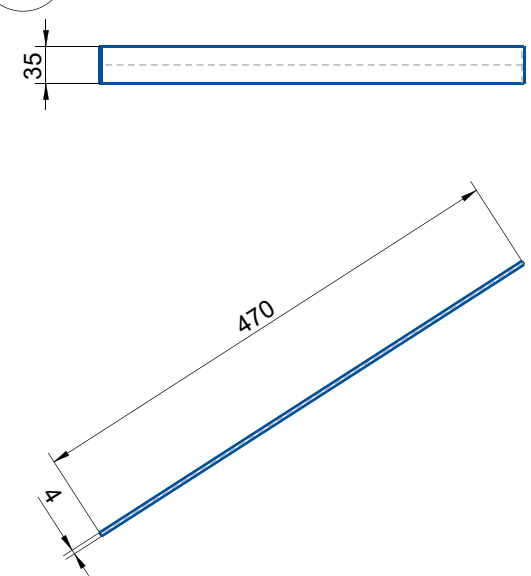
5

SCALE 1:2

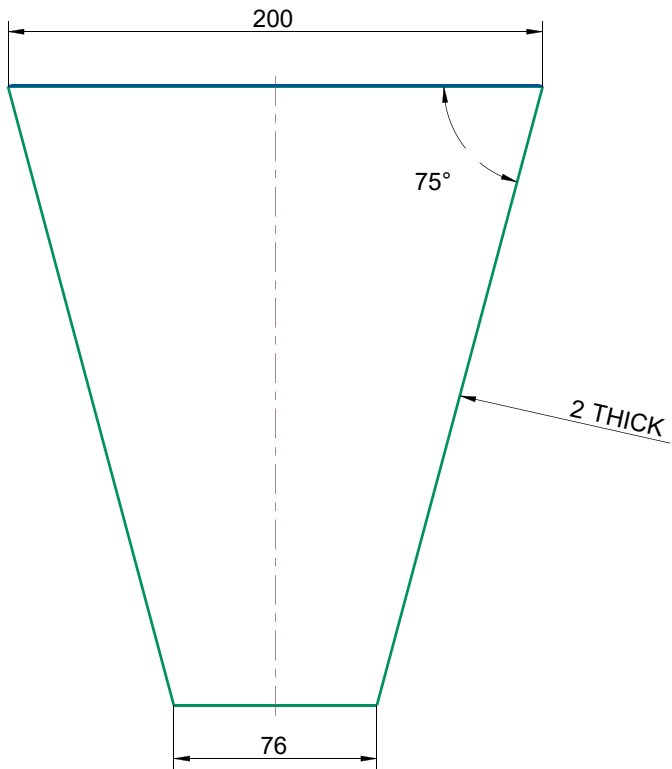


9

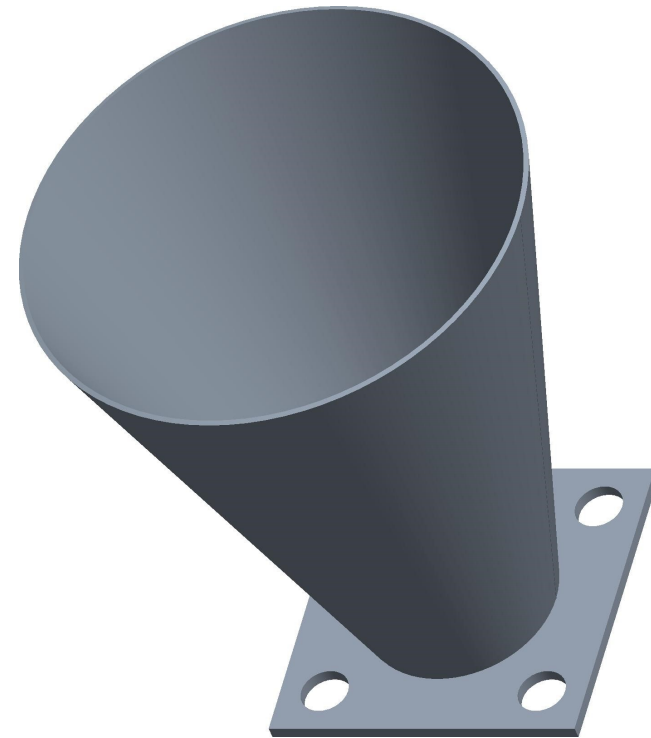
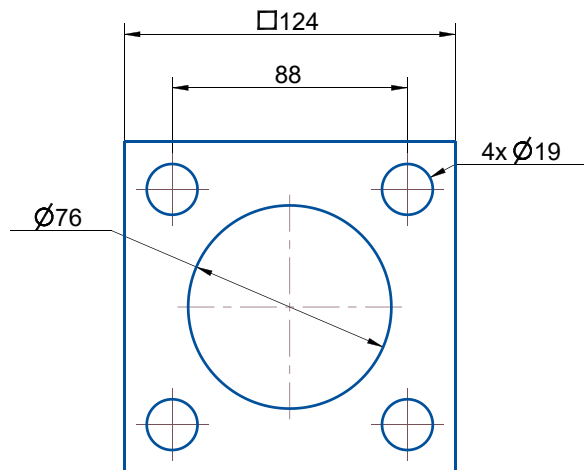
SCALE 1:5



