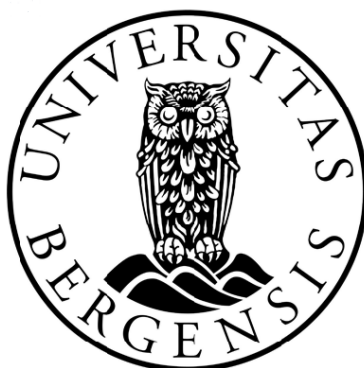


**Analyse av energi, eksergi og eksergoøkonomi for en  
stempelmotorbasert CHP-enhet kombinert med en organisk  
Rankine-syklus (ORC)**

Masteroppgave i energiteknologi

**Jørgen Knutsen**



Universitet i Bergen

Geofysisk institutt

Høgskolen i Bergen

Institutt for maskin- og marinfag

Bergen, August 2015

Veileder 1: Førsteamanuensis Norbert Lümmen (Høgskolen i Bergen)

Veileder 2: Førsteamanuensis Lars Magne Nerheim (Høgskolen i Bergen)



## Forord

Denne rapporten er skrevet som besvarelse på masteroppgaven i masterprogrammet for Energiteknologi ved Universitetet i Bergen og Høgskolen i Bergen. Masteroppgaven utgjør 30 av totalt 120 studiepoeng i masterprogrammet for Energiteknologi med spesialisering innen Termiske maskiner: Drift og vedlikehold.

Temaet for oppgaven er valgt i det øyemed å indusere mer aktivitet på undersøkelser rundt spillvarmeutnyttelse ved Høgskolen i Bergen og Universitetet i Bergen. Spillvarmeutnyttelse, el. spillvarmegjenvinning (Eng: Waste Heat Recovery), blir idag ansett som et av de viktigste, kanskje *det* viktigste, utviklingsområdet for forbedring av virkningsgraden til termiske maskiner.

I 2007 fikk HiB en CHP-enhet, en enhet som produserer både elektrisitet og varme, av Statoil. Før CHP-enheten kom i HiBs eie, stod den på Statoils oljeraffineri på Mongstad hvor den ble testet av PKS. CHP-enheten ble der testet i forbindelse med Statoils eierskap i danske EC Power, som har produsert den. Tester ble utført for måle enhetens produserte elektriske effekt, varme-effekt og virkningsgrader. Statoil benyttet også enheten til å teste en egenprodusert smøreolje.

Etter at enheten kom i HiBs eie, har det vært lite aktivitet. Enheten vil bli operert for første gang siden overtagelsen fra Statoil i sammenheng med denne oppgaven. Det har dermed medført et stort arbeid med å få enheten driftsklar igjen, og med å oppdrive og installere rett instrumenteringen. Måleresultatene som er oppnådd bærer preg av at arbeidet med å 'sette opp' enheten har vært krevende (og kanskje litt for omfattende for tiden som var tilgjengelig til dette prosjektet). Det er derfor benyttet måleresultater fra målinger utført i 2007 av PKS i sammenheng med en annen masteroppgaven til beregningene i denne oppgaven. Egne måleresultater har blitt brukt til å supplere tidligere resultater og til å bekrefte visse antagelser. Hvor egne resultater er brukt og hvor resultater fra 2007 er brukt, er presisert i oppgaven.

Ettersom dette er et førstegangsarbeid på CHP-enheten, fra HiB sin side, har jeg valgt å skrive noe utfyllende om teorien bak mine beregninger. Dette for å gjøre det enklere for påfølgende studenter å forsette arbeidet uten å måtte kaste bort tid på å tolke mine valg og metoder. Siden vi har manglet informasjon om CHP-systemet og dets nåværende sammenkobling og instrumentering, har arbeidet med oppgaven også måttet inneholde en del *reverse engineering*. Jeg har valgt å også prøve å få med så mye som mulig av denne prosessen i oppgaven. Dette gjør at

oppgaven har blitt en lang affære. Derfor foreslår jeg å lese oppgaven etter behov. Dersom én er nysgjerrig på utførelsen av målinger og beregninger, foreslår jeg at leseren hopper over Kapittel 2. Dersom én er interessert i teorien bak beregningsmetodene og valgene som er gjort, foreslår jeg at leseren også leser Kapittel 2. For å få en oversikt over hele arbeidet som er gjort i sammenheng med denne oppgaven foreslår jeg at leseren leser hele oppgaven.

Bergen, 17-08-2015

Jørgen Knutsen



## **Annerkjennelse**

Takk til Trond Aas, Harald Moen, Frode Kvinge og Ørjan Høyvik for arbeidet som er gjort med å 'sette opp' og kjøre CHP-enheten. Takk til Norbert Lümme og Lars Magne Nerheim for veiledning av oppgaven. Og takk til mine medstudenter for samholdet vi har hatt og støtten vi har gitt hverandre i arbeidet med våre masteroppgaver.

J.K.



## Oppsummering

Spillvarmeutnyttelse er et prinsipp som er stadig mer aktuelt i reduksjon av forbruk og utslipp fra termiske maskiner. Spillvarmeutnyttelse kan i hovedsak utføres på to måter: kombinert kraft og varmeproduksjon (CHP), hvor varme fra kraftproduksjon samles og brukes til romoppvarming eller oppvarming av vann, eller *Waste Heat Recovery* (WHR), hvor spillvarme fra en prosess konverteres til kraft gjennom en varmekraftmaskin. Mikro-CHP brukes i private husstander og forretningsbygg. Tendensen i husstander er at varmebehovet går ned og elektrisitetsbehovet går opp. Ved å kombinere CHP og WHR kan det mulig produseres mer elektrisitet ved å konvertere varmen fra en CHP-enhet med en WHR-enhet.

I denne oppgaven er det utført analyse av energi, eksergi og eksergoøkonomi for en eksisterende CHP-enhet tilkoblet en tenkt ORC-krets. CHP-enhetens kraftprodusent, en stempelmotor, ble simulert med en iterativ beregningsmodell basert på modeller fra reell prosessanalyse. Videre ble analyse av energi, eksergi og eksergoøkonomi for CHP-enheten, CHP-enhetens komponenter og ORC-kretsen utført med regnearkmodeller. Beregningene ble utført på basis av tidligere målinger og egne målinger av CHP-enhetens ytelse. Applikasjon av ORC ble undersøkt i to konfigurasjoner: 1) tilkoblet kjølevannsrør etter utgang av CHP-enheten og 2) tilkoblet eksos i stedet for eksosgassvarmeveksleren som er der i dag.

Fra energianalysen kom det blant annet frem at CHP-enheten ved full effekt produserer 13,27 kW elektrisk effekt og 25,29 kW varme, tilsvarende en elektrisk virkningsgrad på 29 %, en varmevirkningsgrad på 55 % og en total virkningsgrad på 84 %.

Av eksergianalysen kom det frem at av CHP-enhetens viktigste indre komponenter er eksergiødelegelsen størst i stempelmotoren. Eksergivirkningsgraden var også nest dårligst for stempelmotoren (63 %) etter CHP-enheten som en helhet (45 %).

Av den eksergoøkonomiske analysen kom det frem at elektrisitet og varme produseres med en lavere eksergispesifikk kostnad dersom en ORC-enhet tilkobles CHP-enheten, 6,16 mot 6,01 kr/kWh.

For videre arbeid anbefales det på kort sikt å ferdigstille måleoppsettet til et mer tilfredsstillende nivå og å utforske muligheter for utbedring av de termodynamiske modellen som er dannet for denne oppgaven. På lang sikt anbefales det blant annet å forsøke å bygge en ORC-krets som kan tilkobles enheten.



## Summary

Waste heat recovery is a concept that is relevant for reducing consumption and emissions from thermal machinery. Waste heat recovery can be performed in two ways: by Combined Heat and Power production (CHP) or Waste Heat Recovery (WHR) where excess heat is converted to power through a heat engine. Micro-CHP can be used in residential and office buildings. The tendencies in residential buildings is that the demand for electricity is increasing while the demand for heat is decreasing. By combining a CHP-unit and a WHR-unit, it should be possible to increase the electrical output from the CHP-unit by using its produced heat.

In this thesis, energy, exergy and exergoeconomic analysis has been performed for an existing CHP-unit with an imagined WHR-unit attached. The power-producer in the CHP-unit, a piston engine, was simulated using an iterative model based on empirical relations from real-process analysis. Analysis of energy, exergy and exergoeconomics was performed on the CHP-unit, the unit's components and the ORC was performed using spreadsheet models. The models were based on measurements from 2007 and measurements performed by the author in 2015. Two configurations of the ORC were analysed: 1) connected to the piston engine's exhaust, and 2) connected to the CHP-unit's cooling water.

The energy analysis showed that the engine at full effect produces 13,27 kW electricity and 25,29 kW heat with 29 % and 55 % efficiencies respectively. The total efficiency is 84 %.

The exergy analysis showed that of the internal components of the CHP-unit the piston engine has the highest rate of exergy destruction. It also has one of the lowest exergy efficiencies, only after the CHP-unit in total (63 % and 45 %).

The exergoeconomic analysis showed that the system with an ORC attached produced an exergy in the form of electricity and hot water at a lower exergy specific price than the system without an ORC.

For future work it is recommended that the work with completing the CHP-unit and its instrumentation is continued and that the thermodynamic models that were created for this thesis are further refined. It is also recommended that building the ORC be attempted.



# Innhold

|  |           |
|--|-----------|
| Forord . . . . .   | i         |
| Annerkjennelser . . . . .  | iv        |
| Oppsummering . . . . .   | vi        |
| <b>1 Introduksjon</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Bakgrunn . . . . .   | 4         |
| 1.2 Problemformulering . . . . .                                 | 7         |
| 1.3 Objektiver . . . . .   | 8         |
| 1.4 Litteraturgjennomgang . . . . .                              | 9         |
| 1.4.1 Modelling av CHP-system . . . . .                          | 9         |
| 1.4.2 Design av ORC-system . . . . .                             | 10        |
| 1.4.3 Eksergoøkonomisk analyse av kogenereringsenheter . . . . . | 11        |
| 1.5 Begrensninger . . . . .                                      | 12        |
| 1.6 Tilnærming til problemet . . . . .                           | 12        |
| 1.7 Rapportens struktur . . . . .                                | 13        |
| <b>2 Teori</b>   | <b>14</b> |
| 2.1 Spillvarmeutnyttelse . . . . .                               | 14        |
| 2.2 Kogenerering (CHP) . . . . .                                 | 15        |
| 2.2.1 Stempelmotor som konverteringsteknologi . . . . .          | 16        |
| 2.2.2 EC Power XRGI 13 . . . . .                                 | 21        |
| 2.3 Teknologi for kraftproduksjon fra spillvarme . . . . .       | 24        |
| 2.3.1 Termoelektrisk generator (TEG) . . . . .                   | 25        |
| 2.3.2 Stirlingmotor . . . . .                                    | 26        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.3.3    | Phase Change Material (PCM)                | 27        |
| 2.3.4    | Organiske dampkretser (ORC)                | 28        |
| 2.3.5    | Design av ORC-krets                        | 30        |
| 2.4      | Energianalyse                              | 36        |
| 2.4.1    | Modellering av stempelmotorer              | 43        |
| 2.4.2    | Modellering av Katalysator                 | 50        |
| 2.4.3    | Energianalyse av ORC-krets                 | 52        |
| 2.5      | Eksergianalyse                             | 54        |
| 2.5.1    | Andre lovs analyse                         | 55        |
| 2.5.2    | Omgivelser                                 | 57        |
| 2.5.3    | Reversibelt arbeid og irreversibiliteter   | 58        |
| 2.5.4    | Eksergibalanse                             | 59        |
| 2.5.5    | Fysisk eksergi                             | 60        |
| 2.5.6    | Kjemisk eksergi                            | 61        |
| 2.6      | Økonomisk analyse                          | 62        |
| 2.6.1    | Estimering av totale investeringskostnader | 63        |
| 2.6.2    | <i>Carrying Charges</i>                    | 65        |
| 2.6.3    | Inflasjon, eskalering og annuitet          | 65        |
| 2.7      | Eksergoøkonomisk analyse                   | 67        |
| <b>3</b> | <b>Metode</b>                              | <b>70</b> |
| 3.1      | CHP-anleggets utforming                    | 70        |
| 3.2      | Energi- og eksergianalyse                  | 74        |
| 3.2.1    | Energibalanse for CHP-enheten              | 76        |
| 3.2.2    | Modellering av stempelmotor                | 81        |
| 3.2.3    | Energibalanse for stempel motoren          | 88        |
| 3.2.4    | Modellering av ORC-krets                   | 89        |
| 3.2.5    | Eksergibalanse for CHP-enheten             | 92        |
| 3.2.6    | Eksergibalanse for indre komponenter       | 93        |
| 3.3      | Økonomisk analyse                          | 93        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3.1    | Estimering av investeringskostnader . . . . .           | 94         |
| 3.3.2    | Estimering av drift- og vedlikeholdskostnader . . . . . | 94         |
| 3.3.3    | Beregning av annuiteter . . . . .                       | 94         |
| 3.4      | Eksergoøkonomisk analyse . . . . .                      | 98         |
| <b>4</b> | <b>Resultater</b>                                       | <b>100</b> |
| 4.1      | Måleresultater . . . . .                                | 100        |
| 4.2      | Energianalyse . . . . .                                 | 101        |
| 4.3      | Eksergianalyse . . . . .                                | 106        |
| 4.4      | Eksergoøkonomisk analyse . . . . .                      | 109        |
| <b>5</b> | <b>Diskusjon</b>  | <b>111</b> |
| <b>6</b> | <b>Oppsummering</b>                                     | <b>115</b> |
| 6.1      | Konklusjon . . . . .                                    | 115        |
| 6.2      | Anbefalinger for fremtidig arbeid . . . . .             | 116        |
|          | <b>Bibliografi</b>                                      | <b>117</b> |
| <b>A</b> | <b>CHP XRGI 13G - Spesifikasjoner</b>                   | <b>134</b> |
| <b>B</b> | <b>Toyota 3Y - Spesifikasjoner</b>                      | <b>136</b> |
| <b>C</b> | <b>Input og output loggeprogram</b>                     | <b>138</b> |
| <b>D</b> | <b>Termodynamisk data</b>                               | <b>140</b> |
| <b>E</b> | <b>Krieger og Bormans Polynommetode</b>                 | <b>142</b> |
| <b>F</b> | <b>Gassammensetning</b>                                 | <b>145</b> |
| <b>G</b> | <b>Måleresultater 10.07.2015</b>                        | <b>147</b> |
| <b>H</b> | <b>Måleresultater 21.03.2007</b>                        | <b>149</b> |
| <b>I</b> | <b>Omgivelser 21.03.2007</b>                            | <b>166</b> |

**J VBA-kode stempelmotormodell**

# Kapittel 1

## Introduksjon

Energi er, og har alltid vært, et viktig grunnlag for vekst og utvikling. Energi fra forbrenning har man utnyttet til oppvarming og kraft helt siden mennesket temmet ilden. Brennstoffet har med tiden utviklet seg fra ved til mer energiintense brennstoff som gass, kull og olje. Disse har vist seg å være uvurderlige for produksjon av kraft og varme og som primær drivkraft i transportmidler. En stadig økende verdensbefolkning samt stadig økende levestandard i høyt befolkede utviklingsland gjør at verdenssamfunnet blir mer og mer avhengige av ikke-fornybare, karbonbaserte brennstoff til kraft- og varmeproduksjon. Fra 1971 til 2012 ble verdens totale forbruk av primærenergi mer en doblet. Selv om det var en økning i forsyning fra ikke-fossile energikilder, var det lite forandring i andelen fossile brennstoff i den samme perioden (fra 86 % i 1971 til 82 % i 2012 [1]). Den store ulempen med bruk av fossile brennstoff er at effektiv forbrenning av disse karakteriseres av eksosgassutslipp med store andeler karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ). Fra 1870, tiden like etter den industrielle revolusjon, til i dag har  $\text{CO}_2$ -utslipp fra brennstoff økt eksponentielt. I 2012 ble  $\text{CO}_2$ -utslipp fra forbrenning av drivstoff anslått til å være 32 gigatonn [1].  $\text{CO}_2$ -utslipp fra forbrenning av fossilt brennstoff er fastslått å være et sterkt bidrag til drivhuseffekten. Høyere andel  $\text{CO}_2$  i atmosfæren fører til økt drivhuseffekt, og dermed høyere gjennomsnittstemperaturer på jorden. I følge IPCC's Fifth Assessment Report fra 2013 er menneskets innflytelse på klimasystemet klar [2]. Med tanke på verdenssamfunnets energiavhengighet og dets fortsatte avhengighet av fossile brennstoff til energiproduksjon er det ønskelig å skape forbrenningsmaskiner og -systemer med lave spesifikke forbruk.

Spillvarmeutnyttelse er et miljøbesparende prinsipp, som innen kraftproduksjon gir lave spesifikke forbruk og gode termiske virkningsgrader. Spillvarmeutnyttelse innen kraftproduksjon handler om å utnytte overskuddsvarme enten til videre kraftproduksjon eller til oppvarming. Enheter for kombinert kraft- og varmeproduksjon (CHP) er et eksempel på spillvarmeutnyttelse hvor overskuddsvarmen fra kraftproduksjonen går til romoppvarming eller til oppvarming av varmtvann. Den kombinerte produksjonen av både kraft og varme kan resultere i totale virkningsgrader over 90 %. Prinsippet lar seg utføre i både større og mindre anlegg. Mindre kogenereringsenheter kalles mikro-kogenereringsenheter. Dette er enheter som brukes i skolebygg, borettslag, osv. Utviklingen av mikro-kogenerering har vært en utvikling mot desentralisering og ekstrem effektivitet innen energiproduksjon. Av EU defineres mikro-kogenereringsenheter som: "...en kogenereringsenhet med en maksimum kapasitet under 50 kW<sub>el</sub>" [3]. En slik enhet kan baseres på flere termiske maskiner: stempelmotorer, sterlingmotorer, brenselceller, osv. Elektrisiteten fra CHP-enheten kan brukes i bygg eller eksporteres til nett.

Kraftproduksjon med varmekraftmaskiner med overskuddsvarme fra en annen prosess som drivstoff er et annet eksempel på spillvarmeutnyttelse. Slike varmekraftmaskiner kan være bl.a. dampkraftmaskiner (ORC), sterlingmotorer eller termoelektriske generatorer (TEG). Bruken av slike varmekraftmaskiner har blitt mer og mer utbredt ettersom teknologien har blitt mer moden og investeringskostnadene har gått ned. Tidligere var denne typen spillvarmeutnyttelse forbeholdt anlegg hvor spillvarmemengden var stor og ved høy temperatur, men de siste årene har teknologien også vært å finne i anlegg med mindre varmemengder og lavere temperaturer [4]. Utnyttelse av spillevarme ved relativt lave temperaturer (< 140°C) kalles lavtemperatur spillvarmeutnyttelse [4]. Denne typen spillvarmeutnyttelse har i de senere årene vært å finne i motorindustrien, både på skipsmotorer og på bilmotorer [5] [6].

I de ovennevnte CHP-enhetene brukes gjerne mindre stempelmotorer, av typen som vi finner i biler, som kraftprodusent. Det kunne tenkes at disse enhetenes elektriske virkningsgrad kunne utbedres med en påhengt varmekraftmaskin. En slik utbedring kunne være ønskelig i applikasjoner hvor varmebehovet er beskjedent, mens elektrisitetsbehovet er stort. Slike applikasjoner kan være kontorlokaler, produksjonslokaler, passivhus, e.l. For at et slik inngrep skal kunne utføres, må det undersøkes om det er teknisk utførbart og lønnsomt. Ut i fra det man har sett av utviklingen i bilindustrien, så kan man fastslå at applikasjonen av en varmekraft-



maskin for spillvarmeutnyttelse på bilmotorer i alle fall er teknisk mulig. Undersøkelser om en slik applikasjon er lønnsom, må utføres spesifikt for hvert anlegg. En velutviklet analysemetode for å undersøke om et termisk system er lønnsomt er *eksergoøkonomisk analyse* (også kalt termoøkonomisk analyse). Eksergoøkonomisk analyse er en kombinasjon av eksergianalyse og økonomisk analyse med den hensikt å optimere termiske design. Av Bejan et al. [7] beskrives eksergoøkonomisk analyse som "...eksergi-hjulpert kostnadsminimering".

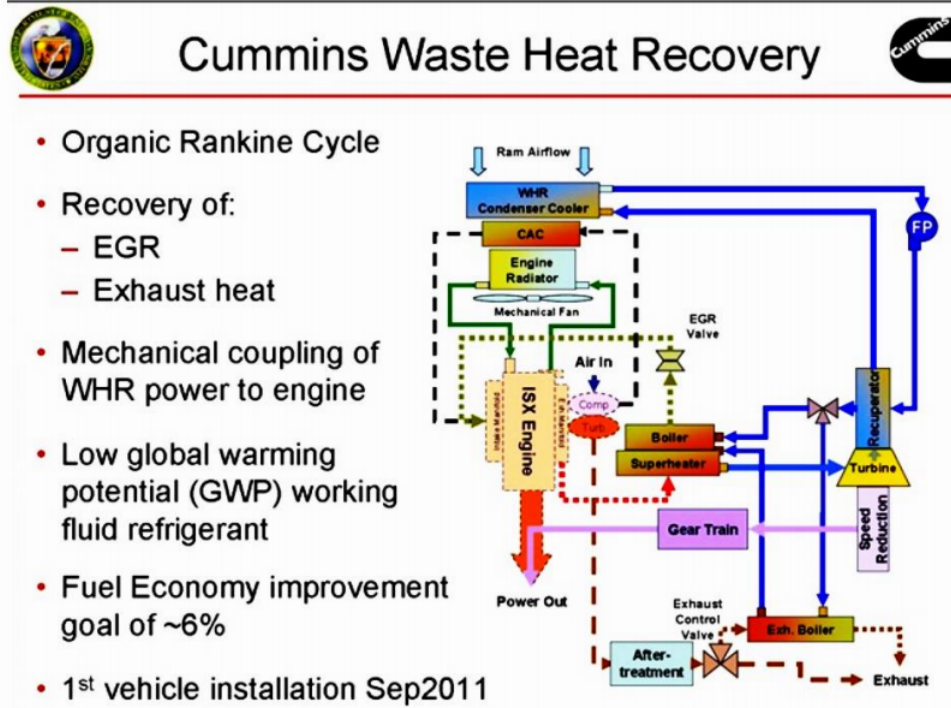
Eksergi er et mål på arbeidspotensiale brukt i termodynamikken. Eksergien i en spillvarmestrøm defineres som det maksimale arbeidet en varmekraftmaskin kan utføre når den arbeider mellom spillvarmekilden ved absoluttemperatur  $T_H$  og omgivelsene ved absoluttemperatur  $T_O$ . Netto mekanisk- (trukket fra eventuelt omgivelsesarbeid) og elektrisk arbeid er definert som hundre prosent eksergi. Eksergianalyse brukes til å fastslå ineffektiviteter (dvs. eksergiødeleggelse og eksergitap) i systemet. For å kunne optimere systemet ønsker man å vite hva disse ineffektivitetene koster. Dette kan bestemmes ved økonomisk analyse på bakgrunn av den utførte eksergianalysen. Eksergoøkonomisk analyse er spesielt anvendelig på systemer med mer enn ett produkt. En CHP-enhet produseres som nevnt både elektrisk kraft og varme. I et slik system ønskes det å vite kostnadene tilhørende generering av hvert produkt, spesielt i et system hvor et produkt brukes til å danne et annet produkt (f.eks. i tilfellet av CHP-enhet med påhengt varmekraftmaskin for spillvarmeutnyttelse hvor spillvarme brukes til å produsere mer elektrisk kraft). Følgelig er formålet til en eksergoøkonomisk analyse enten å (a) kalkulere separate kostnader for hvert produkt i et system som har mer enn ett produkt, (b) forstå kostnaddannelsesprosessen og kostnadsflyten i systemet, (c) optimere spesifikke variabler i en enkel systemkomponent eller (d) optimere det samlede systemet [7].

I denne oppgaven ønskes det å optimere det samlede systemet med en påhengt ORC-krets. Om ORC-kretsen bidrar til en lavere eksergikostnad for enheten kan undersøkes ved at de eksergispesifikke kostnadene av kraft og varme sammenlignes for et scenario uten og et scenario med ORC-basert spillvarmeutnyttelse.

## 1.1 Bakgrunn

Forbrenningsmotoren er som nevnt en kraftprodusent som man stadig er avhengige av både i industriland og utviklingsland. I tillegg til å være en viktig kraftprodusent er også forbrenningsmotoren en kilde til eksosgassutslipp som er med på å øke drivhuseffekten. Det stilles derfor strengere og strengere krav til motoren. Disse kravene er drivere for utviklingen av mer og mer effektive motorer. De europeiske utslippskravene, Euro 1-6 for passasjerbiler og varebiler og Euro I-VI for lastebiler, har stilt krav til utslipp av karbonmonoksid (CO), hydrokarboner (HC), nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) og partikler (PM) siden Euro 1 og Euro I ble innført (01/1992). I Euro 6 (09/2014) er utslippsgrensene: 1,0 g/km CO, 0,1 g/km THC, 68 mg/km NMHC, 60 mg/km NO<sub>x</sub> og 4,5 mg/km PM for bensindrevne kjøretøy og 0,5 g/km CO, 0,17 g/km HC+NO<sub>x</sub> 80 mg/km NO<sub>x</sub> og 4,5 mg/km PM [8]. Det stilles også krav til at alle biler skal merkes med drivstofforbruk og spesifikke utslipp av CO<sub>2</sub> i g/km [9]. Følgelig er motorene som er i produksjon i dag mye mer effektive enn hva som ble produsert for 10-20 år siden. Den siste trenden innen effektivisering av forbrenningsmotoren, og andre termiske maskiner, er bruken av WHR-enheter. WHR-enheter kan brukes på både store og små motorer. De utnytter spillvarme, som alltid vil være tilstede i en varmekraftmaskin, og bruker denne til å produsere mer kraft. WHR-trenden har blant annet vært synlig i SuperTruck-initiativet fra den Amerikanske regjeringen. Som en del av initiativet har det lyktes Cummins å lage et motorsystem (se Figur 1.1) som øker den termiske virkningsgraden til en lastebilmotor med 10 %, fra 40 til 50 %. Neste mål er hele 55 % termisk virkningsgrad [5]. Bosch har også laget et system for spillvarmeutnyttelse for større nyttekjøretøy. Systemet er basert på en dampkrets med etanol som arbeidsfluid og skal kunne gi en drivstoffbesparelse på 5 % ved langtransport [10].

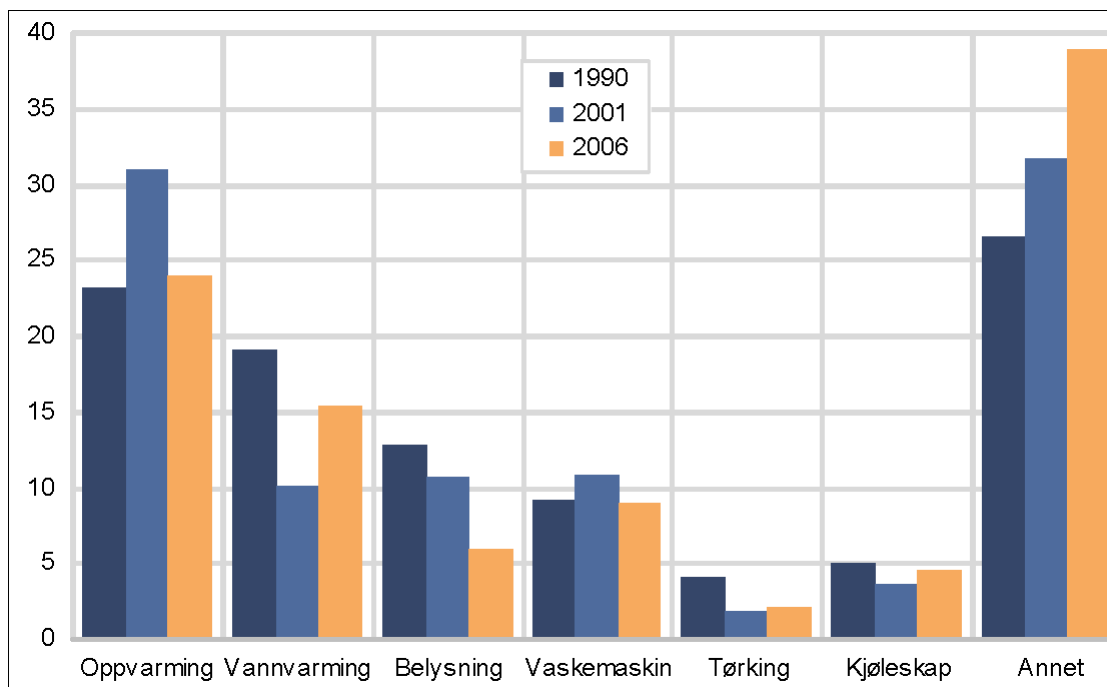
Høgskolen i Bergen har i sitt eierskap en CHP-enhet fra danske EC Power. CHP-enheten er en gassdrevet elektrisitet- og varmeproduserende enhet fra EC Power, av typen XRGI 13. Dette er en utdatert modell i EC Powers katalog. De nåværende modellene er XRGI 6, XRGI 9, XRGI 15 og XRGI 20. Av disse er det XRGI 15 som er mest nærliggende XRGI 13-enheten. XRGI 13 kan, i følge leverandør, levere opptil 13 kW elektrisitet ved 400 V og 29 kW varme, med total utnyttelsesgrad opp mot 95% ved elektriske laster over 10 kW (se Vedlegg A)[11]. Sentralt i CHP-enheten står en gassdrevet, naturlig aspirert Toyota 3Y stempelmotor. Denne har i følge teknisk datablad en ter-



Figur 1.1: Cummins system for spillvarmeutnyttelse på truckmotor [5]

misk virkningsgrad rett i overkant av 30 %. En økning i virkningsgrad i samme størrelsesorden som for motoren i Cummins' SuperTruck ville gi et merkbart løft i produsert kraft for enheten, samtidig som mengden spillvarmen ville blitt redusert. I sin nåværende tilstand leverer enhetene ca 28 % elektrisitet og 62 % varme med 10 % tap.

I følge EC Powers egne nettsider kan en XRGI-enhet levere kraft og varme til en hvilken som helst bygning med et årlig energibehov mellom 30.000 kWh og 2.000.000 kWh. Dette gjelder alt fra leilighetskomplekser til kontorbygg til skolebygg til sykehus og sykehjem. Norges bygningsmasse bruker i dag store mengder elektrisitet, bl.a. til romoppvarming. Norge var i 2012 på verdenstoppen i bruk av elektrisk energi i husholdningen, bare etter Kuwait [12]. Statistikk fra SSB viser at i 2012 besto norske husholdningers energiforsyning av 79,3 % elektrisitet, 15,8 % ved, kull og koks, 3,5 % olje og parafin og 1,4 % gass og fjernvarme [13]. En undersøkelse av formålsfordelingen av husholdningenes elektrisitetsforbruk fra 2006 viste at 20 % av elektrisitetsforbruket gikk til romoppvarming og 16 % gikk til vannvarming [14]. Resten av elektrisiteten gikk til belysning hvitevarer og brunevarer. Tendensen de senere år har vært at husholdningens samlede energiforbruk har gått ned, samtidig som bruken av energi til "luksusvarer" som TV, stereo, PC,



Figur 1.2: Formålsfordeling av husholdningens elektrisitetsforbruk i 1990, 2001 og 2006 (temperaturkorrigert) [14]

osv. har gått opp. Nedgangen i energibruk i eksisterende bygg skyldes høye strømpriser, større andel varmepumper og mildere klima [12]. Nedgang av energibruk i nybygg skyldes stadig strengere byggekrav (TEK 10 tok over for TEK 07 fra 1. juli 2010 og TEK 17 er allerede på vei) og større andel leiligheter. En undersøkelse fra 2006 viste at elektrisitetsforbruk til romoppvarming og vannvarming har variert foregående år. Samtidig har forbruket til "annet" økt jevnt (se Figur 1.2)[14].

I tjenesteytende virksomheter er bildet noe det samme. Fordelingen av energiprodukter forbrukt i tjenesteytende virksomheter i 2011 var 77,3 % elektrisitet, 18,1 % fjernvarme, 2,7 % fyringsolje, 1,2 % naturgass og 0,6 % biobrensel viser en undersøkelse fra 2013 [15]. Tjenesteytende virksomheter er definert som kontorbygg, skoler, kulturbygg, sykehus, sykehjem osv. Samme undersøkelse viser at 44 % av bygningsmassen for tjenesteytende virksomheter har systemer for vannbåren varme, ypperlig for tilkobling av en CHP-enhet som XRGI-13. I forslaget til TEK 15 (nå omtalt som TEK 17) antydes det en kraftig reduksjon i det spesifikke energiforbruket til nybygg. Spesielt kontorbygg vil oppleve en kraftig reduksjon i tillat energiforbruk. Energiforbruk skal kuttes ved større krav til isolasjon, solskjerming og varmegjennvinning i ventilasjonsanlegg

[16]. Følgelig vil varmebehovet gå kraftig ned, samtidig som behovet for elektrisitet-forbrukende teknologi som datamaskiner, skjermer o.l. vil være det samme.

Ved implementering av en kraft-varme CHP-enhet vil det da være ønskelig å forskyve forholdet mellom produsert elektrisitet og varme mot en høyere andel elektrisitet. Som suksessen med SuperTruck initiativet har vist, så er det mulig å betydelig øke virkningsgraden for kraftproduksjon ved bruk av påhengte WHR-enheter. Når det behovet og den tekniske gjennomførbarheten er identifisert følger alltid spørsmålet om økonomisk gunstighet. Det er verdt å merke seg at Toyota 3Y motoren, som står i CHP-enheten, er en 2 liters rekkefirer sammenlignet med Cummins ISX som er en 14,9 liters rekkesekser. Det fysiske størrelsesforholdet gjenspeiles også i forholdet mellom de to forbrenningsmotorene tilgjengelige spillvarme. For å undersøke økonomisk gunstighet, må en eventuell økning i virkningsgrad prissettes. Dette kan gjennomføres ved exergoøkonomisk analyse.

## 1.2 Problemformulering

Kombinert kraft- og varmeproduksjon er en effektiv metode for energikonvertering som er anvendelig i flere bygningstyper. Dessverre er ikke kraft og varme like anvendelige produkter. I CHP-enheten XRGI 13 konverteres tilført kjemisk energi til ca 28 % elektrisk kraft og 62 % varme med 10 % tap. I EC Powers nyere, tilsvarende enhet XRGI 15 konverteres tilført energi til ca 30 % elektrisk kraft og 62 % varme med 8 % tap. I et samfunn hvor kravet til energieffektivitet går opp er slike desentraliserte enheter ypperlige for å hindre tap i store kraftproduksjonsanlegg, om ikke i Norge så iallefall i andre europeiske land. I Norge ser vi at energibruken går ned, da spesielt energibruken til oppvarming. Med denne reduksjonen i oppvarmingsbehov vil CHP-enhetens fordeling, med ca én tredel elektrisitet produsert og to tredeler varme, være skeivt fordelt i forhold til behov. En forskyvning i produksjonen av kraft og varme kan utføres ved bruk av en varmekraftmaskin for spillvarmeutnyttelse. Bruken av slike varmekraftmaskiner har lenge vært utbredt i store industrianlegg, og er nå også å finne på mindre enheter som truckmotorer som Cummins organiske dampkrets [5] og Boschs etanol-baserte dampkrets [10]. Applikasjon av en dampkrets i CHP-enheten vil bidra til høyere elektrisitetsproduksjon på bekostning av levert varme.

Undersøkelser rundt applikasjon av en enhet for spillvarmeutnyttelse kan evalueres fra et rent teknisk ståsted, men ettersom det ofte er lønnsomheten som bestemmer om en slik enhet skal implementeres, er det også interessant å evaluere fra et økonomisk ståsted. Økonomien til et termisk system er knyttet til systemets tekniske utførelse. I et system med store ineffektiviteter vil kostnadene per produsert vare være store, det sies da gjerne at kostnadsformasjonen er stor. I effektive, godt teknisk utførte systemer vil kostnadsformasjonene være små, og den spesifikke kostnaden per vare vil dermed være lav. En analysemetode som kobler teknisk utførelse og økonomi er eksergoøkonomisk metode. Ved denne metoden bestemmes systemets kostnadsformasjon og den spesifikke kostnaden til systemets produkter basert på energi- og eksergianalyse av systemet. Følgelig må det utføres energi- og eksergianalyse av CHP-enheten og av enheten for spillvarmeutnyttelse før det til slutt kan utføres en eksergoøkonomisk analyse av systemet for å bestemme den eksergispesifikke produksjonskostnaden av elektrisitet og varme.

### 1.3 Objektiver

Det skal utføres en eksergoøkonomisk analyse av CHP-enheten for å undersøke om det er mulig å øke andelen produsert elektrisitet ved bruk av varmekraftmaskin for spillvarmeutnyttelse med akseptable kostnader. Som en del av den eksergoøkonomiske analysen må det dannes termodynamiske modeller for å bestemme energi- og eksergistrømmene i systemet. Disse modellene baseres på målinger som er utført i Statoils regi.

Punktvis er oppgavens objektiver:

1. Danne termodynamiske modeller av CHP-enheten, enhetens komponenter og dampkrets,
2. Utføre egne målinger på CHP-enheten,
3. Bestemme energiflytene i systemet,
4. Bestemme eksergiflytene i systemet,
5. Bestemme systemets økonomi, og
6. Utføre eksergoøkonomisk analyse av systemet med og uten dampkrets.

## 1.4 Litteraturgjennomgang

Eksergoøkonomisk analyse fordrer som nevnt at det også utføres en energi- og eksergikartlegging av systemet eller at det ligger en tidligere utført energi- og eksergialyse til grunn. Arbeidet i denne oppgaven er et førstearbeid, og det involverer dermed både energi- og eksergikartlegging og eksergoøkonomisk analyse. CHP-enheten som undersøkes har ikke vært testkjørt av Høgskolen i Bergen ved tidligere anledninger, og mye tyder på at den har stått stille siden 2007. Da ble den kjørt i sammenheng med en masteroppgave ved Universitetet i Stavanger. Masteroppgaven av Øystein Lindberg [17] har andre objektiver enn denne oppgaven, men noe av oppgaven har blitt brukt til kartlegging av CHP-enheten og instrumenteringen påsatt av PKS Mongstad. Måleresultater fra oppgaven til Øystein Lindberg [17] er benyttet som input til beregningsmodellene i denne oppgaven.

Det er i litteratursøket fokusert på få, men gode og nyttige referanser som bidrar til beste løsning på problemet. Den brukte litteraturen kan ordnes i tre kategorier: litteratur om modellering av CHP-systemet, litteratur om design av ORC-system og litteratur om utførelse av eksergoøkonomisk metode.

### 1.4.1 Modellering av CHP-system

Modeller for CHP-enheter er stadig viktigere for evaluering av helårlig ytelse og for optimalisering av systemets design og operasjon [18]. For å lage en nøyaktig modell av en CHP-enhet er man avhengig av en nøyaktig modell av energikonverteringsenheten; i dette tilfellet en stempelmotor. Stempelmotorens ytelse kan i noen tilfeller simuleres ved virkningsgradkurver, der disse er tilgjengelig. Ofte er ikke empiriske virkningsgradkurver tilgjengelig, men heller virkningsgrader i et normert operasjonspunkt [19]. I dette tilfellet er det mulig å danne modeller med antatt konstante virkningsgrader over et lastområde. Dette er brukt i flere CHP-analyser [20, 21, 22]. Termodynamiske modeller med grunnlag i konstante virkningsgrader er brukende der hvor CHP-enheten opererer med konstant last, men faller gjennom der hvor CHP-enheten er utsatt for varierende laster med naturlig påfølgende varierende virkningsgrader uansett valg av lastvarieringsstrategi. For å øke nøyaktigheten til beregninger med virkningsgrader for CHP-enheten har det blitt utført kurvetilpasninger med tredje og andre grads polynom [23, 24]. Ikke-

lineære kurver for elektrisk og termisk virkningsgrad er effektive, men vanskelig å bruke i programmering i forbindelse med optimalisering av CHP-system [18]. Null- og én-dimensjonal termodynamisk analyse av stempelmotorer er vel så anvendelig for bruk i energianalyse av CHP-systemer, og de lineære relasjonene analysen består av er også brukende til optimalisering. Termodynamiske modeller og modeller for gassutveksling er presentert av blant andre Heywood [25] og Stone [26]. Yun et al. [18] har, basert på disse, utviklet en én-sone modell for en stempelmotor for kraftproduksjon og spillvarmeutnyttelse med brukervennlig HMI programmert i FORTRAN. Lignende har Cuddihy [27] utformet en brukervennlig to-sone modell basert på MatLab.