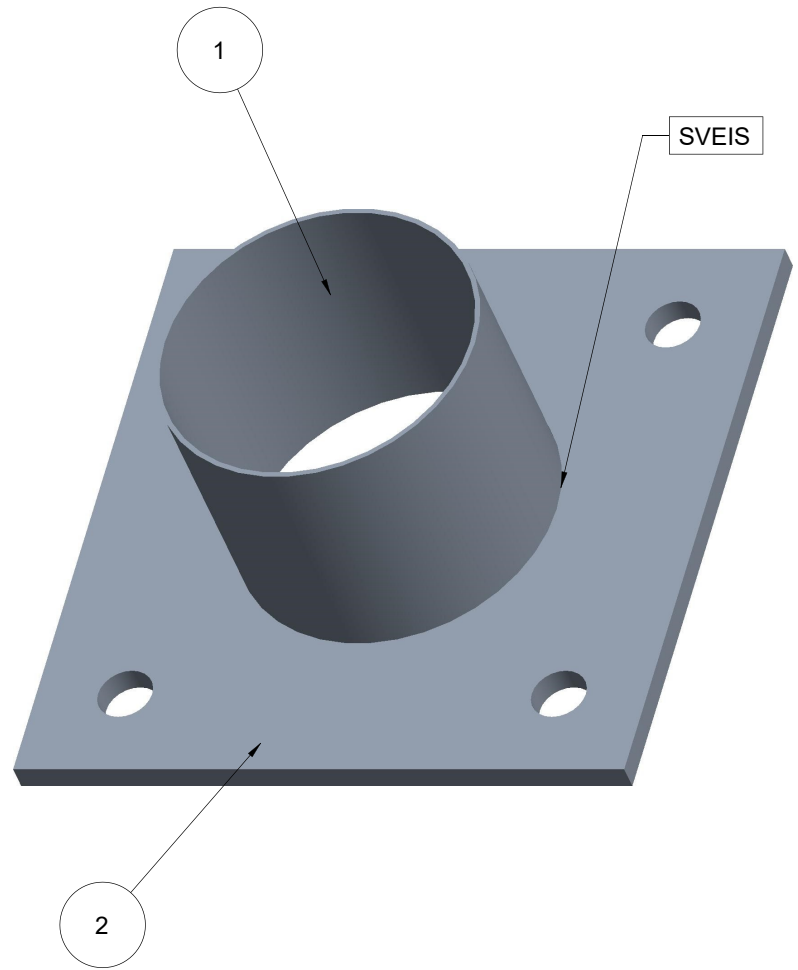
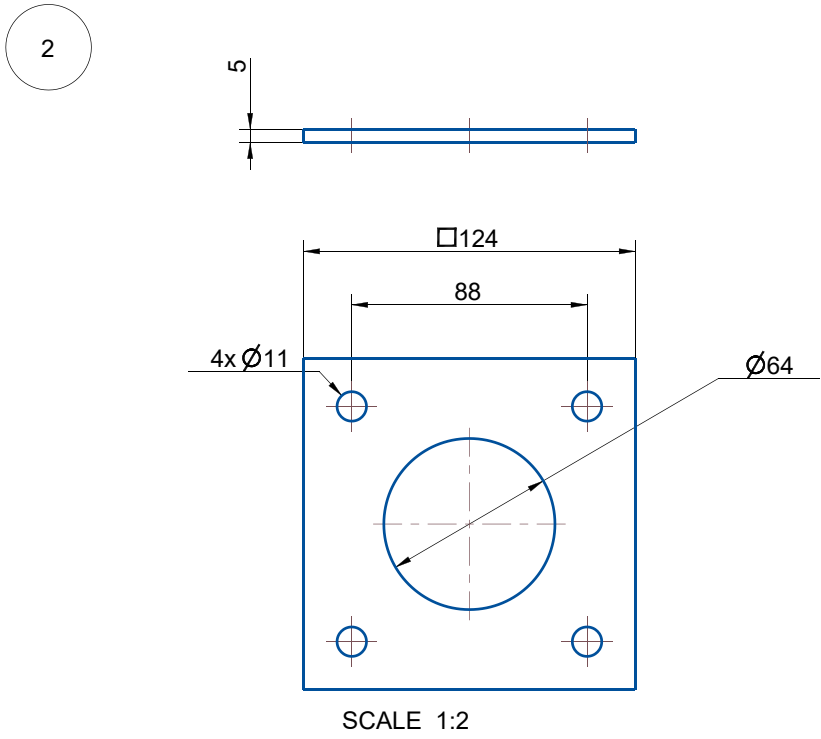