### 1.4.2 Design av ORC-system

Undersøkelser rundt ORC kan i følge Wang et al. [28] deles i tre kategorier: ORC for utnyttelse av geotermisk energi, ORC for utnyttelse av solvarme og ORC for spillvarmeutnyttelse. Studiet av Wang et al. [28], som omhandler valg av arbeidsfluid til ORC for spillvarmeutnyttelse i motor, trekker frem flere arbeider rundt ORC til spillvarmeutnyttelse. Hung et al. [29] undersøkte ORC-virkningsgrad ved bruk av kjølemidlene benzen ( $C_6H_6$ ), ammoniakk ( $NH_3$ ), R11, R12, R134a og R113 som arbeidsfluid. Maizza and Maizza [30] har undersøkt de termodynamiske og fysiske egenskapen til 20 ukonvensjonelle arbeidsfluider til bruk i ORC med spillvarme som varmekilde. Liu et al. [31] undersøkte effekten av 10 forskjellige arbeidsfluider på den termiske- totalvarme virkningsgraden til en ORC. Wei et al. [32, 33] analyserte systemytelse og optimaliserte arbeidsbetingelser for en ORC med R245fa. Wang et al. [28] selv undersøkte ytelsen til flere kjølemiddel ved varierende driftsbetingelser betinget av en kjøretøymotor. Ytelsen til en ORC er ikke bare styrt av valg av kjølemiddel, men også blant annet valg av konfigurasjon og komponenter. Valg av konfigurasjon vil forandre driftsbetingelsene til ORC'en og vil dermed også styre valg av arbeidsfluid. Song et al. [34] utførte en termodynamisk analyse og ytelsesoptimalisering av en ORC applisert til spillvarmeutnyttelse på en marin dieselmotor. Det ble undersøkt muligheter for bruk av både eksos, kappevann og en kombinasjon av de to som varmekilde. Av kjølemiddel ble bruken av R236ea, R236fa, R600, R600a, R123, R134a og R245fa undersøkt ved fordampning ved lave temperaturer (kappevann som varmekilde). Ved fordampning ved relativt høye temperaturer (eksos som varmekilde) ble bruken av sykloheksan, benzen, toluen, nonan og dekan



undersøkt. Som synlig i referanse [34] setter valg av konfigurasjon driftsbetingelser som også påvirker valg av arbeidsfluid. Driftsbetingelsene vil også påvirke valg av komponenter. Ekspander er en meget viktig komponent i ORC. Ekspanderen fungerer på volumbasis, og dens ytelse er dermed også avhengig av valg av arbeidsfluid. Quoilin et al. [35] presenterte en metode for samtidig valg av arbeidsfluid og ekspander ved operasjonsskart. Operasjonsskartet består i dette tilfellet av operasjonsgrensene for en type ekspandermaskin ved bruk av forskjellig arbeidsfluid plottet i et diagram med kondensasjonstemperatur på  $x$ -aksen og fordampningstemperatur på  $y$ -aksen. Metoden er ytterligere beskrevet i Seksjon 2.3.5 i denne oppgaven.

### 1.4.3 Eksergoøkonomisk analyse av kogenereringsenheter

Det er flere måter å evaluere et termisk system, blant annet på bakgrunn av: oppnådd termisk virkningsgrad (energianalyse), oppnådd termisk virkningsgrad i forhold til maksimalt oppnåelig virkningsgrad (eksegianalyse) og kostnadene assosiert ved oppnådd termisk virkningsgrad (eksergoøkonomisk analyse). Eksergoøkonomisk analyse bygger på eksergianalyse, og binder sammen eksergistrømmene i systemet og deres respektive kostnader. Kostnadene assosiert med hver eksergistrøm i systemet beregnes ved kostnadsbalanser for hver komponent i systemet. For komponenter med antall utgående konstadsstrømmer større en én trengs det tilleggsrelasjoner. Det finnes forskjellige tilnærminger til å formulere tilleggsrelasjoner. Disse kan i følge Lazzaretto and Tsatsaronis [36] deles inn i to grupper:

1. *Bokføringsmetoder* (f.eks. [37, 38, 7, 39]) som har som mål å bestemme kostnadene assosiert med et systems produktstrøm, evaluere komponenter eller systemer eller iterativ optimering av et energisystem.
2. *Lagrange-baserte tilnærminger* (f.eks. [40, 41, 42, 36]) som har som mål å optimalisere systemet og å beregne marginalkostnader.

Bejan et al. [7] presenterer det fundamentale i eksergi-bokføringsmetoden, med anvendelse mot et enkelt CHP-system. Av Bejan et al. [7] presenteres også metoder for formulering av tilleggsrelasjoner for å løse kostnadsbalansene som dannes. Ved  $n$  eksergistrømmer ut av en komponent behøves det generelt  $n - 1$  relasjoner for å løse kostnadsbalansen.

Eksergo-økonomisk analyse applisert til CHP-system har blitt utført både med fokus på optimalisering og på kartlegging av systemets eksergo-økonomi. Khaljani et al. [43] har utført en analyse av energi, eksergi og eksergoøkonomi for et CHP-system basert på en gassturbin kombinert med en ORC. Av studiet kom det blant annet frem at forbrenningsrommet, dampgenerator for varmegjenvinning(*boiler*) og gassturbinen er de tre komponentene med høyest kostnadsdannelse, og dermed også de viktigste komponentene for systemets eksergo-økonomi. Den eksergiøkonomiske analysen ble utført med SPECO-metoden (beskrevet i referanse [36]). Yildirim and Gungor [44] appliserte eksergoøkonomi til et CHP-system basert på en turboladede MAN 12 V 32/40 dieselmotor. Av dette studiet kom det frem at komponenten med størst eksergiødeleggelse var dieselmotoren og komponenten med nest størst eksergiødeleggelse var ladeluftkjøleren. Her ble også SPECO-metoden brukt.

## 1.5 Begrensninger

Arbeidet som er gjort i denne oppgaven er et initierende arbeid for undersøkelser rundt spillvarmeutnyttelse med fokus på CHP-enheten som er i Høgskolen i Bergens eie. Denne CHP-enheten har ikke vært i bruk siden 2007 før målinger ble gjort i sammenheng med denne oppgaven. I tillegg til at enheten har stått stille, har det meste av dokumentasjon blitt borte i løpet av denne tiden. Det medfører at dette prosjektet har inneholdt en del arbeid med kartlegging av og oppstart av systemet. Kartlegging og oppstartssprosessen har vært tidkrevende, noe som har begrenset den teoretiske dybden i denne oppgaven. Allikevel er det forsøkt å løse den fremstilte problemstillingen med det nyeste av forskning.

## 1.6 Tilnærming til problemet

Som nevnt inkluderer arbeidet med denne oppgaven en tidkrevende kartleggingsprosess. Det vil dermed bli et naturlig fokus på bestemmelse av CHP-systemets fysiske utførelse, måleoppsettes utførelse, og systemets masse- og energistrømmer. Baserte på dette vil det utføres analyser av

eksergi og eksergoøkonomi for CHP-enheten. Det vil til sist utføres en undersøkelse av systemets ytelse ved en tenkt ORC-krets applisert til enheten. Det vil i denne sammenheng regnes nye eksergispesifikke kostnader for produksjon av elektrisk effekt og varmtvann ved eksergoøkonomisk analyse.

Beregningene baseres på 0- og 1-dimensjonale modeller av CHP-enheten og dens komponenter.

## 1.7 Rapportens struktur

Rapportens kapitler etter introduksjonen er: Kapittel 2: Spillvarmeutnyttelse, Kapittel 3: Metode, Kapittel 4: Resultater, Kapittel 5: Diskusjon og Kapittel 6: Konklusjon og videre arbeid. I Kapittel 2 presenteres noen av de viktigste prinsippene for spillvarmeutnyttelse, inkludert kogenerering og kraftproduksjon ved ORC, samt teorien bak beregningene i oppgaven. I Kapittel 3 presenteres metodene for energi-, eksergi-, økonomisk- og eksergoøkonomisk analyse. Her vil den termodynamiske analysen av CHP-enheten i sin helhet og de individuelle komponentene presenteres i to seksjoner; først energianalyse deretter eksergianalyse. Økonomisk analyse og eksergoøkonomisk analyse er utført for CHP-enheten i sin helhet, med og uten påhengt ORC krets.

# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 Spillvarmeutnyttelse

Spillvarmeutnyttelse handler om å utnytte varme som produseres, men ikke utnyttes, i en prosess. Varmen kan utnyttes i sin form til romoppvarming eller vannoppvarming, eller konverteres til arbeid med en varmekraftmaskin. Spillvarme kan være i form av forhøyet termisk energi i en massestrøm eller det kan være varme som går tapt i prosessen ved varmeovergangsprosesser som konveksjon og stråling. Av disse er det forhøyet termisk energi i en massestrøm som er mest anvendelig. Den termiske energien i en massestrøm er avhengig av fluidets strømningsraten, spesifikke varmekapasitet og temperatur. Tilgjengelig varmemengde i en massestrøm finnes ved:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p,\text{avg}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Konvertering av spillvarme til arbeid er, som all kraftproduksjon med varmekraftmaskiner, begrenset av Carnot-virkningsgraden og mekaniske virkningsgrader. Carnot-virkningsgraden er basert på en tenkt syklus som operer med isentropisk kompresjon, isotermisk varmetilførsel, isentropisk ekspansjon og isotermisk varmebortførelse, og er den høyeste oppnåelige virkningsgraden for kraftproduksjon mellom to varmereservoarer ved temperaturene  $T_H$  og  $T_L$ . Carnot-virkningsgraden beregnes ved:

$$\eta_{\text{carnot,th}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.2)$$

Ved evaluering av en termisk maskins ytelse er det det naturlig å undersøke hvordan maskinen presterer i forhold til en Carnot-maskin ved samme temperaturbetingelser. Dette gjøres ved å beregne maskinens andre lovs virkningsgrad  $\eta_{II}$ . Andre lovs virkningsgrad er forholdet mellom maskinens termiske virkningsgrad og Carnot-virkningsgraden:

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{carnot,th}} \quad (2.3)$$

$\eta_{II}$  er med andre ord et mål på utnyttet arbeidspotensial.

Ved andre typer spillvarmeutnyttelse hvor både produsert kraft og varme fra en konverteringsenhet utnyttes, som for eksempel ved kogenerering, evalueres systemet ut fra dets totale virkningsgrad  $\eta_{tot}$ . Den totale virkningsgraden er summen av systemets el.virkningsgrad  $\eta_{el}$  og varmevirkningsgrad  $\eta_{varme}$ , og beregnes ved:

$$\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{varme} = \frac{\dot{W} + \dot{Q}}{\dot{Q}_{inn}} \quad (2.4)$$

hvor  $\dot{W}$  er produsert elektrisk arbeid og  $\dot{Q}$  er produsert varme.  $\dot{Q}_{inn}$  kan for eksempel være forbrenningsentalpi LHV medfølgende et drivstoff.

I seksjonene under følger en introduksjon av noen av de forskjellige prinsippene for spillvarmeutnyttelse. Seksjon 2.2 inneholder en presentasjon av prinsippet for kogenerering. Seksjon 2.3 inneholder presentasjon av noen av prinsippene for kraftproduksjon fra spillvarme. Prinsippene som presenteres er henholdsvis: termoelektriske generatorer (Subseksjon 2.3.1), strlingmotoren (Subseksjon 2.3.2), PCM (Subseksjon 2.3.3) og organiske dampkretser (Subseksjon 2.3.4).

## 2.2 Kogenerering (CHP)

Kogenerering, eller kombinert varme- og kraftproduksjon (CHP), er samtidig produksjon av både elektrisk kraft og anvendbar varme. Kogenerering defineres i følge WADE [45] av tre elementer: 1) samtidig produksjon av både kraft og varme, 2) produksjon ved høye totale virk-

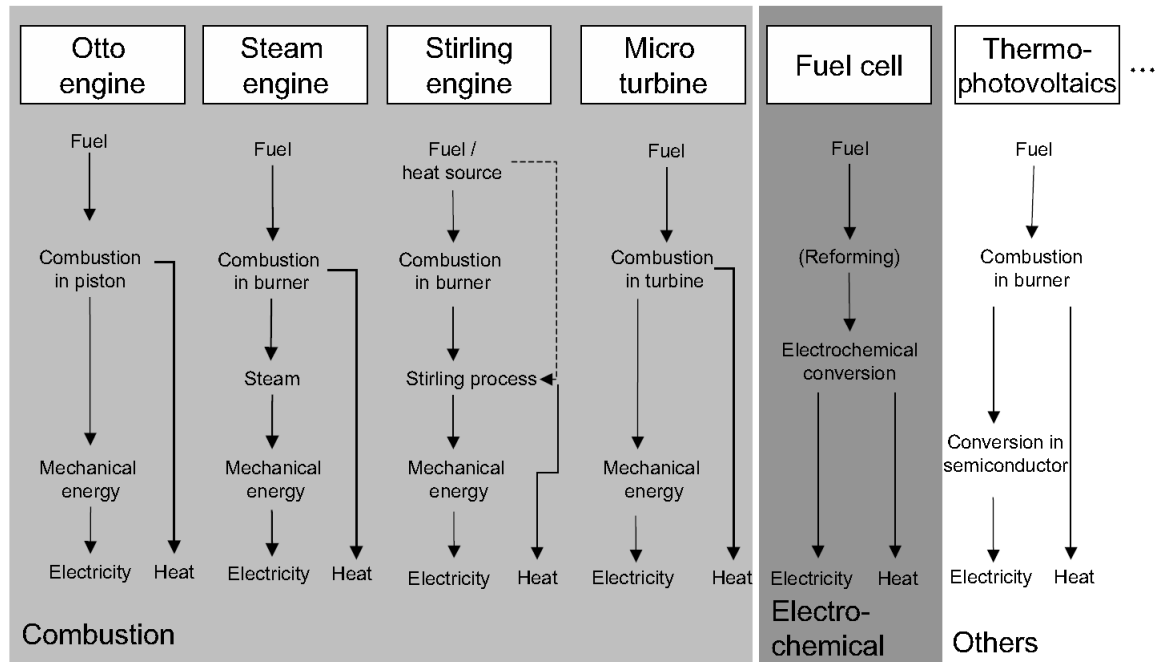
ningsgrader og 3) nærhet til forbruker. Prinsippet er anvendelig i både store anlegg, som BIRs anlegg for avfallsenergi i Rådalen ( $8 \text{ MW}_{\text{el}}$  og  $60 \text{ MW}_{\text{varme}}$ ), og små anlegg, som XRGI-enheten som omtales i denne oppgaven ( $13 \text{ kW}_{\text{el}}$  og  $29 \text{ kW}_{\text{varme}}$ ). Av EU opereres det med tre definisjoner på kogenereringsenheter basert på størrelsesorden. En enhet som kan operere i kogenereringsmodus kalles en '*cogeneration unit*'. Enheter som produserer mindre enn  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  defineres som en '*micro-cogeneration unit*'. Enheter med maksimum kapasitet mindre en  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  defineres som '*small scale cogeneration*'.

XRGI 13-enheten har en maksimum kapasitet på  $13 \text{ kW}_{\text{el}}$  og er dermed etter EUs mål definert som en *micro-cogeneration unit*, eller på norsk mikro-kogenereringsenhet. Selv om definisjonen fra EU er klar, finnes det forskjellige bruk av begrepet mikro-kogenerering. Pehnt et al. [46] definerer en mikro-kogenerering som: "simultan generering av oppvarming, eller kjøleenergi, og kraft i en individuell bygning basert på små energikonverteringsenheter under  $15 \text{ kW}_{\text{el}}$ ." Å definere mikro-kogenerering under  $15 \text{ kW}_{\text{el}}$  er i følge Pehnt et al. [46] mer hensiktsmessig ettersom mikro-kogenereringsenheter tydeligvis er ment til å brukes i husstander, små forretninger, skolebygg, hotell, osv, og må skilles fra større enheter/anlegg som er ment brukt til distriktforsyningsformål. De minste CHP-enhetene skiller seg også ut på andre områder: produsert elektrisk effekt distribueres som regel innad i bygget, og ikke ut på nett, mikro-CHP-enheter eies som oftest av bedrifter eller privatperson for å dekke deres eget behov og mikro-CHP-enheter behøver ikke utbygging av nettverk for varmedistribusjon, i motsetning til anlegg for distriktsoppvarming.

### 2.2.1 Stempelmotor som konverteringsteknologi

I senter av enhver CHP-enhet står en konverteringsenhet. Konverteringsenhetens formål er å omdanne kjemisk energi lagret i flytende, solid eller gassformig drivstoff eller varme til arbeid. En rekke konverteringsteknologier er tilgjengelige for bruk i mikro-CHP-enheter, for eksempel stempelmotorer, stirlingmotorer, gassturbiner, dampturbiner, osv. (se figur 2.1)

I EC Powers CHP-enheter brukes det en stempelmotor som konverteringsenhet. I en stempelmotor omformes kjemisk energi til mekanisk arbeid ved at drivstoff forbrennes i forbrenningskammer. Trykkøkningen som følge av forbrenning fortrenger et stempel som tilkoblet en veivstang overfører mekanisk kraft til aksel. Den mekaniske kraften konverteres så til elektrisk kraft i en elektrisk generator. I forbrenningskammer utvikles det mye varme. For å hindre over-



Figur 2.1: Oversikt over noen konverteringsteknologier for bruk i mikro-konverteringsenheter [46]

oppheating er stempelmotorer utstyrt med kappevannskanaler i sylindreforingen for nedkjøling av forbrenningsrommet. I en CHP-enhet samles denne varmen og varmen fra motorens smørelje til bruk til oppvarming. Store deler av forbrenningsvarmen forlater forbrenningsrommet med eksosgassene. Denne varmen kan samles opp i en varmeveksler. Oppsamlingen og bruken av varmen som utvikles i stempelmotoren gir meget høye virkningsgrader. Der en stempelmotor som ikke utnytter overskuddsvarmen har en total virkningsgrad rundt 30 % kan en CHP-enhet ha en virkningsgrad over 90 %.

Ved valg av forbrenningsmotor til bruk i kogenerering fokuseres det på forbrenningssystem, driftspunkt og driftsstrategi. I sammenheng med bruk av stempelmotorer i CHP-enheter definerer Hoff and Köper [47] fem størrelseskategorier:

- Large-CHP:  $P_{el} > 2$  MW
- Small-CHP:  $P_{el}$ ; 50 kW-2 MW
- Mini-CHP:  $P_{el}$ ; 10 - 50 kW
- Micro-CHP:  $P_{el}$ ; 2,5 - 10 kW

- Nano-CHP:  $P_{el} < 2,5 \text{ kW}$

I *small-CHP* og *large-CHP* brukes motorer som er utsprunget fra industri-dieselmotorer. I *mini-CHP* er i følge Hoff and Köper [47] Toyota 4Y og Toyota 3Y motorene mest brukt. Toyota 3Y/4Y er Otto-sugemotorer, dvs motorer med fremmedtenning og uten turbo-/superlading. Utvikling og drift av slike motoren for kogenereringsformål fokuserer på høye virkningsgrader og holdbarhetsoptimering. Optimering av holdbarhet grunner i ønsket økning av robusthet (reduksjon av friksjon) og bekjempelse av dårlig egnede forbrenningsprosesser med lave virkningsgrader. Utvelgelse av stempelmotorteknologi for å oppnå høy virkningsgrad og optimal holdbarhet inkluderer valgene [47]:

- valg av utslippsstrategi,
- valg av sylindrelading,
- valg av driftsstrategi,
- valg av lastvariasjon og
- valg av hastighetsområde.

### Valg av utslippsstrategi

Valg av utslippsstrategi handler om valg av støkiometrisk eller mager brennstoff-luftblanding. Forbrenning karakteriseres av oksidering av et flytende, solid eller gassformig brennstoff. I tilfellet forbrenning i en stempelmotor er dette brennstoffet som regel et flytende eller gassformig hydrokarbon. Støkiometrisk luftmengde er definert som den minste luftmengden som gir komplett oksidering av brennstoffet. Luftoverskuddstallet  $\lambda$  betegner forholdet mellom faktisk luftmengde og støkiometrisk luftmengde og er definert som:

$$\lambda \equiv \frac{\text{Faktisk luftmengde}}{\text{Støkiometrisk luftmengde}} \quad (2.5)$$

Det er en rekke fordeler med mager kontra støkiometrisk brennstoff-luftblanding. Lavere brennstoffmengde i sylindren gir lavere makstrykk som igjen gjør at det stilles lavere krav til



materialer, og det vil også være mindre mindre produksjon av  $\text{NO}_x$ . Mindre brennstoff i sylindere gir også mindre følsomhet for motorbank, noe som gjør det mulig med høyere kompresjon i sylindere. Rikelig med oksygen til forbrenningen gir også høyere termiske virkningsgrader, og reduserte utslipp gjør at billigere komponenter for avgassrensing kan brukes. Det kan for eksempel brukes en to-veis katalysator i stedet for en tre-veis katalysator. Det er også noen ulemper involvert ved mager drift. Ved å utnytte muligheten for høyere kompresjon gjort tilgjengelig av redusert følsomhet for motorbank kan man igjen øke utslipp av  $\text{NO}_x$ . Høyere luftoverskuddstall gir også lavere tenningsvillighet, og for høyt luftoverskuddstall kan gi tenningsproblemer. I tillegg vil lavere indikert middeltrykk samtidig som identisk friksjonstap som for støkiometrisk brennstoff-luftblanding gir lavere virkningsgrad.

For de minste CHP-enheten oppveier ulempene fordelene, og alle nye CHP-enheter med maksimum kapasitet mindre enn  $10 \text{ kW}_{\text{el}}$  driftes derfor med støkiometrisk brennstoff-luftforhold [47].

### **Valg av sylindrelading**

En stempelmotors kapasitet styres av luftmengden i forbrenningsrommet. Det er mengden luft som bestemmer hvor mye brennstoff som kan benyttes når utslippsstrategien allerede er bestemt. Superlading er fellesbetegnelsen på bruk av kompressor for å skyve mer luft inn i forbrenningsrommet. Turbolading er betegnelsen på det spesielle tilfellet hvor stempelmotorens avgasser driver kompressoren gjennom en turbin. Superlading, eller turbolading, fordrer bruken av en ekstra komponent i systemet, med de potensielle reduksjonene i holdbarhet dette medfører. Det er per i dag ingen kogenereringenheter under  $30 \text{ kW}_{\text{el}}$  som benytter superladede motorer. Dette på grunn av dårlige erfaringer med små turboladere [47].

### **Valg av driftsstrategi**

Valg av driftstrategi handler hovedsaklig om valget av modulering eller ikke modulering. En CHP-enhet uten modulering opererer med kun ett driftspunkt definert av én last og ett turtall. CHP-enheter uten mulighet for modulering har kortere årlig driftstid enn kogenereringenheter med modulering, dette på grunn av manglende evne til å tilpasse seg brukers kraft- og varmeforespørsel. CHP-enheter styres etter varmebehovet. Dersom varmeavtagningen i den hete kret-

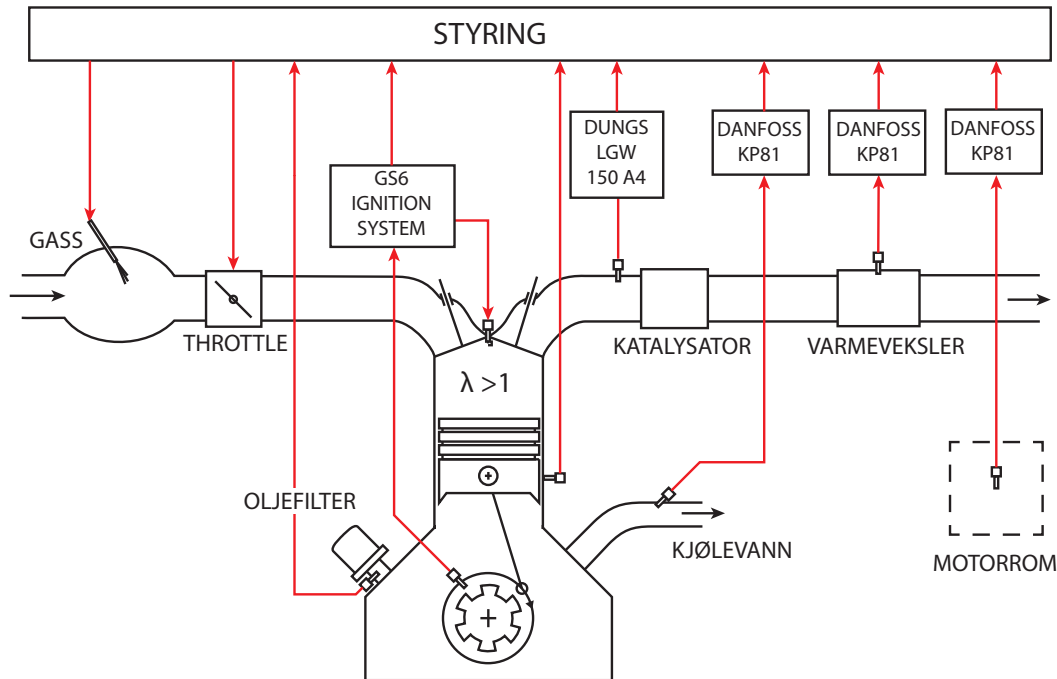
sen (kretsen som kjøler stempelmotor o.l.) i motoren ikke er tilstrekkelig justeres, enheten ned. Dette kan føre til opptil 60 % økt driftstid i året[47].

### Valg av lastvariasjon

For CHP-enheter med modulering er det to muligheter for lastvariasjon: enten ved struping eller ved turtallsvariasjon [47]. Variering av last ved struping medfører flere tap i enheten. Struping gjør at en mindre mengde brennstoff-luftblanding entrer forbrenningsrommet ved at arealet i tilførselsledningen reduseres. Dette fører til >10 prosentpoeng reduksjon i indikert virkningsgrad på grunn av pumpetap [47]. Basert på lavere indikert middeltrykk vil også den mekaniske virkningsgraden synke på grunn av friksjonstap. Dette tapet i virkningsgrad kan være så stort som 15 prosentpoeng [47]. Sammenlagt vil dette medføre en reduksjon i virkningsgrad på >25 prosentpoeng. Lastvariasjon ved turtallsvariasjon medfølger valg av optimalt hastighetsområde.

### Valg av turtallsområde

Valg av virkningsgradoptimale turtallsområder for Otto-sugemotorer i størrelsesorden mini- og mikro-kogenerering (i følge definisjonene til Hoff and Köper [47]) er underlagt en del påvirkninger. I turtallsområdet  $n = 2400 \text{ rpm} \pm 400 \text{ rpm}$  er virkningsgraden generelt bedre og spesifikt brennstofforbruk lavest. I området  $n < 1300 \text{ rpm}$  stiger friksjonen og det er større tap ved *blow-by* og lekkasje. I turtallsområdet  $n \approx 1300 \text{ rpm}$  til  $2000 \text{ rpm}$  er det høyere friksjonstap enn i optimalt område, men området gir bedre kompromiss for lavere varmebehov. Turtall mellom  $2800 \text{ rpm}$  og  $3500 \text{ rpm}$  gir høyere friksjon, men bedre totalvirkningsgrader på grunn av bedre gassutveksling og effektiv forbrenning. Turtall over  $3500 \text{ rpm}$  gir høye friksjonstap, tap i gassutvekslingen, økt støyutslipp osv. Følgelig er nyttbart område mellom  $1300 \text{ rpm}$  og  $3500 \text{ rpm}$  og optimalt område ligger mellom  $2000 \text{ rpm}$  og  $2800 \text{ rpm}$  for motorer opptil  $20 \text{ kW}_{el}$  [47].



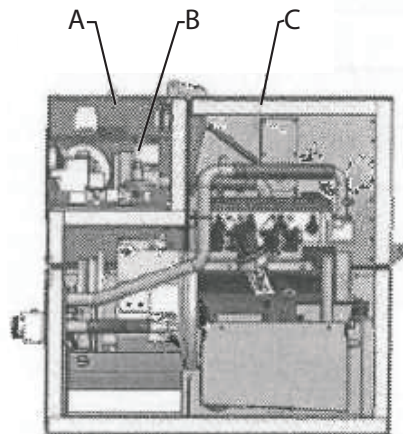
Figur 2.2: Styringsstrategi for XRGI-enheten (Merk: Toyota 3Y-motoren er ikke en *cross-flow*-motor)

## 2.2.2 EC Power XRGI 13

CHP-enheten i denne oppgaven er av typen XRGI 13 fra EC Power. Enheten har et skall med varme- og lydisolerende materiale. I hjertet av CHP-enheten er en fire-sylindret Toyota 3Y truck-motor med 1998 cc slagvolum. Motoren er vannkjølt og har 8 *over-head* ventiler [48]. Motorens forbrenningsrom er kjegleformet med inntaks- og eksosventiler på samme side. Motorens kompresjonsforhold (forholdet mellom største og minste sylindervolum) er 8,8 [49]. Full mekanisk effekt på 14,4 kW ved 1535 RPM [11]. Dette tilsvarer et middeltrykk på  $BMEP = 5,63 \text{ bar}_g$ . Motoren driftes med konstant turtall  $n = 1535 \text{ rpm}$ , lasten må derfor varieres ved struping. Motoren leverer mekanisk kraft til en asynkron generator plassert mot CHP-enhetens bakside. Generatoren konverterer den mekaniske kraften til elektrisk kraft ved 400 V og 50 Hz med en virkningsgrad på 90,28 % i følge datablad [11]. Over generator er et rom for enhetens gassikkerhet inneholdende bl.a. gassmikser og strupeventil. Over dette rommet igjen er enhetens el-kabinett inneholdende enhetens ECU m.m. (se figur 2.3).

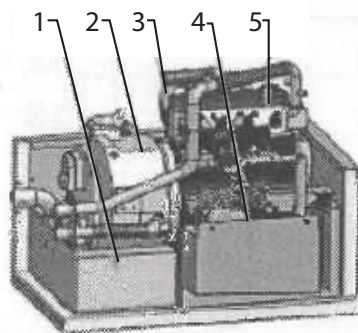
Toyota 3Y motoren driftes med mager brennstoff-luftblanding, med luftoverskuddstall mellom 1,2 og 1,5. Tenningsstidspunkt i motoren styres av en Gill Instruments GS6 tenningsmodul,

## Power Unit



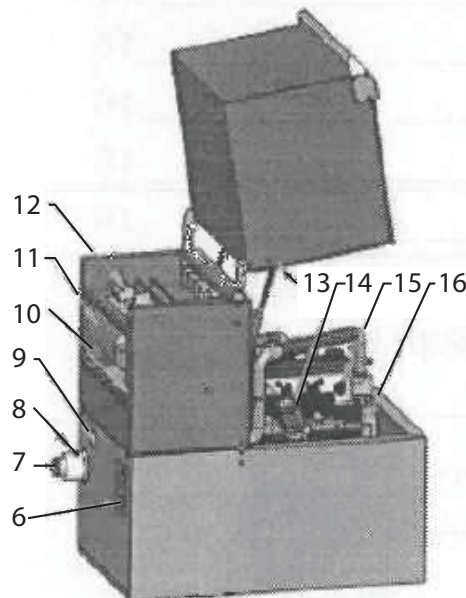
### Lay-out

- A) Electrics enclosure
- B) Gas safety tray
- C) Heat and noise shield for engine



### Engine Cabinet

- 1) Silencer
- 2) Water-cooled generator
- 3) Exhaust heat exchanger
- 4) Oil tub
- 5) Engine



### Installation and Service

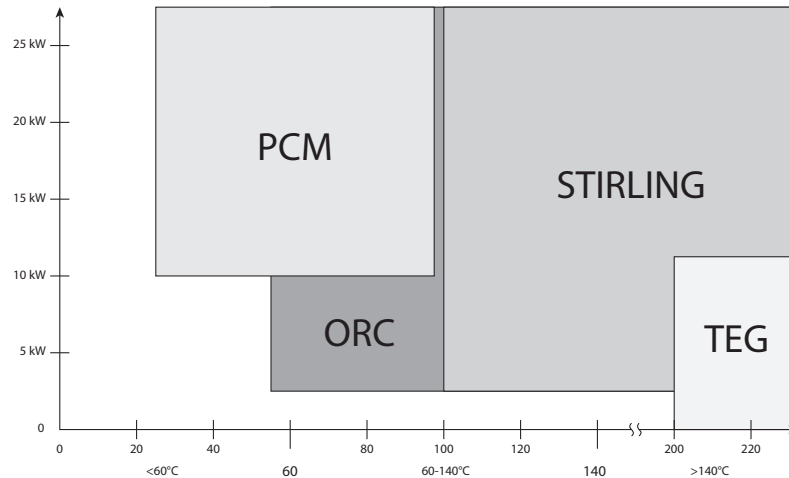
- 6) Water connection
- 7) Exhaust connection
- 8) Exhaust gas sampling port
- 9) Main power connector
- 10) Gas connection
- 11) Air filter
- 12) Electrical connections
- 13) Lid
- 14) Oil filter
- 15) Gas inlet
- 16) Oil pipe filter

Figur 2.3: Oversikt over (a) CHP-enhetens layout (b) Komponentene i motorrommet og (c) tilkoblinger og servicepunkter [50].

designet for å styre motorer som opererer på LPG, naturgass eller biogass. Dette for å sikre tenning. Tenningsmodulen er programmerbar for antall sylindere (opp til 6), tenningsstidspunkt for last, hastighet, temperatur og drivstofftype og tenningsenergi og varighet. For forbrenningskontroll har enheten også en Dungs LGW 150 A4 differensialtrykk-*switch* tilkoblet eksos.

Luft trekkes inn i enheten fra motorrom gjennom en ventil på enhetens høyre side (sett forfra). Dette fordrer krav til luftinntak til motorrom på minst 1200 l/min [50] Luft og gass blandes så i en gassmikser i rommet for gassikkerhet før den trekkes inn i motor via manifold. Både innsugsluften og eksosgassene går gjennom en vannkjølt manifold. Eksosgassene passerer etter manifold gjennom katalysator. På grunn av de lave NO<sub>x</sub>-utslippene mager drift medfører, er enheten bare utstyrt med en to-veis katalysator for etteroksidering av uforbrente hydrokarboner (UHC) og karbonmonoksid (CO). Eksosgassene passerer til slutt gjennom en varmeveksler og lydtemper før de forlater containeren gjennom eksosrøret. Varmeveksleren er en flateplate varmeveksler med økende avstand mellom platene for redusert trykktap. CHP-enhetens oljekar er plassert på venstre side av motoren (sett forfra), under oljefilter.

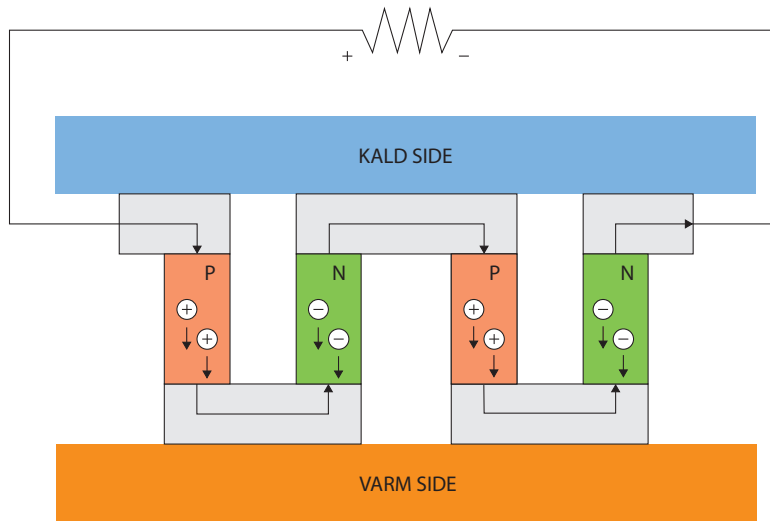
Av de ovennevnte komponentene er stempelmotor, generator, eksosmanifold og varmeveksler vannkjølte. I tillegg er oljefilteret til stempelmotoren vannkjølt. Kjølevann entrer enheten på baksiden. Etter innløp deler kjølevannstrømmen seg i to rør hvorav det ene går inn i generator og det andre går til oljefilteret. Kjølevannsstrømmen som går inn i generator går videre til eksosvarmeveksler og manifold før den møter opp med kjølevannsstrømmen som har vært gjennom oljefilteret like før innløp til stempelmotor. Etter stempelmotor strømmer kjølevannet samlet ut av CHP-enheten like ved innløp til enheten. Enheten har tre Danfoss termostater med temperaturfølere: i kjølevannstrøm ut av stempelmotor, i varmeveksler og i motorrom for overvåkning av varmeavtagning fra den hete kretsen. Maksimum systemtrykk for kjølevann i varmefordeleren er 5 bar (3,5 bar systemtrykk anbefales av leverandør [50]). Trykket i motorkretsen bør ikke overskride 1 bar ved kald motor og 1,5 bar ved normal drift.



Figur 2.4: Temperatur- og ytelsesområde for noen tilgjengelige WHR-teknologier [4].

## 2.3 Teknologi for kraftproduksjon fra spillvarme

Kraftproduksjon fra spillvarme handler om å utnytte en varmekraftmaskin til å konverterer varme til mekanisk arbeid eller til elektrisitet. I slike varmekraftmaskiner anvendes det varme som er biproduktet i en annen prosess, som f.eks. kraftproduksjon, kjemisk prosess, el. Det er ofte denne typen enheter som omtales når det i dagligtalen snakkes om spillvarmeutnyttelse eller *Waste Heat Recovery* (WHR). I denne teksten vil slike enheter omtales som WHR-enheter. Flere teknologier er per i dag tilgjengelig for bruk i WHR-enheter. Hver av disse teknologiene har sine fordeler, ulemper og virkningsgradsoptimale arbeidsområder. Valg av riktig teknologi kan være avgjørende for applikasjonens ytelse. De to faktorene som mest styrer valg av teknologi er energikvalitet og energimengde. Energifkvaliteten defineres av temperaturområdet varmekilden befinner seg i og energimengden defineres av forventet kraft ut av varmekraftmaskinen, dette basert på tilgjengelig varme. Basert på faktorene energikvalitet og energimengde er det mulig å lage en oversikt over arbeidsområdene for noen av de vanligste tilgjengelige teknologiene. Figur 2.4 viser deler av arbeidsområdet til noen lavtemperatur WHR-teknologier. Figuren er basert på tall fra Ragnøy [4]. Oversikten fra Ragnøy [4] er basert på kommersielle produkter og produkter i utvikling.



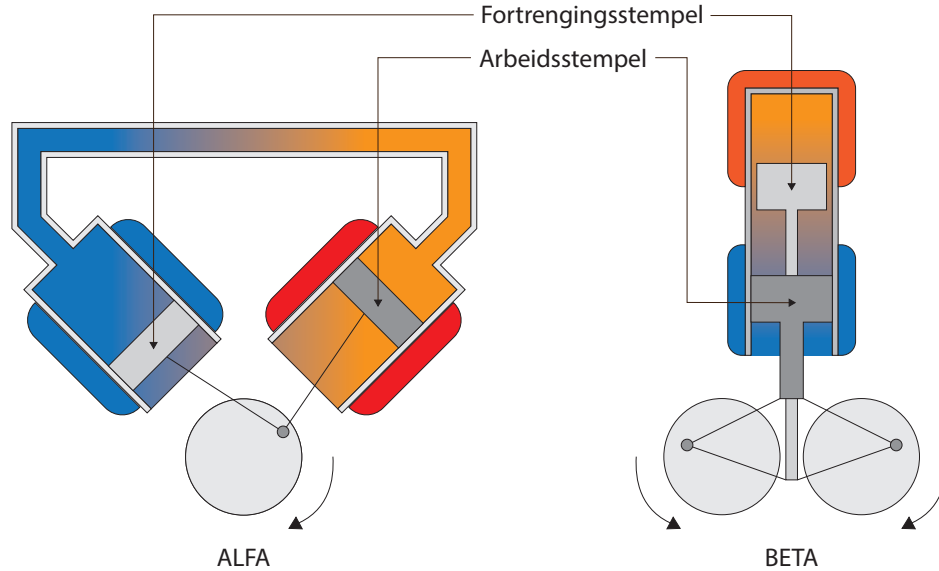
Figur 2.5: Termoelektrisk generator (TEG).

### 2.3.1 Termoelektrisk generator (TEG)

I en termoelektrisk generator produseres elektrisitet ved Seebeck-effekt; oppdaget i 1821 av Thomas Johann Seebeck. Effekten grunner i at to metaller reagere forskjellig på en temperaturdifferansen over dem og det dannes en strøm av elektroner gjennom løkken, og dermed også en spenning.

Det elektriske potensialet som produseres i en enkel termoelektrisk krets er relativt beskjedent, men dersom metallene kobles i serie, i en kaskade, vil det elektriske potensialet være betydelig større. TEG-systemer i bilindustrien består typisk av et eksosgassystem, en varmeveksler, et TEG-system, et kraftkondisjoneringsystem og en batteripakning [51]. Systemet fungerer ved at varmeveksleren fanger varme fra eksosgassene etter katalysatoren. TEG-systemet produserer så elektrisitet fra den oppfangede varmen. Kraftkondisjoneringsystemet omdanner så elektrisiteten for maksimal kraft overføring.

Ulempen med TEG er at virkningsgradene er lave. Bedre materialer kan gi større energitettighet og bedre effektivitet, men gode materialer er dyre. TEG er derfor å anse som en teknologi som passer best til mindre varmemengder ved høye temperaturer. Det er på den andre siden sannsynlig at det vil skje en stor utvikling innen område, og det er mulig det kommer mer konkurransedyktige TEG-teknologier om ikke så lenge [4].



Figur 2.6: Stirling-motor med alfa-konfigurasjon (a) og beta-konfigurasjon (b).

### 2.3.2 Stirlingmotor

Sterling-motoren er en varmekraftmaskin som opererer med syklisk kompresjon av et arbeidsfluid (luft eller annen gass) ved forskjellige temperaturer i en lukket krets slik at det produseres et netto arbeid. Motoren finnes hovedsaklig i to konfigurasjoner: alpha og beta (se figur 2.6). I en alpha-type konfigurasjon er det to sylindere: en opphetet ekspansjonssylinder og en nedkjølt kompresjonssylinder. I en beta-type konfigurasjon er det bare en sylinder med en opphetet og en nedkjølt ende. Den opphetede sylindere/enden i en Sterling-motor kan varmes av alt fra konstant forbrenning, til solvarme, til en massestrøm med forhøyet temperatur. Det grunnleggende prinsippet i en Sterling-motor er at opphetet gass opptar et større volum enn en kjøligere gass. Når varme tilføres ekspansjonssylindere/-enden vil Sterling-motoren begynne å produsere mekanisk arbeid. Dersom mekanisk arbeid tilføres motoren, på den annen side, vil Sterling-motoren fungere som en varmepumpe ved at den hete sylindere/enden blir hetere og den kjølige sylindere/enden blir kjøligere.