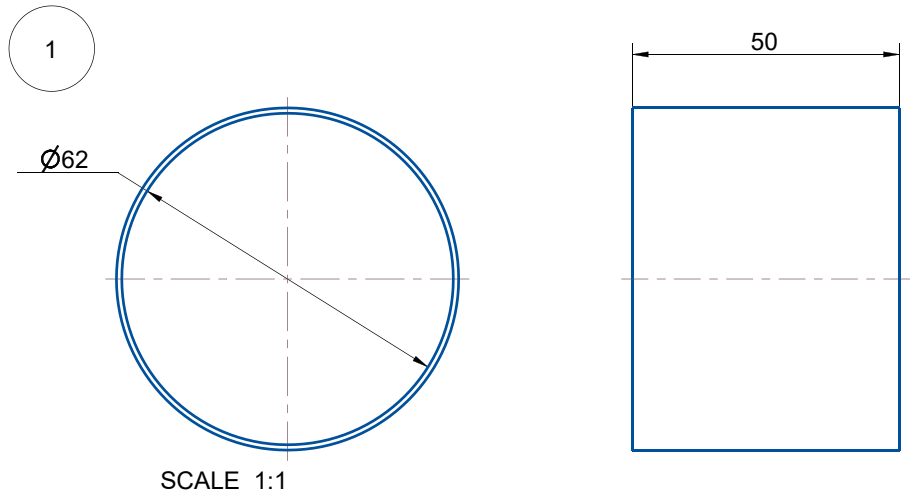
1