Av norske aktører er det Single-Phase Power som leverer Sterlingmaskiner til spillvarmeutnyttelse i Norge. Single-Phase Power leverer modulbaserte beta-type Stirling-maskiner med helium som arbeidsmiddel. Single-Phase Powers moduler brukes i dag hovedsaklig som varmepumper, for eksempel hos Tine Meierier i Byrkjelo, men teknologien anses som moden for lavtem-





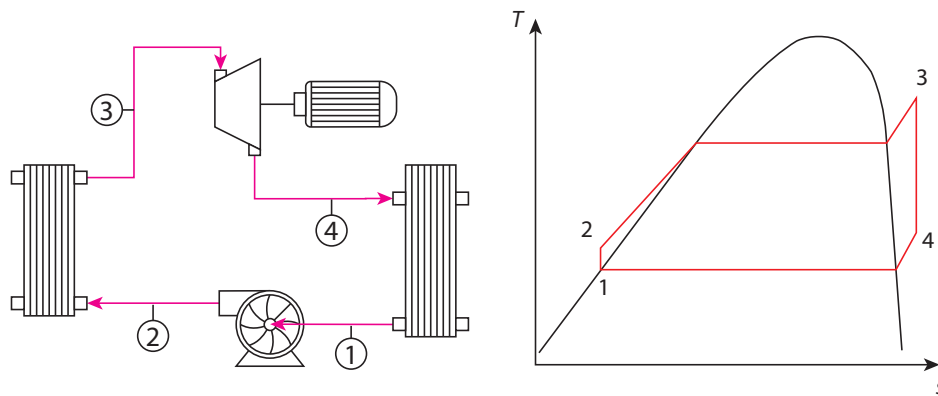
Figur 2.7: PCM varmeputer [4]

peratur kraftproduksjon [4]. Svenske Clean Energy AB leverer også modulbaserte Sterlingmotorer av typen alfa med arbeidsmedium helium. Clean Energy AB har levert over 130 enheter, der i blant til Asker kommune i Norge hvor motoren drives av faking av lavverdig metangass. Clean Energys enheter brukes som regel opp mot varmekilder med høy temperatur (ca 500-700°C) og gir lav ytelse (<10 kW) [4].

### 2.3.3 Phase Change Material (PCM)

PCM er mest kjent som materialer som tar opp, eller avgir, store mengder varme ved faseovergang. Et nærliggende eksempel på dette er varmeputene illustrert i figur 2.7. En annen type PCM er materialer som opplever en stor volumendring ved faseovergang. Slike materialer er mulig å bruke i varmekraftverk hvor materialet vekselvis varmes og kjøles og med dette produserer mekanisk kraft. Slike varmekraftmaskiner er patentert og testet [4].

Svenske Exencotech AB er en av patentinnehaverne på PCM-baserte varmekraftmaskiner. I følge deres tester kan en 'energicelle' levere opp til 1 kW<sub>el</sub>. 20 'energiceller' vil da kunne levere 10 kW<sub>el</sub> kontinuerlig elektrisitet, ved drift i motfase(dvs. halvparten av cellene eksponeres vekselvis til varmekilde og varmesluk, og visa versa). I Exentechs løsning består "energicellene" av parafinplater under høytrykk (300-400 bar). Ved oppvarming endrer platene fase fra fast til flytende, noe som medfører en volumekspansjon på ca 20 %. Platene kjøles så igjen og skifter tilbake til fast form. Under testing har Exontech påvist 7,5 % virkningsgrad ved 95°C varmekilde og 25°C varmesluk [4].



(a) Skjematikk

(b) Ts-diagram

Figur 2.8: Den enkle, ideelle Rankine-syklusen

### 2.3.4 Organiske dampkretser (ORC)

Teknologien som skiller seg ut som mest moden og mest kommersielt tilgjengelig er organiske dampkretser, eller ORC. ORC står for *Organic Rankine Cycle* som er det engelske navnet på dampkretser med organiske fluider som arbeidsfluid. Prinsippet bygger på Rankine-syklusen, som er en ideell termodynamisk syklus av en dampkrets som konverterer varme til mekanisk arbeid. Den enkle, ideelle Rankine-syklusen består av:

**1-2** isentropisk kompresjon i pumpe,

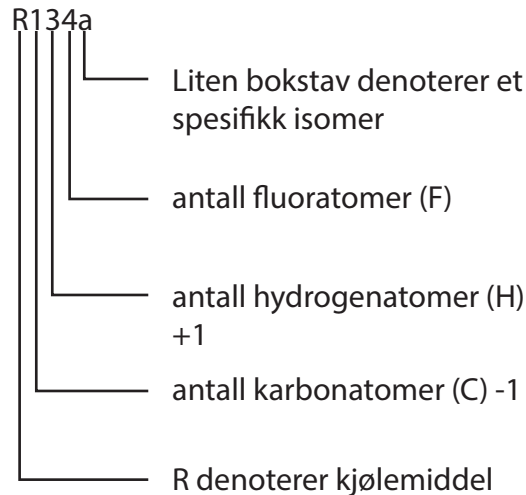
**2-3** ekstern varmetilførsel ved konstant trykk,

**3-4** isentropisk ekspansjon i ekspander og

**4-1** varmebortførsel ved konstant trykk.

Følgelig består en enkel dampkrets av en pumpe, en fordamper (eller *boiler*), en ekspander og en kondensator.

Det definerende elementet i organiske dampkretser er arbeidsfluidet. Dampkraftmaskinene som ble til under den industrielle revolusjon opererte opprinnelig med vann som arbeidsfluid. Utviklingen i nyere tid har vært operasjon med organiske arbeidsfluider. Organiske fluider er en

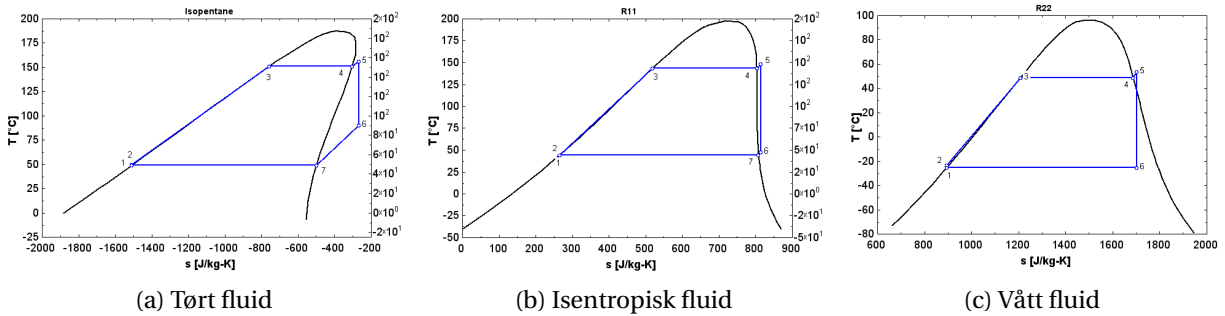


Figur 2.9: Eksempel på denotering av kjølemiddel.

samlebetegnelse på hydrokarbon-baserte fluider. Organiske fluider som brukes som arbeidsmedium i varmepumper og kjøleanlegg kalles kjølemidler eller kuldemedium. Disse har passende fordampningstemperatur i området 1 bar til 25 bar. Et kuldemedium kjennetegnes ved et unikt R-nummer. R-nummereringen ble oppfunnet av DuPont Company og er i dag formalisert som ASHRAE standard 34 [52]. Figur 2.9 illustrerer hvordan nummersystemet fungerer.

Fordelene med bruk av organiske arbeidsfluider fremfor vann er mange: organiske fluider har lavere kokepunkt og kan dermed ta opp varme ved lavere temperaturer. Enkelte organiske fluider har en positiv mettet-damp kurve, noe som betyr at de forblir overopphetet etter ekspansjon. Se figur 2.10a. Dette gir høyere virkningsgrad og forlenger ekspanderens levetid. Organiske fluider har høyere massetetthet[35]. Dampkraftverkene kan dermed bygges mer kompakt. Krever mindre vedlikehold og har færre myndighetskrav som følge av lavere arbeidstrykk [4].

Viking Heat Engines er et norsk selskap som leverer ORC-modulen CraftEngine. I modulen brukes en stempeleksponder sammen med enten ammoniakk, R410a, R134a, R236fa eller R254fa. Viking engines er det eneste selskapet i undersøkelsen til Ragnøy [4] som leverer produkter med ytelse i størrelsesorden 2-10 kW, som er omtrent den samme ytelsen som det kan være mulig å få ut av et WHR-anlegg på XRG1 13G kraftenheten.



Figur 2.10: Eksempler på forskjellige metningskurver [53].

### 2.3.5 Design av ORC-krets

Design av ORC er en prosess for oppnåelse av optimale virkninggrader og leverte effekter. En ORC kan utføres på flere forskjellige måter, og design av en ORC-applikasjon fordrer dermed en del valg. Blant disse er:

- valg av arbeidsfluid,
- valg av konfigurasjon og
- valg av komponenter.

#### Valg av arbeidsfluid

Valg av arbeidsfluid har tradisjonelt blitt utført ved *screening*-metoden. *Screening*-metoden består av å bygge en steady-state simuleringsmodell av en ORC-krets og så kjøre den med flere forskjellige arbeidsfluider. Arbeidsfluid velges så i de fleste tilfeller på bakgrunn av høyest oppnådd termisk virkningsgrad [35]. Denne metoden tar bare hensyn til ett aspekt av arbeidsfluidet. Ved valg av optimalt arbeidsfluid bør det tas hensyn til flere indikatorer og egenskaper [35]:

- *Termodynamisk ytelse*: Virkningsgraden og ytelsen ved en gitt varmekilde og et gitt varmesluk burde være så høy som mulig. Virkningsgraden og ytelsen er i tillegg til arbeidsfluidet avhengig av komponentvalg og valg av termodynamisk modell for simulering.
- *Damp-metningskurve*: En negativ damp-metningskurve "vått" fluid, se figur 2.10c) kan føre til kondensering under ekspansjonen, noe som kan være skadelig for maskineriet. I tilfellet av arbeidsfluider med negativ damp-metningskurve (f.eks. vann) må dermed

fluidet overopphetes før ekspander. For fluider med isentropisk damp-metningskurve trengs det kun en liten overoppheting. I tilfellet fluider med positiv damp-metningskurve ("tørt" fluid, se figur 2.10a) er det mulig å anvende en regenerator (type B konfig.) for å øke syklusens effektivitet.

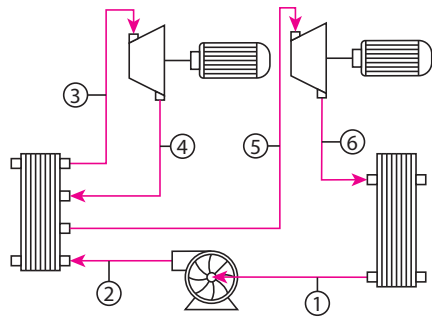
- *Høy damptetthet:* Lave tettheter fører til høyre volumstrømmer, og høye volumstrømmer fører til større trykktap i varmeveksler og at ekspanderens størrelse må økes.
- *Lav viskositet:* Lav viskositet er nødvendig for å opprettholde høy varmeovergangskoeffisient og lave friskjonstap i varmevekslerne.
- *Høy varmeledningsevne:* Høy varmeledningsevne er nødvendig for å opprettholde høy varmeovergangskoeffisient i varmevekslerne.
- *Akseptabelt fordampningstrykk:* Fluidet må ha et akseptabelt fordampningstrykk for å holde systemtrykket nede, og følgelig kostnadene nede.
- *Positivt kondensasjonstrykk:* Kondensasjonstrykk over atmosføret trykk er nødvendig for å hindre luft å trenge inn i systemet.
- *Høy stabilitetstemperatur:* Organiske fluider kan oppleve en forringelse dersom de utsettes for høye temperaturer over lengre tid. Høy stabilitetstemperatur er en egenskap som ønskes av fluider som skal brukes sammen med høytemperatur varmekilder.
- *Smeltepunkt:* Smeltepunktet må aldri være lavere enn den laveste atmosfæretemperaturen gjennom året.
- *Høyt sikkerhetsnivå:* Sikkerhet inkluderer to hovedparametre: giftighet og brennbarhet.
- *Lavt ozonnedbrytende potensial (ODP):* ODP (*Ozone Depletion Potential*) Er et mål på mediets evne til å bryte ned ozon, og måles i forhold til det ozonnedbrytende potensialet til R11.
- *Lavt drivhuseffekt potensiale (GWP):* GWP (*Global Warming Potential*) er et mål på mediets evne til å bidra til drivhuseffekten og måles i forhold til CO<sub>2</sub>.
- *God tilgjengelighet og lave kostnader:* Fluider som allerede er i bruk i andre prosesser i industrien er letter å få tak i og er billigere.

### Valg av konfigurasjon

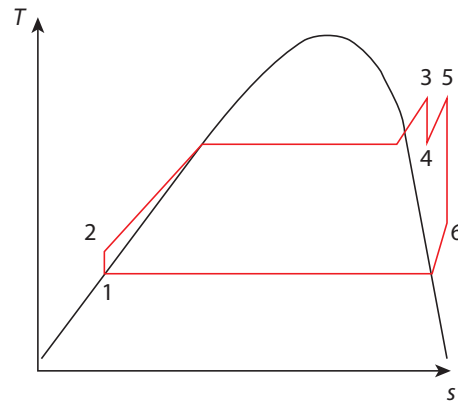
Valg av konfigurasjon handler om å utnytte fordelene i virkningsgrad ved høyere fordampningsstrykk uten å få for mye kondensasjon i ekspanderen. Med "tørre" og isentropiske fluider (Se figur 2.10a og 2.10b) er ikke dette et problem. Her vil det ikke oppstå kondensasjon i ekspander. For disse fluidene kan en kan den enkleste konfigurasjon brukes (se figur 2.8a). For at "våte" fluider skal kunne utnytte fordelene med høyt fordampningsstrykk, kan fluidet enten overopphetes til meget høye temperaturer, det kan benyttes en Rankine-syklus med gjenoppvarming eller det kan benyttes en Rankine syklus med regenerering. En Rankine-syklus med gjenoppvarming innebærer gjenoppvarming av fluidstrømmen mellom to eller flere ekspander-steg. Fordelen med dette er at det kan benyttes et større fordampningsstrykk med lavere makstemperatur, før ekspander. Ulempen er at det må benyttes flere ekspandere. En Rankine-syklus med regenerering innebærer å øke temperaturen til fluidet som forlater pumpen. Dette kan for eksempel gjøres ved å ta ut damp fra ekspanderen og blande den med fluidstrømmen etter pumpen i en åpen *feedwater heater* (FWH). Regenerering kan også benyttes for "tørre" og isentropiske fluider. Disse fluidene vil som regel være overopphetet også etter ekspander. Dette betyr at det er en del varme igjen å utnytte. Denne varmen kan utnyttes ved å varmeveksle fluidstrømmen mellom ekspander og kondensator med varmestrømmen mellom pumpe og fordamper.

### Valg av komponenter

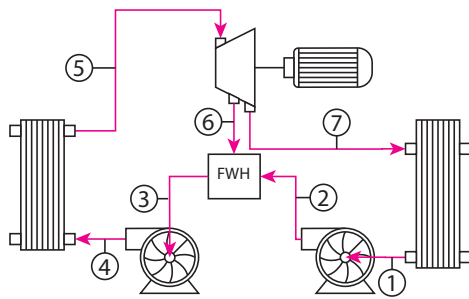
Valg av komponenter i en ORC-maskin handler i all hovedsak om valg av ekspander. Det finnes to typer ekspandere: volumetriske ekspandere og turbineekspandere. Hver ekspanderteknologi har sine fordeler og begrensninger, og er følgelig forbeholdt spesifikke arbeidsområder. Volumetriske ekspandere er en paraplybetegnelse på ekspandere som karakteriseres av et innebygd volumforhold. Denne typen ekspandere begrenses av volumstrøm, volumforhold og isentropisk virkningsgrad [35]. Eksempel på volumetriske ekspandere er skrue-, skroll- og stempelekspandere. Turbineekspandere inkluderer: aksialturbiner og radialturbiner. Radialturbiner er generelt mer kompakte enn aksialturbiner i utforming, og er også billigere. Turbineekspandere begrenses av rotorens *tip speed*, turbinens spesifikke hastighet, Mach-tall og rotasjonshastighet [35]. Til dampkretser i mikro-skala er det vanligst å bruke volumetriske ekspandere på grunn av deres



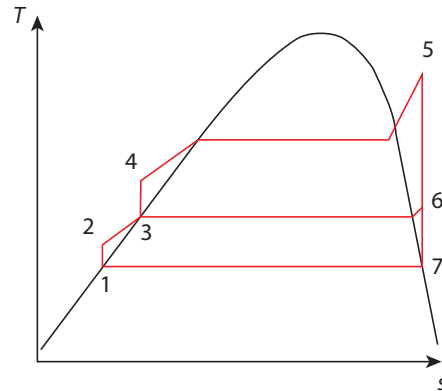
(a) Mellomvarming



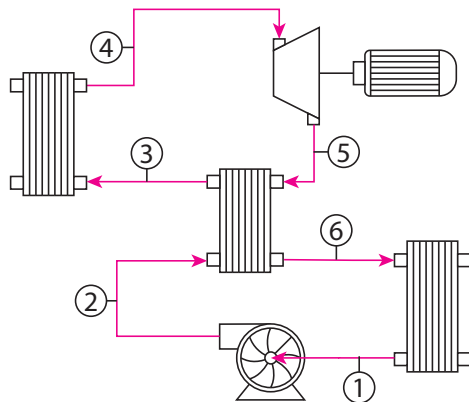
(b) T-s mellomvarming



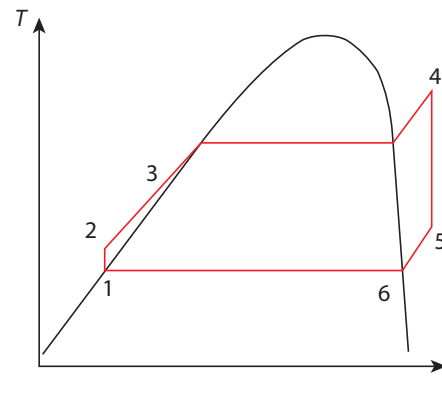
(c) Regenerering ved FWH



(d) T-s regenerering ved FWH



(e) Regenerering ved varmeveksler



(f) T-s regenerering ved varmeveksler

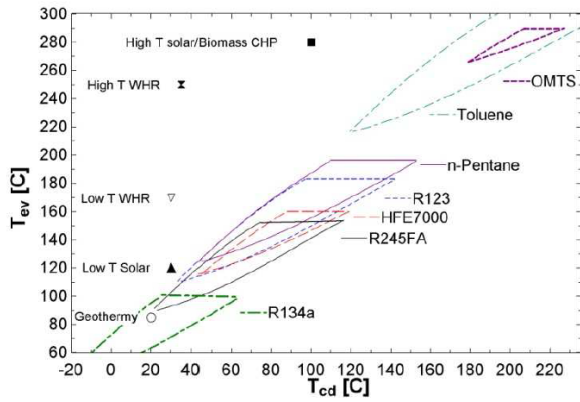
Figur 2.11: Eksempler på forskjellige ORC-konfigurasjoner.

lave roasjons hastighet og evne til å operere under høye trykkforhold i forhold til turbinekspandere [54]. Stempelekspandere er per dags dato et nisjeprodukt når det gjelder spillvarmeutnyttelse. Stempelekspanderen har bl.a. vært brukt i spillvarmeutnyttelse fra bilmotorer og kan derfor være interessant i applikasjon med Toyota 3Y-motoren som i tillegg til EC Powers XRGB 13 brukes i flere av Toyotas bilmodeller.

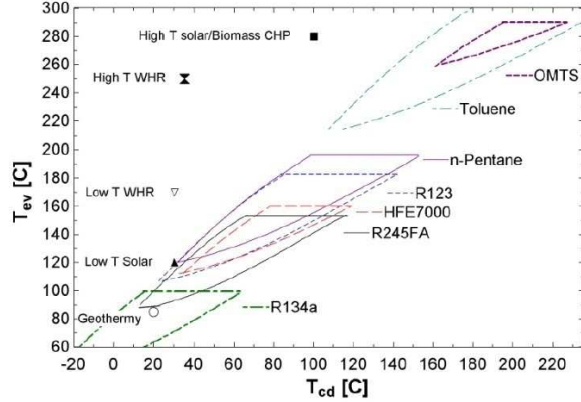
### **Samtidig valg av ekspander og arbeidsfluid**

Quoilin et al. [35] har foreslått en metode for samtidig valg av arbeidsmedium og komponent for ekspansjon i en dampkrets. Metoden fokuserer på valg av arbeidsfluid ved å bruke operasjonskart som markerer ekspanderens ytre grenser for operasjon med et spesifikt arbeidsfluid, plottet i et fordampningstemperatur-kondesasjonstemperatur diagram. Metoden sammenkobler valg av ekspander og arbeidsfluid, slik at det ikke oppstår urealistiske kombinasjoner. Operasjonskart for skrueekspander (figur 2.12b), skrollekspander (figur 2.12a) og turbinekspander (figur 2.12c) er utviklet av Quoilin et al. [35]. Operasjonskart er på lignende måte utviklet for stempelekspandere (figur 2.12d) av Lemort et al. [54]. Det er viktig å merke seg at fordampningstemperaturen  $T_{ev}$  og kondensasjonstemperaturen  $T_{cd}$  ikke er det samme som  $T_H$  og  $T_L$ .