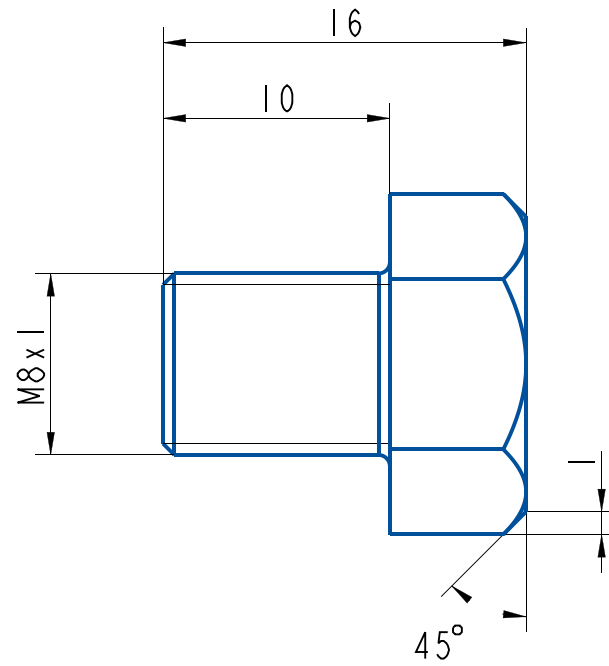
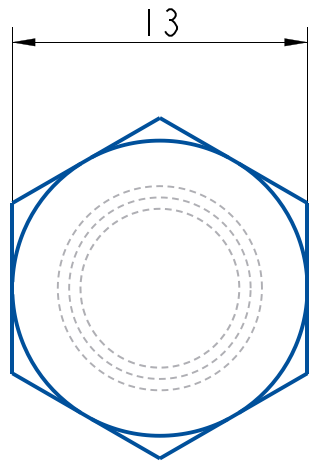
2



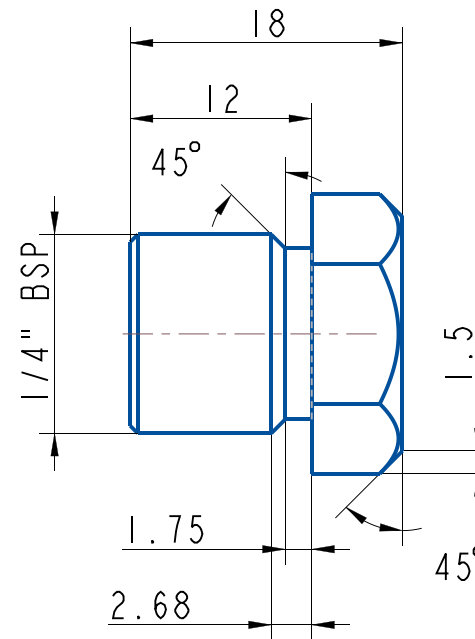
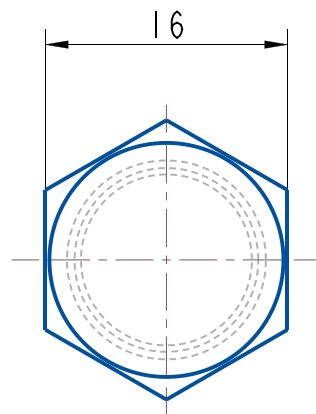
2	1		FLENS	316	5mm
1	1		KJEGLE	316	2mm
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format
	Henriette			1:1	A3
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell	Dato	Blad.nr
			Beskrivelse		10-April-19
			OVERGANG	Tegning	2.2



2	1		FLENS	316	5mm
1	1		RØR	316	1mm
Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format
	Henriette			1:1	A3
Høgskulen på Vestlandet IMM			Artikkel/Modell	Dato	Blad.nr
			Beskrivelse	10-April-19	1(1)
			SLANGEFLENS	Tegning	2.3



Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format
	Rita			3:1	A4
Høgskulen på Vestlandet IMM		Artikkel/Modell			Dato
		PLUGG			08-Apr-19
		Beskrivelse			Tegning
		PLUGG 1			3.1



Pos	Ant	Artikkel/Modell	Beskrivelse	Materiale	Dimensjon
Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format
	Rita			3:1	A4
Høgskulen på Vestlandet IMM		Artikkel/Modell			Dato
		PLUGG Beskrivelse PLUGG 2			09-Apr-19 Tegning 3.2