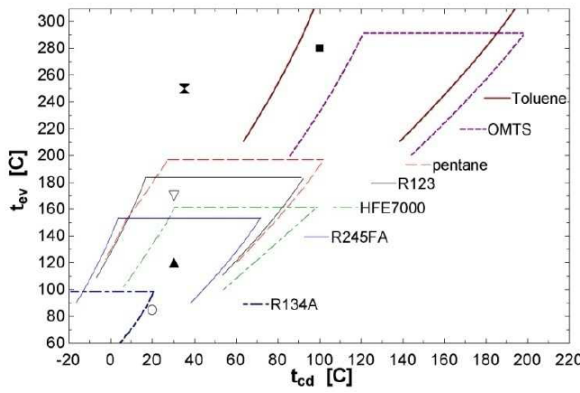




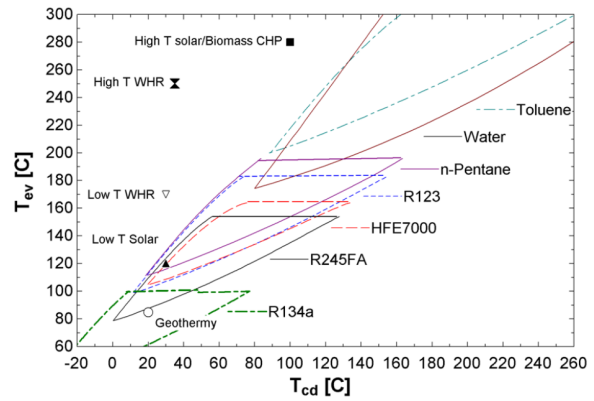
(a) Skrollekspander



(b) Skrueekspander

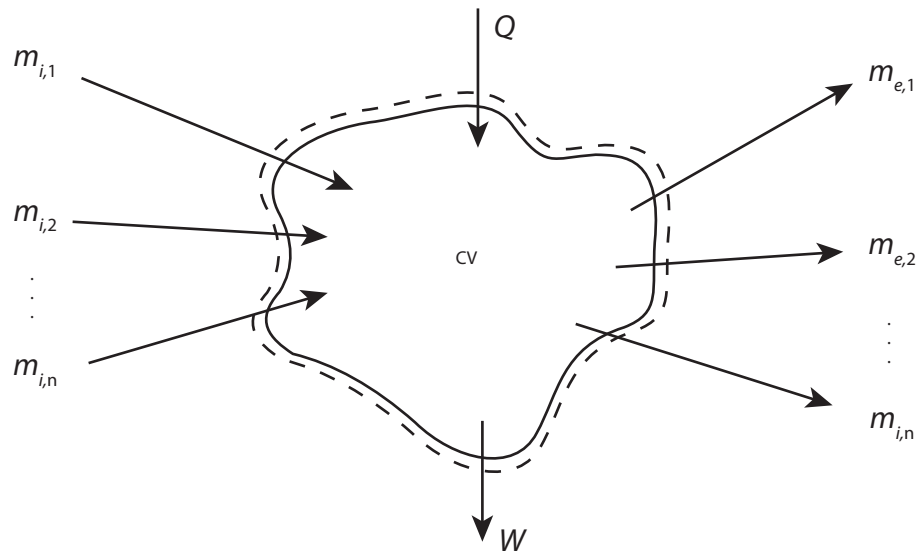


(c) Turbineekspander



(d) Stempeekspander

Figur 2.12: Operasjons-kart for forskjellige ekspandere [35] [54].



Figur 2.13: Kontrollvolum med inn- og utgående masse- og energistrømmer.

## 2.4 Energianalyse

Termodynamikk er læren om interaksjonen mellom masse og energi og ble utviklet i nettopp det øyemed å effektivisere varmekraftmaskiner. Energi er et av de fundamentale begrepene i termodynamikken. Energi kan i følge termodynamikken opptre i en rekke makroskopiske former, som: kinetisk energi, potensiell energi, indre energi, m.m., og kan også konverteres fra en form til en annen. Termodynamikkens første lov sier at energi hverken kan skapes eller ødelegges. Det vil si at den totale energien i et system er bevart, selv om energien konverteres fra en makroskopisk form til en annen. I tillegg til energi, vil massen også være bevart i et system. Dette kalles kontinuitetsprinsippet. I det spesielle tilfellet av tilnærmet inkompressible fluider, som vann, vil kontinuitetsprinsippet også gjelde volum og volumstrømmer.

I termodynamisk analyse er det alltid et system som skal studeres. Systemet kan være skilt fra omgivelsene ved fysiske flater eller ved en tenkt grense. De definerende skillene er kjent som kontrollflater eller systemgrenser. Et system med konstant masse kalles en kontrollmasse, mens et system med massegjennomstrømning kalles et kontrollvolum eller et åpent system (se figur 2.13). Dersom det ikke er noe akkumulering av masse eller energi i et kontrollvolum over tid kal-

les det et *steady-state* system. For et steady-state system er det mulig å sette opp massebalansen

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad (2.6)$$

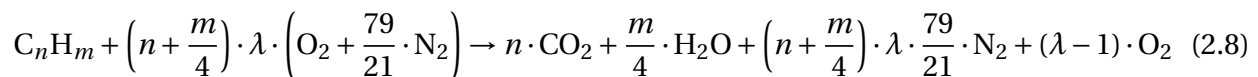
En lignende ligning kan settes opp for energi:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = 0 \quad (2.7)$$

For å løse systemets energibalanse, må først systemets massebalanse.

### Forbrenningsstøkiometri

Forbrenning er en kjemisk prosess hvor et reaktant reagerer med en koreaktant og danner forbrenningsprodukter. Forbrenning frigir som kjent termisk energi og klassifiseres dermed som en exotermisk prosess. I tilfellet av forbrenning av hydrokarboner, substanser bestående primært av hydrogen og karbon, med luft som koreaktant er det mulig å sette opp følgende generelle reaksjonsligning:



hvor  $n$  representerer antall karbonatomer og  $m$  antall hydrogenatomer i et representativt molekyl for brennstoffet.  $\lambda$  i ligning 2.8 representerer luftoverskuddstallet for reaksjonen. Luftoverskuddstallet er definert som forholdet mellom faktisk luftmengde og støkiometrisk luftmengde (som uttrykt i ligning 2.5).

Støkiometrisk luftmengde er den luftmengden som er nødvendig for fullstendig forbrenning av et spesifikt brennstoff. Tørr luft regnes å bestå av ca 21% oksygen og 79% nitrogen. Ved forbrenning av hydrokarboner sammen med tørr luft, reagerer hydrokarbonet med oksygen i luften mens nitrogen forblir inert. Ut fra ligning 2.8 er det mulig å bestemme minste antall oksygenatomer  $O_{2,\min}$  som er nødvendig for fullstendig forbrenning. Minste nødvendige luftmengde beregnes ut i fra luftens komposisjon ved:

$$L_{\min} = \frac{O_{2,\min}}{0,21} \quad (2.9)$$

hvor  $L_{\min}$  oppgis i  $\text{m}^3$  luft/ $\text{m}^3$  brennstoff eller kmol luft/kmol brennstoff. Ut i fra ligning 2.8 er også det mulig å utlede en formel for beregning av luftoverskuddstallet lambda basert på oksygenmengden i eksosgassen. Formelen er gitt ved

$$\lambda = \frac{21\%}{(21\% - \text{O}_2\%)} \quad (2.10)$$

Ved forbrenning antas det at kontinuitetsprinsippet er gjeldende og at ingen atomer splittes. Følgelig vil antall atomer av et grunnstoff forbli konstant gjennom prosessen. Molmengden forbrent kan beregnes ut i fra målt eksosgassammensetning.

Eksosgassammensetningen er målt som tørr luft. Mengden  $\text{H}_2\text{O}$  produsert kan finnes ved å løse forbrenningslikningen. Ved forbrenning av hydrokarboner sammen med fuktig luft antas det at fuktigheten i luften ikke vil reagere med noe, og ender dermed som ekstra  $\text{H}_2\text{O}$  i produktene.

For å kunne regne støkiometrisk luftmengde for en gass, må gassens komposisjon være kjent. Naturgass er fossile hydrokarboner som er hentet opp av underjordiske reservoarer, separert og tørket. Naturgassens gjennomsnittlige sammensetning er avhengig av hvor gassen er hentet ut og hvor den er prosessert. Naturgassen fra Nordsjøen er av høy kvalitet [55] med stor andel metan. I tillegg til metan inneholder gassen tyngre hydrokarboner som etan, propan, butan, pentan, osv, samt noen inerte gasser som nitrogen og karbondioksid.

Naturgassen kan regnes som en gassblanding bestående av  $k$  rene, ikke-reagerende gasser, det være seg metan, etan, propan, osv. Gassblandingen komposisjonen er målt i volumprosent, som er tilsvarende molprosent. Gassblandingen ekstensive egenskaper, det vil si egenskaper som er avhengige av systemets størrelse, slik som masse, volum og energi, kan beregnes massespesifikt ved:

$$\Theta_m = \sum_{i=1}^k m_f \Theta_i \quad (2.11)$$

hvor  $\Theta$  er en vilkårlig massespesifikk ekstensiv egenskap og massefraksjonen  $m_f$  bestemmes av den  $i$ -ende gassens volumfraksjon  $y_i$  og molarmasse  $M_i$  samt gassblandingen molare masse  $M_m$  ved ligningen:

$$m_f = \frac{y_i M_i}{M_m} \quad (2.12)$$

hvor  $M_m = \sum_i^k y_i M_i$ . En forutsetning for at naturgassen kan regnes som en ikke-reagerende blanding av rene gasser er at den oppfører seg som en ideell gass. Om gassen er tilnærmet ideell kan undersøkes ved gassens reduserte trykk  $P_r = P/P_{cr}$  og temperatur  $T_r = T/T_{cr}$ . Dersom gassen har et redusert trykk  $P_r \ll 1$  vil gassen oppføre seg som en ideell gass uavhengig av temperatur. På samme måte kan gassen antas å oppføre seg som en ideell gass uavhengig av trykk dersom  $T_r > 2$  (untatt hvis  $P_r \gg 1$ ) [56]. Dersom gassen ikke oppfyller kravene over må kompressibilitetsfaktoren  $Z$  bestemmes ved å bruke et kompressibilitetsdiagram. Dersom  $Z$  er omtrentlig 1 er det mulig å estimere gassens egenskaper som egenskapene til en ideell gass.

Hver av de rene gassene som inngår i naturgassen har en unik  $O_{2,min}$  som er nødvendig for fullstendig forbrenning. Denne mengden er avhengig av antall karbonatomer  $n$  og hydrogenatomer  $m$  gassen er sammensatt av. Den totale mengden  $O_2$  som behøves for fullstendig forbrenning beregnes som en ekstensiv egenskap av gassen. Formelen for beregning av støkiometrisk  $O_2$  kan utledes fra ligning 2.8, og skrives på generell form som:

$$O_{2,min} = \sum_{i=1}^k y_i \left( n_i + \frac{m_i}{4} \right) \quad (2.13)$$

for en gass bestående av  $k$  forskjellige rene gasskomponenter.

Oksygenmengden er i dette tilfellet beregnet på på bakgrunn av brennstoffets volumetriske sammensetning og oppgis i mol oksygen/mol brennstoff eller  $m^3$  oksygen/ $m^3$  brennstoff.

Naturgassens forbrenningsentalpi beregnes som summen av gassforbruket  $\dot{m}_g$  og naturgassens lavere brennverdi  $LHV_g$ .

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g LHV_g \quad (2.14)$$

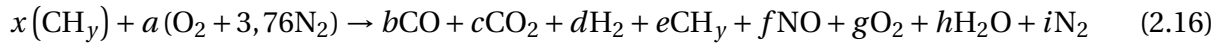
LHV beregnes også som en ekstensiv egenskap av naturgassen ved:

$$LHV_g = \sum_{i=1}^k \frac{y_i M_i}{M_g} LHV_i \quad (2.15)$$

hvor  $y_i$ ,  $M_i$  og  $LHV_i$  er henholdsvis molandelen, molarmassen og lavere brennverdi tilhørende gasskomponenten  $i$  og  $M_g$  er gassblandingens molarmasse

Forbrenning av naturgassen resulterer, som nevnt, i produksjon av eksosgass. Energien i

denne eksosgassene er avhengig av eksosgassens temperatur. Eksosgassens sammensetning og temperatur er generelt vanskelig å forutse på grunn av kompliserte prosesser i stempelmotorens forbrenningsrom. Men de kan på den annen side ganske enkelt måles med en gassanalysator. Ut i fra de målt volumetrisk sammensetning er det mulig å sette opp ligningen:



hvor  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$ ,  $h$  og  $i$  er fraksjonene av de forskjellige gassartene i eksosgassen.  $x$  og  $a$  er henholdsvis fraksjonene reaktanter og koreaktanter. Den volumetriske komposisjonen til eksosgassene er lik den molare komposisjonen, dvs komposisjonen i  $\text{vol}_i / \text{vol}_{\text{tot}}$  er lik  $\text{mol}_i / \text{mol}_{\text{tot}}$ . Ved å anta at det dannes 100 kmol tørr eksosgass, er det mulig å sette opp balansene:

$$\text{C-balanse:} \quad x = b + c + e \quad (2.17a)$$

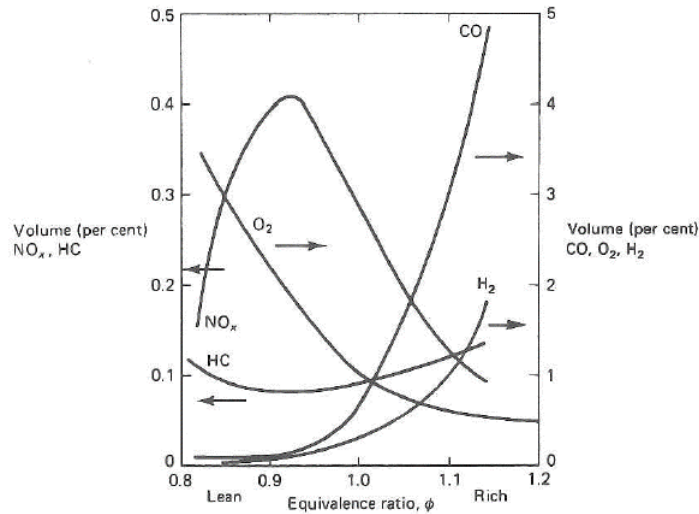
$$\text{H-balanse:} \quad x = 2d + e + 2h \quad (2.17b)$$

$$\text{O-balanse:} \quad a = 2b + c + 2f + g + 2h \quad (2.17c)$$

$$\text{N-balanse:} \quad 3,76a = 2f + i \quad (2.17d)$$

De fire ligningene over inneholder fem ukjente. For å løse ligningene må derfor en ukjent elimineres. Figur 2.14 viser utslipp av  $\text{NO}_x$ , HC, CO,  $\text{O}_2$  og  $\text{H}_2$  som funksjoner av ekvivalensforholdet  $\phi$ , som er en den inverse av luftoverskuddstallet  $\lambda$ . Fra figuren kan det leses at  $\text{H}_2$ -prosenten nærmer seg null ved svakere blandinger (lav  $\phi$ ). Gassmotoren i denne oppgaven går med  $\lambda$  mellom 1,2 og 1,5, tilsvarende  $\phi$  mellom 0,83 og 0,67. Måling av eksosgassens komposisjon er gjort etter katalysator, så stempelmotoren vil i realiteten gå med et høyere luftoverskudd, ettersom noe oksygen blir brukt til etter-oksidering av CO og UHC. Ved disse verdiene vil  $\text{H}_2$ -prosenten være tilnærmet lik null. Med  $d = 0$  er nå ligningen 2.17b løselige, og dermed også de øvrige.

Andelene CO og UHC tyder på at forbrenningen ikke har vært fullstendig, og at det dermed vil være et energitap i form av kjemisk energi i avgassene[26]. Utslipp av CO, UHC og  $\text{NO}_x$  er avhengige av blant annet tenningstidspunkt, last, hastighet og luft-brennstoff-forholdet i sylinder. Karbonmonoksid (CO) dannes ved dissosiasjon, ufullstendig forbrenning eller ved slukkeeffekter ved veggene i forbrenningsrommet. Kalde vegger i forbrenningsrommet er også en kilde til



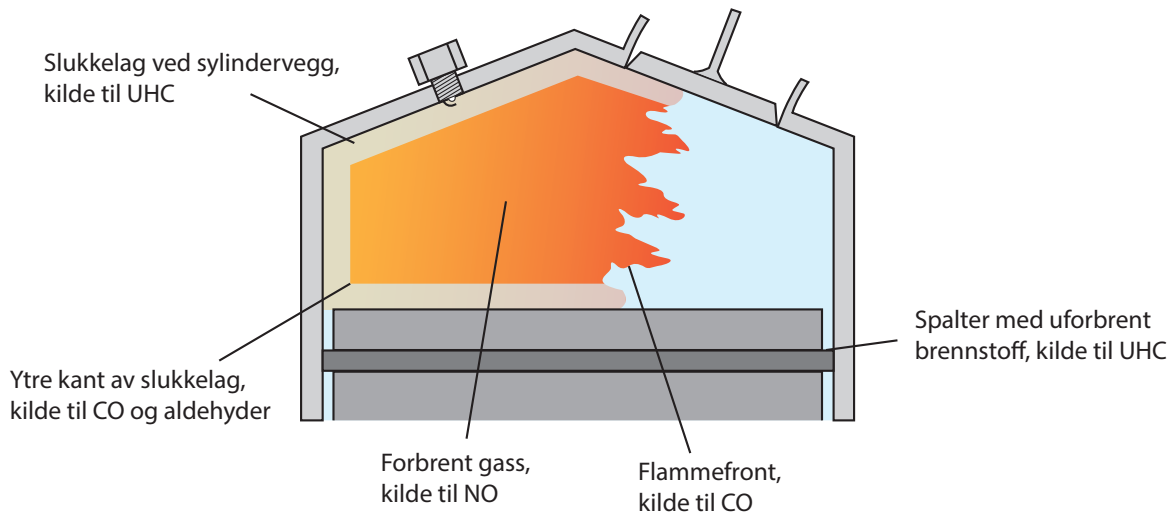
Figur 2.14: Utslipp fra en SI motor ved forskjellige luftoverskuddstall [26]

uforbrente hydrokarboner (UHC). En annen kilde til UHC er små spalter eller kløfter i forbrenningsrommet hvor flammen ikke når frem (se figur 2.15). Dannelsen av nitrogenoksider ( $\text{NO}_x$ ) er en prosess uavhengig av drivstoffkomposisjon.  $\text{NO}_x$  kan sees på som "brent" luft. Prosessen krever nitrogen, oksygen, høy temperatur og tid. I tilfellet hurtigående *lean*-motor vil derfor  $\text{NO}_x$ -utslippene være forholdsvis små.

Den kjemiske energien som går tapt ved utslipp av karbonmonoksid kan beregnes ut i fra den molare reaksentalpien til CO, gitt ved 25 °C ( $\Delta H_0$ )<sub>CO</sub> = -283,0 MJ/kmol. Den prosentvise mengden kjemisk energi som medfølger utslipp av CO kan ut i fra ligning 2.16 bestemmes ved[26]:

$$e_{\text{CO}}^{\text{kjem}} = \frac{283,0 \cdot b}{\text{LHV}_g \cdot (b + c + e) \cdot (12 + y + 16z)} \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Vanligvis, for drift med flytende brennstoff, kan bidrag av kjemisk energi fra uforbrente hydrokarboner neglisjeres [26], men ved gassdrift vil UHC-utslipp være forholdsvis store og kan ikke neglisjeres. Dette på grunn av gassens flyktighet. Den kjemiske energien som medfølger utslipp av UHC kan bestemmes ved å anse den som "ubrukt forbrenningsentalpi". Energien som følger utslipp av UHC bestemmes ved forholdet mellom masse UHC i eksosen og masse brennstoff forbrukt. Komposisjonen til brennstoff og UHC antas å være den samme, følgelig vil den molare massen også være den samme, og masseforholdet kan erstattes med et molforhold. Gitt ligning



Figur 2.15: Kilder til utslipp i forbrenningsrommet til en SI motor[26]

2.16 med samme premiss om 100 kmol tørre produkter kan den prosentvise mengden kjemisk energi som medfølger utslipp av UHC bestemmes ved

$$e_{\text{UHC}}^{\text{kjem}} = \frac{e}{b + c + e} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Den totale kjemiske energien som forgår som "ubrukt forbrenningsentalpi" i eksosen kan til slutt bestemmes ved:

$$e_e^{\text{kjem}} = (e_{\text{CO}}^{\text{kjem}} + e_{\text{UHC}}^{\text{kjem}}) \cdot \text{LHV}_g \quad (2.20)$$

hvor LHV er brennstoffets forbrenningsentalpi.

I tillegg til kjemisk energi inneholder eksosgassene termisk energi tilført i forbrenningsprosessen. Denne energien er lik forskjellen mellom luftens strømningsentalpi inn (naturgassen strømningsentalpi er neglisjerbar) og eksosgassens strømningsentalpi ut. Forandring i strømningsentalpier avhengig av luften og eksosens temperaturer og spesifikke varmekapasiteter. Spesifikk varmekapasitet er temperaturavhengig og kan beregnes ved en polynomfunksjon (se Vedlegg D) ut i fra målt temperatur. Forbrenningsenergien som forlater enheten medfølgende eksogas-



sen skrives dermed

$$\dot{E}_e = \dot{m}_g e_e^{\text{kjem}} + \dot{m}_e c_{p,e} T_e - \dot{m}_a c_{p,a} T_a \quad (2.21)$$

### 2.4.1 Modellering av stempelmotorer

Stempelmotoren er et meget komplekst system, med blant annet diskret forbrenning i fire sylindere. Toyota 3Y motoren som anvendes i CHP-enheten som analyseres i denne oppgaven er en gassdrevet stempelmotor med fremmedtenning, en såkalt SI-motor. Analyse av en SI-motor er basert på flere empiriske relasjoner. I bunn for disse relasjonene ligger den ideelle Otto-syklusen.

Ideelle sykluser er viktige hjelpemiddel i analysen av termiske maskiner. Ideelle kraftsykluser består av en flere forenklede prosesser som gir en enkel termodynamisk modell av kraftproduksjon med termiske maskiner.

Otto-syklusen er oppkalt etter Nikolaus A. Otto, som er krediterte for å ha bygget den første fungerende firetaktsmotoren med fremmedtenning i 1876 [26]. Den ideelle syklusen består av fire internt reversible prosesser:

**1-2** Isentropisk kompresjon

**2-3** Konstant-volum varmetilførsel

**3-4** Isentropisk ekspansjon

**4-1** Konstant-volum varmebortførsel

Virkelige motorsykluser vil generelt skille seg fra ideelle sykluser. I reell prosessanalyse brukes de ideelle syklusene sammen med empiriske modeller for å nærme seg en den virkelige prosessen. I en modell av en reell stempelmotor inngår en sammensetning av flere mindre empiriske modeller for bl.a. kompresjon og ekspansjon av reell gass, varmefrigivelse fra forbrenning, varmeovergang i sylindere osv.

### Én-sone modellen

Den enkleste modellen for sammenhengen mellom varmegivelse og varmeovergang i sylindere er *én-sone* modellen, hvor hele cylindervolumet antas å bestå av én sone fylt med en homogen gassblanding ved temperaturen  $\bar{T}_g$ .

Gassblandingen i sylindere antas å oppføre seg som en ideell gass, og relasjonen mellom trykk volum og temperatur i cylindervolumet kan følgelig skrives som:

$$PV = mRT \quad (2.22)$$

hvor trykket  $P$ , volumet  $V$  og temperaturen  $T$  er funksjoner av veivinkelen  $\theta$ . Som nevnt tidligere baseres modeller av reelle sykluser på diskrete ligningssett som løses stegvis. I et slikt stegvist forløp er det nødvendig å vite forandringen til systemets egenskaper ved  $\theta_{i-1}$  for å kunne beregne deres verdi ved  $\theta_i$ . Relasjonen for forandring i trykk kan finnes ved å derivere ligning 2.22.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{-P}{V} \frac{dV}{d\theta} + \frac{P}{T} \frac{dT}{d\theta} \quad (2.23)$$

For enkelhets skyld antas kompresjon og ekspansjon av gassen å være isentropisk. Relasjoner for isentropiske kompresjon og ekspansjon oppnås ved å sette generert entropi lik null. Entropigenerering lik null betyr at det ikke utveksles hverken masse eller varme mellom systemet og omgivelsene. De enkleste relasjonene for isentropiske prosesser oppnås ved å anta konstante spesifikke varmekapasiteter. Disse relasjonene gir en tilnærming til løsningen, med større og større nøyaktighet jo nærmere tilstand én og to er hverandre. Dvs. nøyaktigheten til antagelsen om isentropisk kompresjon og ekspansjon er avhengig av oppløsningen til  $\theta$ .

Forholdet mellom trykk og volum i cylindere kan ved isentropisk kompresjon og ekspansjon uttrykkes ved:

$$PV^\gamma = \text{konstant} \quad (2.24)$$

hvor  $\gamma$  er forholdet mellom luftens spesifikke varmekapasiteter  $c_p$  og  $c_v$ .

På grunn av høye temperaturgradienter i stempelmotoren er det ønskelig med øyeblikkelige spesifikke varmekapasiteter. Varmekapasiteter er generelt avhengige av temperatur. Denne avhengigheten kan estimeres ved en polynomfunksjon. En slik polynomfunksjon for forbren-

ningsprosesser med hydrokarboner er utviklet av Krieger og Borman[57]. I deres metode beregnes forandringer i indre energi ved korreksjonsfaktorer korrensponderende til forandringer i temperatur i forhold til en referansetemperatur. Se Vedlegg E for mer om metoden.

En stempelmotorer ansees termodynamisk som et åpent system med masse- og energigjennomstrømning. Når motorens sylinder simuleres i kraftslaget, sees den på som et lukket system. Energibalansen til sylindere som system kan dermed skrives ved:

$$dQ - dW = dU \quad (2.25)$$

hvor  $dQ$  er netto varmetilførselsrate fra drivstoffet,  $dW$  er trykk-volumarbeidet utført av sylindergassen og  $dU$  er forandring i indre energi i sylindergassen, beregnet ved  $dU = mc_v dT$ . Netto varmetilførselsrate og trykk-volumarbeidet per veivinkel kan skrives som:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dQ_b}{d\theta} - \frac{dQ_w}{d\theta} \quad (2.26a)$$

$$\frac{dW}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} \quad (2.26b)$$

hvor  $dQ_w/d\theta$  er raten av varmeovergang til sylinderveggene. En netto varmetilførsel i sylindere vil resultere i en proporsjonal økning i temperatur. Temperaturøkningen og korresponderende trykkøkning kan uttrykkes ved ligningene:

$$\frac{dT}{d\theta} = T(\gamma - 1) \left[ \frac{1}{PV} \frac{dQ}{d\theta} - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} \right] \quad (2.27a)$$

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{-\gamma P}{V} \frac{dV}{d\theta} + \frac{\gamma - 1}{V} \left[ Q_{\text{inn}} \frac{dx_b}{d\theta} + \frac{dQ_w}{d\theta} \right] \quad (2.27b)$$

Én-sone modellen bruker typisk *Wiebe-funksjonen* for å estimere massefraksjon forbrent som funksjon av veivinkel  $\theta$ . Funksjonen estimerer varmefrigivelsen med en S-kurve som beregnes på basis av variablene: tenningsstidspunktet  $\theta_0$  og forbrenningsperioden  $\theta_d$ , samt para-

metrene  $a_{\text{wie}}$  og  $w_{\text{exp}}$ . Kurven beregnes ved formelen:

$$x_b = 1 - \exp \left[ -a_{\text{wie}} \left( \frac{\theta - \theta_0}{\theta_d} \right)^{w_{\text{exp}} + 1} \right] \quad (2.28)$$

I stempelmotorer med fremmedtenning er *Wiebe-eksponenten*  $w_{\text{exp}}$  vanligvis lik 2 [58]. Parameteren  $a_{\text{wie}}$  velges slik at den estimerte S-kurven passer til forbrenningsperioden  $\theta_d$ . Varmefrigivelsesraten  $dQ_b/d\theta$  er forbrenningsvarmen som frigis fra drivstoffet per veivinkel, og beregnes som produktet av den totale tilførte forbrenningsvarmen  $Q_g = m_g \text{LHV}_g$  og varmfri-givelsesraten.

$$\frac{dQ_b}{d\theta} = Q_g \frac{dx_b}{d\theta} \quad (2.29)$$

Varmeovergang i sylindere foregår mellom gassblandingen og veggene i sylindere. Varmeovergangen foregår ved både konveksjon og stråling. Begge disse varmeovergangsprosesser tilnærmes for varmeovergang i sylindere med én ligning.

$$\partial Q_w = (h_c + h_r) A_w (T - T_w) dt \quad (2.30)$$

hvor  $h_r$  er varmeovergangskoeffisienten for stråling og  $h_c$  er varmeovergangskoeffisienten for konveksjon. Varmeovergang ved stråling er proporsjonalt med temperaturdifferansen i fjerde. For å passe inn i ligning 2.30 tilnærmes derfor koeffisienten for varmeovergang ved stråling med:

$$h_r = 4,25 \cdot 10^{-9} \left( \frac{T^4 - T_w^4}{T - T_w} \right) \quad (2.31)$$

Varmeovergangskoeffisienten for konveksjon beregnes ut i fra Annands korrelasjon for varmeovergang i sylindere. I denne korrelasjon tilnærmes den gjennomsnittlige lufthastigheten i sylindere med den gjennomsnittlige stempelhastigheten  $\bar{S}_p$ . Annands korrelasjon skrives matematisk:

$$\text{Nu} = a \text{Re}^b = \left( \frac{h_c B}{k} \right) = a \left( \frac{\rho \bar{S}_p B}{\mu} \right)^b \quad (2.32)$$

hvor  $B$  er boringen til forbrenningsrommet. Koeffisienten for sylindergassens varmelednings-eвне  $k$  og sylindergassens dynamiske viskositet  $\mu$  kan uttrykkes som polynomfunksjoner av temperaturen  $T$  (se Vedlegg D). Veggarealet som varmeovergangsprosessen foregår ved er det

synlige arealet som funksjon av veivinkelen, gitt i Likning 2.37b.

I ligning 2.32 relateres Nusselt-tallet og Reynolds-tallet til hverandre. Nusselt-tallet er forholdet mellom varmeovergang ved konveksjon og konduksjon over en systemgrense. Reynolds-tallet er et mål på om strømningsmønsteret til et fluid er laminært eller turbulent. Reynolds-tallet beregnes som forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter i fluidet. Det er tydelig at gasshastigheten i sylinder spiller en viktig rolle ved varmeovergang mellom sylindergass og sylindervegg. En alternativ beregningsmetode for konveksjonskoeffisienten i ligning 2.30 er Woschnis korrelasjon for varmeovergang i sylinder.

$$h = 3,26 \cdot B^{-0,2} P^{0,8} T^{-0,55} \nu^{0,8} \quad (2.33)$$

hvor  $\nu$  er gjennomsnittlig gasshastighet i sylinderen. Woschnis korrelasjon er mye brukt i reell prosessanalyse.

For enkelhets skyld er Annands korrelasjon brukt i denne oppgaven.

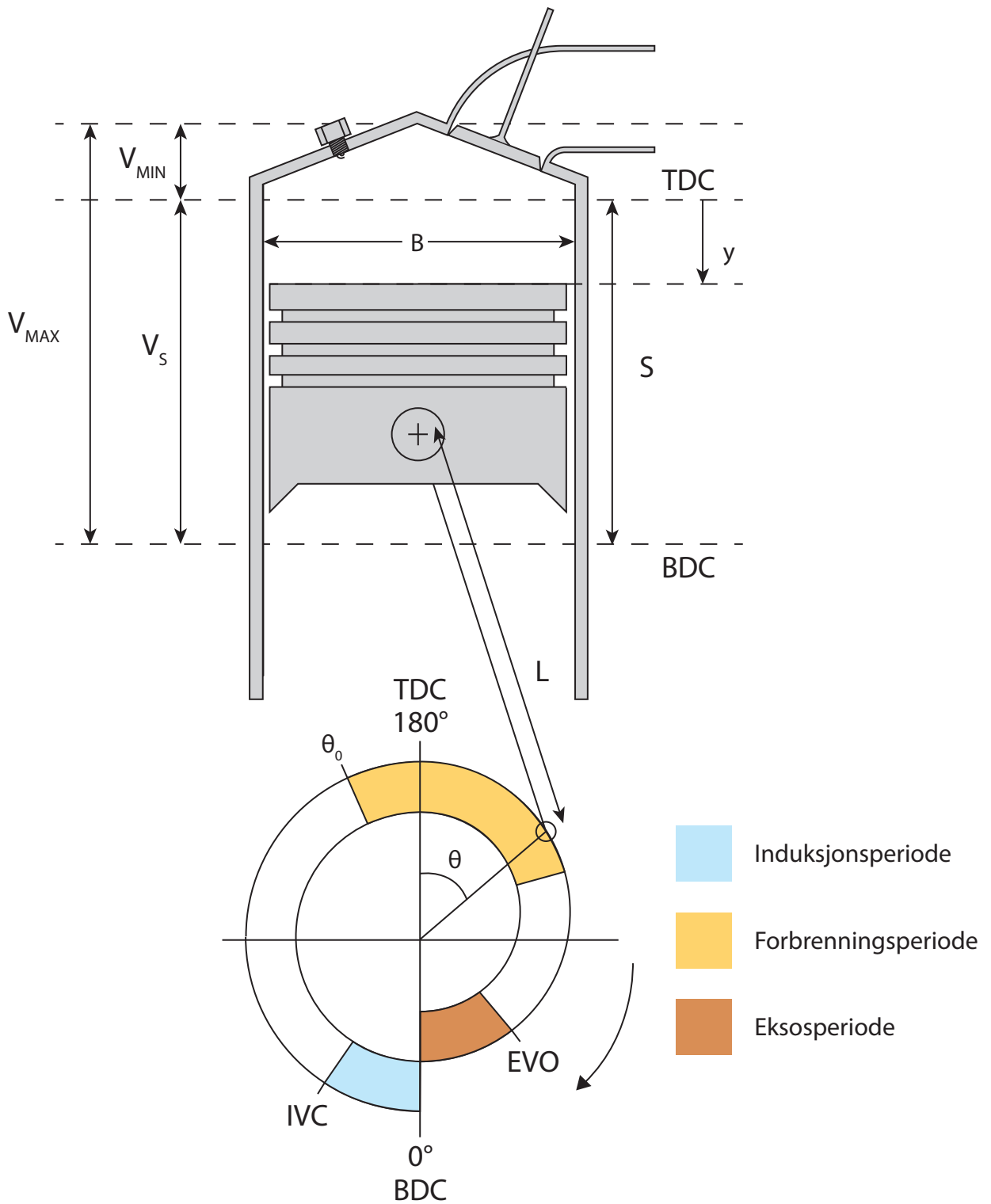
### Slider-Crank modellen

Sylinderens geometri som funksjon av veivinkel modelleres, uavhengig av modeller for varmeutvikling i sylinder, ved Slider-Crank modellen. Figur 2.16 illustrere et kileformet forbrenningsrom med innsug- og eksosventiler på samme side, som i Toyota 3Y-motoren. Forbrenningsrommets geometri karakteriseres av flere parametre:

- Slaglengden  $S$ , som er avstanden mellom øvre dødpunkt (TDC) og nedre dødpunkt (BDC),
- boringen  $B$ , som er diameteren i forbrenningsrommet,
- lengden  $L$ , som er lengden på veivstangen mellom stempel og veivbukt og
- slagvolumet  $V_s$  er volumet som stempelet fortrenger i hvert slag.

Motorens slagvolum oppgis ofte i datablad. Dersom dette ikke er tilfellet kan det beregnes fra oppgitt boring og slaglengde ved:

$$V_s = \frac{\pi}{4} B^2 S \quad (2.34)$$



Figur 2.16: Sylindergeometri og timingdiagram for kraftslaget.

Klaringsvolumet  $V_{\min}$  er sylindervolumet når stampelet er i øverste posisjon (TDC). Det totale volumet  $V_{\max}$  er sylindervolumet når stampelet er i nederste posisjon (BDC). I nederste posisjon er sylindervolumet lik summen av klaringsvolumet og slagvolumet. Forholdet mellom det totale volumet og klaringsvolumet uttrykkes ved kompresjonsforholdet  $r$ . Det totale volumet og klaringsvolumet kan dermed uttrykkes ved kompresjonsforholdet og slagvolumet ved:

$$V_{\min} = \frac{V_s}{r-1} \quad (2.35a)$$

$$V_{\max} = \frac{V_s}{r-1} + V_s \quad (2.35b)$$

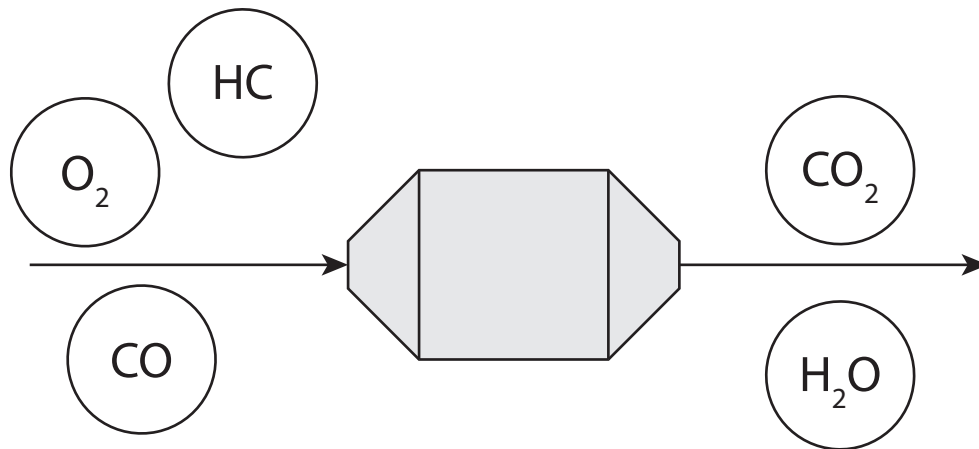
Sylinderens momentane volum er  $V(\theta)$  avhengig av stampelets momentane posisjon  $y(\theta)$ . Stampelets momentane posisjon er igjen avhengig av veivbuktens posisjon i forhold til senter av veivaksel. Stampelet er i sin øverste posisjon (TDC) når veivbukten befinner seg rett over senter av veivakselen, og i sin nederste posisjon (BDC) når veivbukten befinner seg rett under senter av veivakselen. Veivvinkelen  $\theta$  gjengir veivbuktens posisjon, og kan defineres enten i forhold til TDC eller BDC. Avstanden mellom stampelets momentane posisjon og TDC er som funksjon av veivvinkelen gitt ved:

$$y(\theta) = a + L - \left[ (L^2 - a^2 \sin^2(\theta))^{\frac{1}{2}} + a \cos(\theta) \right] \quad (2.36)$$

hvor  $a$  er avstanden mellom veivakselens senter og veivbukt, per definisjon lik halve slaget  $a = S/2$ . På samme måte som for stampelets posisjon, kan sylinderens volum og indre overflateareal også uttrykkes som funksjoner av veivinkel:

$$V(\theta) = \frac{V_s}{r-1} + \frac{V_s}{S} \cdot y(\theta) \quad (2.37a)$$

$$A(\theta) = \frac{\pi}{2} B^2 + \pi B \cdot y(\theta) \quad (2.37b)$$



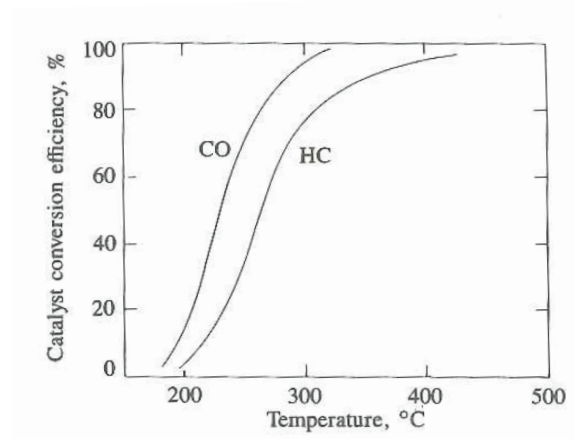
Figur 2.17: Katalytisk konverter med oksidasjon av HC og CO

## 2.4.2 Modellering av Katalysator

Forbrenningen i en stempelmotor er som nevnt ikke perfekt, og det medbringer uønskede utslipp av bl.a. CO, UHC,  $\text{NO}_x$  og partikler. For å hindre at disse slippes ut i omgivelsene er stempelmotorer flest utstyrt med enheter for etterbehandling av eksosgass. Enheter utviklet for etterbehandling inkluderer termiske reaktorer (for UHC og CO), filter (for partikler) og katalysatorer. Av katalysatorer finnes det oksidasjonskatalysatorer, for oksidasjon av CO og UHC, og reduksjonskatalysatorer, for reduksjon av  $\text{NO}_x$ . En treveis katalysator kan benyttes for etterbehandling av både CO, UHC og  $\text{NO}_x$ . Disse fungerer bare ved nær støkiometriske luft-drivstofforhold. Toyota 3Y motoren går med luftoverskuddstall mellom 1,2 og 1,5 noe som betyr at en treveis katalysator ikke er appliserbar. At motoren går med luftoverskudd betyr også at temperaturen i forbrenningsrommet er lavere og at det følgelig ikke dannes så mye  $\text{NO}_x$ . Lavere temperaturer kan på den annen side også føre til større produksjon av CO og UHC på grunn av slukkeffekter.

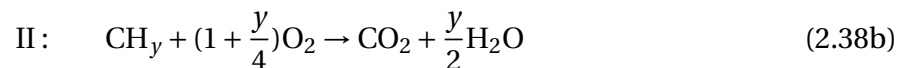
I CHP-enheten anvendes en toveis oksidasjonskatalysator. I en slik katalysator oksideres CO og UHC av overskuddsoksygen i eksosgassen ved katalytiske reaksjoner induisert av et *grid* av edelmetaller. En kombinasjon av platinum (Pt) og Palladium (Pd) er ofte brukt. For oksidering av CO og metan er den spesifikke aktiviteten for Pd høyere enn den for Pt [25]. Reaksjonene





Figur 2.18: Typisk konverteringsvirkningsgrad for en oksidasjonskatalysator [25]

indusert av edelmetallet skrives:



Virkningsgraden til en katalysator oppgis som forholdet mellom massen fjernet av en utslippsart i forhold til massestrømmen av den samme arten inn i katalysatoren. For eksempel for UHC blir dette matematisk[25]:

$$\eta_{\text{cat}} = \frac{\dot{m}_{\text{HC,in}} - \dot{m}_{\text{HC,out}}}{\dot{m}_{\text{HC,in}}} = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{HC,out}}}{\dot{m}_{\text{HC,in}}} \quad (2.39)$$

I følge EPA [59] ligger utslippsreduksjonene i en oksidasjonskatalysator vanligvis mellom 10-60% for CO og 40-75% for UHC. Disse reduksjonene er avhengige av mange parameter som utslippenes konsentrasjon, lambda, temperatur, osv. Temperatur er en av parameterne som har størst virkning. Figur 2.18 viser typiske konverteringsvirkningsgrader som funksjon av temperatur. Som det kommer frem av figuren er katalysatoren ineffektiv ved lave temperaturer. Temperaturen som gir 50% konverteringsvirkningsgrad kalles katalysatorens *light-off* temperatur. Når CO og UHC oksideres dannes det varme. Denne varmen vil øke eksosgassens entalpi, og dermed også dens temperatur. Konverteringsprosessen er i hovedtrekk den samme som forbrennings-

prosessen, og den spesifikke frigjorte energien er dermed lik gassartene forbrenningsentalpi. Katalysatoren antas å være adiabatisk og det antas at all frigjort energi går til oppvarming av eksosgassene. Endring i entalpi kan dermed beregnes ved:

$$\dot{Q}_{\text{kat}} = \Delta \dot{m}_{\text{CO}} \cdot \text{LHV}_{\text{CO}} + \Delta \dot{m}_{\text{UHC}} \cdot \text{LHV}_{\text{UHC}} \quad (2.40)$$

Endring i temperatur er proporsjonal med endring i entalpi ved:

$$\dot{Q}_{\text{kat}} = \dot{m}_e c_{p,e} \Delta T \quad (2.41)$$

hvor  $c_{p,e}$  er den gjennomsnittlige spesifikke varmekapasitetene mellom temperaturene før katalysator og etter katalysator.

### 2.4.3 Energianalyse av ORC-krets

Energianalyse av ORC er avhengig av valg gjort under design av kretsen, samtidig som design av kretsen er avhengig av energianalyse av ORC. Dette gjør analysen til en iterativ prosess hvor flere arbeidsfluid, konfigurasjoner og komponenter undersøkes. ORC beregnes ved Rankine-syklusen. Den enkle, ideelle Rankine-syklusen består i fire prosesser:

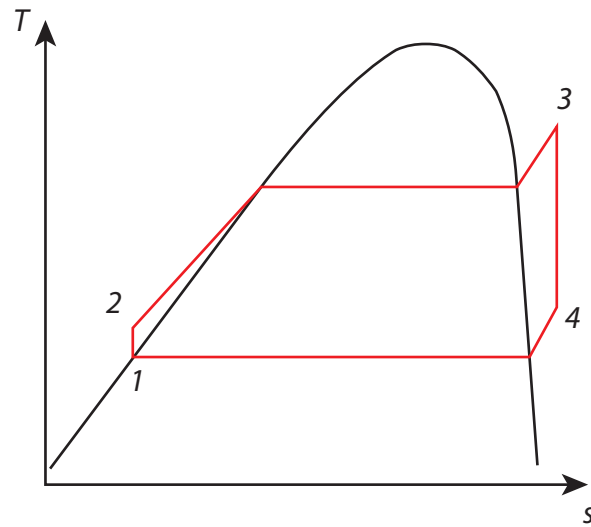
**1-2** Isentropisk kompresjon i pumpe.

**2-3** Konstant-trykk varmetilførsel.

**3-4** Isentropisk ekspansjon i ekspander.

**4-1** Konstant trykk varmebortførelse.

Fluidet entrer pumpen som mettet væske i tilstand 1 (se figur 2.19). I pumpen økes arbeidsfluidets trykk isentropisk til tilstand 2. Etter pumpen entrer fluidet fordamperen. Her tilføres fluidet varme ved konstant trykk, og temperatur og entropi økes til tilstand 3. Etter fordamper entrer fluidet ekspanderen. Her ekspanderes fluidet isentropisk til sitt opprinnelige trykk. Mellom tilstand 4 og tilstand 1 fjernes varme fra fluidet ved konstant trykk, og det entrer igjen pumpen som mettet væske i tilstand 1.



Figur 2.19: Eksempel på Ts-diagrammet til en enkel ORC.

I reelle prosesser vil det alltid være entropigenerering. Pumpe og ekspander vil følgelig inneha isentropiske virkningsgrader. Den isentropiske virkningsgraden til en pumpe beregnes ved:

$$\eta_{\text{iso}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.42)$$

I ekspander er det produksjon av arbeid i stedet for konsum av arbeid. Definisjonen av ekspanderes virkningsgrad er dermed omvendt av virkningsgraden for pumpe.

$$\eta_{\text{iso}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.43)$$

Arbeidet som konsumeres i pumpen beregnes ved:

$$w_{\text{pumpe}} = h_2 - h_1 \quad (2.44)$$

Varme tilført i fordampere beregnes ved:

$$q_{\text{inn}} = h_3 - h_2 \quad (2.45)$$

Arbeid produsert i ekspander beregnes ved:

$$w_{\text{eksp}} = h_3 - h_4 \quad (2.46)$$

Varme bortført i kondenser beregnes ved:

$$q_{\text{ut}} = h_4 - h_1 \quad (2.47)$$

Rankine-syklusens termiske virkningsgrad beregnes som forholdet mellom netto produsert arbeid og forbrukt arbeid ved:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{eksp}} - w_{\text{pumpe}}}{q_{\text{inn}}} \quad (2.48)$$

## 2.5 Eksergianalyse

Analyse av arbeidspotensialet til et system kalles eksergianalyse. Eksergi er en ekstensiv egenskap i likhet med energi og entropi. Navnet eksergi ble tatt i bruk av Rant i 1956 for å skape assosiasjoner til energi på grunn av likheten mellom de to egenskapene. Eksergi har gjennom tidene også gått under bl.a. navnene: *motivity*, *available energy*, *the body and medium* og *virtue of energy*[60]. Nå omtales den gjerne som: tilgjengelig arbeid, tilgjengelighet eller arbeidspotensiale, dersom det skal brukes et mer dagligdags språk. Eksergianalyse er en kombinasjon av første og andre lovs analyse. Arbeidspotensialet til energien i et system ved en spesifisert tilstand er det maksimale brukbare arbeidet som kan tas ut av systemet. Arbeidet som utføres av et system under en prosess er avhengig av: systemets opprinnelige tilstand, prosessens bane og systemets slutttilstand. Maksimale arbeid oppnås når prosessen mellom den opprinnelige tilstanden og slutttilstanden utføres reversibelt og systemet oppnår *dead state* ved prosessens slutt. Den opprinnelige tilstanden til systemet er alltid spesifisert ved eksergianalyse og er derfor ikke en variabel. Når et system oppnår termisk likevekt med miljøet sies det å være i *dead-state*. Miljøet er dermed en viktig del av eksergianalyse, ettersom det fungerer både som fysiske- og kjemiske referansetilstander.

Termodynamikkens andre lov har blitt beskrevet på flere måter. En av beskrivelsene av termodynamikkens andre lov er Kelvin-Planck beskrivelsen. I følge Kelvin-Planck beskrivelsen er det

umulig for et system å operere i en termodynamisk syklus og levere en netto mengde energi til sine omgivelser, mens det mottar varme fra et enslig termisk reservoar. Matematisk blir dette[7]

$$W_{\text{syklus}} \leq 0 \quad (\text{enslig reservoar}) \quad (2.49)$$

En reversibel prosess defineres ved at det er mulig å gjenopprette systemet til sin opprinnelige tilstand før prosessen. Dersom en prosess er irreversibel vil det være umulig å gjenopprette systemet. Mange effekter kan gjøre en prosess irreversibel. Blant annet: varmeovergang gjennom en endelig temperaturdifferanse, spontane kjemiske reaksjoner, blanding av substanser ved forskjellige komposisjoner eller forskjellige tilstander og friksjon. Begrepet irreversibiliteter brukes til å identifisere slike effekter. Når et system undergår en prosess hvor irreversibiliteter er tilstede vil systemets evne til å utføre arbeid gå ned. Med andre ord vil eksergi bli ødelagt i en irreversibel prosess. Når et system går fra en tilstand av mye eksergi til en tilstand av mindre eksergi, kan det sies at systemets har gått fra en tilstand av høy orden til en tilstand av lavere orden. I alle reelle prosesser vil det være irreversibiliteter, det vil si at alle systemer som gjennomgår en prosess vil gå fra en tilstand av høyere orden til en tilstand av lavere orden. Gjennom statistisk termodynamikk er det utviklet et begrep som indikerer ordenen (evt. uordenen) i et system. Dette begrepet kalles entropi. Et system som gjennomgår en prosess vil alltid gå i retning av høyere entropi i systemet og/eller omgivelsene. Dette betyr at generert entropi har samme betydning som ødelagt eksergi. Begrepene ødelagt eksergi og generert entropi relateres matematisk ved[7]

$$\dot{X}_{\text{ødelagt}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \quad (2.50)$$

hvor  $T_0$  er omgivelsetemperaturen. Generert entropi identifiseres ved andre lovs analyse, som igjen utføres på bakgrunn av energiflytene i systemet. Det er derfor nødvendig å utføre både første- og andre lovs analyse av et termodynamisk system før eksergiflytene kan identifiseres.

### 2.5.1 Andre lovs analyse

Termodynamikkens andre lov fører til definisjonen av egenskapen entropi. I motsetning til energi er ikke entropi en konserverte egenskap, men en egenskap som alltid vil øke i reelle prosesser.

Matematisk kan prinsippet om entropiøkning uttrykkes [56]

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (2.51)$$

hvor likhetstegnet gjelder for reversible prosesser og ulikhetstegnet gjelder for irreversible prosesser. Temperaturen  $T$  i ligning 2.51 er temperaturen ved systemgrensen hvor varmeovergangen  $\delta Q$  foregår. Irreversible prosesser inneholder som nevnt irreversibiliteter som friksjon osv. Disse irreversibilitetene bidrar til en entropigenerering denotert  $S_{\text{gen}}$ . Generert entropi beregnes som den totale forandring i et system samt dets omgivelser:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{omg}} \geq 0 \quad (2.52)$$

Prinsippet om entropiøkning tilsier altså ikke at endringen i entropi i et system ikke kan være negativ, men at den totale entropiendringen for et system og dets omgivelser alltid vil være positiv i irreversible prosesser. Entropi er en ekstensiv egenskap, og systemets entropi kan dermed beregnes som summen av entropiene til systemets deler. Entropien tilhørende en masse kan forandres ved: varmeovergang og irreversibiliteter. Følgelig vil entropien til en masse ikke forandre seg i en prosess som er intern reversibel og adiabatisk. En slik prosess kalles en isentropisk prosess, en type prosess som ligger til grunne for flere ideelle sykluser. Entropibalansen system er lik på energibalansen til et system, med unntak av leddet for entropigenerering. Matematisk kan entropibalansen for et steady-flow system uttrykkes:

$$\dot{S}_{\text{inn}} - \dot{S}_{\text{ut}} + \dot{S}_{\text{gen}} = \frac{dS_{\text{system}}}{dt} \quad (2.53)$$

$\dot{S}_{\text{inn}}$  og  $\dot{S}_{\text{ut}}$  er entropioverganger ved enten varmeovergang eller massestrøm. Den totale entropiovergang ved varmeovergang er summen av alle endelig  $Q_k$  varmeoverføringer ved systemgrensetemperaturen  $T_k$ . Entropiovergang ved massestrøm er produktet av massestrømmen og tilhørende spesifikk entropi. For et system som kraftenheten i CHP-anlegget, hvor det er adskilte massestrømmer, så kan entropibalansen generelt uttrykkes ved:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_v(s_e - s_i) + \dot{m}_a(s_e - s_i) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (2.54)$$

For vann kan entropiendring mellom innløp og utløp beregnes ved

$$s_e - s_i = c_{p,\text{avg}} \ln \frac{T_i}{T_e} \quad (2.55)$$

Entropiendring for luft beregnes som entropiendring i en ideell gass. Dette kan utføres på to måter: ved konstante spesifikke varmekapasiteter eller ved variable spesifikke varmekapasiteter. Beregning med konstante spesifikke varmekapasiteter er en tilnærming til den eksakte løsningen som forenkler analysen på bekostning av nøyaktighet. Resultatet som oppnås ved denne beregningsmetoden vil være tilstrekkelige dersom temperaturområdet ikke overskrider noen hundre grader. Entropiendring for en ideell gass med konstante spesifikke varmekapasiteter skrives matematisk:

$$s_e - s_i = c_{p,\text{avg}} \ln \frac{T_i}{T_e} - R \ln \frac{P_e}{P_i} \quad (2.56)$$

## 2.5.2 Omgivelser

Omgivelsene til et system er per definisjon alt utenfor systemet. Omgivelsene kan deles inn i to deler: de umiddelbare omgivelsene til systemet og miljøet. Forskjellen mellom de to delene er at de umiddelbare omgivelsene til systemet påvirkes av varmeutveksling med systemet, mens miljøet forblir upåvirket. I miljøet er den fysiske og kjemiske tilstanden alltid konstant, dvs miljøets tilstand vil aldri la seg påvirke av utveksling av varme eller masse med systemet.

CHP-enheten er et system som hele tiden avgir varme til omgivelsene sine. De umiddelbare omgivelsene i dette tilfellet er innsiden av testcontaineren som enheten står i. Som følge av dette vil luften inne i containeren varmes opp og det vil være en forskjell i de umiddelbare omgivelsenes- og miljøets termo-mekaniske tilstand. For miljøet er det vanlig å oppgi termo-mekanisk- og kjemisk tilstand i henhold til standardiserte temperaturer, trykk og gasskomposisjoner. Vanligvis brukes en temperatur på 25 °C og et trykk på 1 atm. Gasskomposisjonen i miljøet er ofte tilnærmet den gjennomsnittlige tørre volumetriske sammensetningen i atmosfæren. Luft helt uten fuktighet og temperaturer på 25 °C oppstår sjelden i Bergensområdet. Det vil derfor være ønskelig å definere et miljø som er nærmere de faktiske forholdene i området. I tillegg til variasjoner i temperatur og luftfuktighet, vil det også være variasjoner i trykk.

Tabell 2.1: En oversikt over tilstander brukt til beregning.

|           | Standard referansetilstand<br>(Referanse) | Lokal referansetilstand<br>(Miljø) | Umiddelbare omgivelser<br>(Container) |
|-----------|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| $T$ [°C]  | 25  | 5,7                                | 23,75                                 |
| $P$ [kPa] | 101,325                                   | 100,92                             | 100,92                                |
| Formel    | Komposisjon [mol%]                        |                                    |                                       |
| $N_2$     | 76.37                                     | 77.74                              | 77.74                                 |
| $O_2$     | 20.49                                     | 20.86                              | 20.86                                 |
| $H_2O$    | 2.189845                                  | 0.435273                           | 0.435273                              |

De fleste tabulerte termo-kjemiske data er oppgitt for standard referansetilstand med temperatur  $T = 25$  °C, trykk  $P = 101,325$  kPa og relativ fuktighet  $RF = 0\%$ . Å anta at det ikke er noe hydrogen i luften vil føre til et meget stort arbeidspotensiale for  $H_2O$ , hvilket vil være overdimensjonert, ettersom det sjelden er helt tørt. En standard referansetilstand defineres etter forslag fra Morris og Szargut med  $RF=70\%$  [61] [62]. Lokal referansetilstand kan bestemmes ut fra lokale metrologiske målinger. Tilstanden til de umiddelbare omgivelsene kan bestemmes ut i fra en temperaturmåling i testcontaineren. Trykket regnes å være det samme i miljøet og de umiddelbare omgivelsene. Den relative fuktigheten i containeren  $\phi$  beregnes ut i fra antagelsen om at mengden fuktighet i luften  $\omega$  er konstant mens luften varmes opp fra  $T_m$  til  $T_o$ . Se tabell 2.1 for en oversikt over de forskjellige referansetilstandene.

### 2.5.3 Reversibelt arbeid og irreversibiliteter

Som nevnt over er arbeidet utført av et system under en prosess avhengig av tre variabler: systemets opprinnelige tilstand, prosessens bane og systemets endelig tilstand[56], dvs.

$$\text{Arbeid} = f(\text{opprinnelig tilstand, prosessbane, endelig tilstand})$$

I eksergianalyse er alltid den opprinnelige tilstanden spesifisert og den endelige tilstanden antas alltid å være dead state. Arbeidet fra systemet er dermed avhengig av prosessbanen. Reversibelt arbeid  $W_{rev}$  er det "største brukbare arbeidet som kan produseres (eller det minste arbeidet



som må tilføres) mens et system undergår en prosess fra en spesifisert opprinnelig og endelig tilstand"[56]. Enhver forskjell mellom det reversible arbeidet  $W_{\text{rev}}$  og det brukbare arbeidet  $W_b$  kalles en irreversibilitet  $I$ . Dette kan uttrykkes matematisk som:

$$I = W_{\text{rev,ut}} - W_{u,\text{ut}} \quad (2.57)$$

Irreversibiliteten  $I$  er det samme som ødelagt eksergi. Varmekraftmaskiner kan ofte dømmes urettferdig ut fra første lovs virkningsgrad, ettersom den på sitt beste ikke vil kunne overgå den reversible virkningsgraden. For å unngå dette er det mulig å bruke andre lovs virkningsgrad til sammenligning. Andre lovs virkningsgrad er forholdet mellom varmekraftmaskinens termiske virkningsgrad og den maksimale virkningsgraden, uttrykt matematisk ved:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{th,rev}}} \quad (2.58)$$

Andre lovs virkningsgrad for en arbeidsproduserende enhet kan også skrives som forholdet mellom det brukbare arbeidet enhet gir og det maksimale (reversible) arbeidet:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{W_u}{W_{\text{rev}}} \quad (2.59)$$

#### 2.5.4 Eksergibalanse

Balansen for eksergi er som for energi og entropi basert på en netto overgang av eksergi ved arbeid, varme- eller masseovergang. Der entropibalansen inneholder et ledd for entropigenerering inneholder eksergibalansen et ledd for eksergiødeleggelse:

$$\dot{X}_{\text{inn}} - \dot{X}_{\text{ut}} - \dot{X}_{\text{ødelagt}} = \frac{dX_{\text{system}}}{dt} \quad (2.60)$$

Eksergibalansen til et system som utfører et arbeid mens det undergår en prosess med varme- og masseovergang kan oppnås ved å ganske enkelt multiplisere entropibalansen med  $T_0$  og addere den til energibalansen [60]. Resultatet er en lineær kombinasjon av entropi- og energiba-

lansen skrevet på generell form som:

$$\frac{dX_{\text{system}}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e - T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \quad (2.61)$$

Første ledd på høyre side av ligning 2.61 representerer eksergiovergang ved varmeovergang. Andre ledd på høyre side representerer eksergiovergang ved arbeid. Tredje og fjerde ledd på høyre side representerer eksergiovergang ved masseovergang, og det siste leddet representerer eksergiødeleggelsen. For et steady flow system vil eksergiendringsraten, på venstre side av ligning 2.61, være lik null. Eksergiflyten  $\phi$  ved masseovergang er summen av flere typer eksergi, på samme måte som energiflyten ved masseovergang er summen av flere typer energi. Komponentene i eksergiflyten er fysisk eksergi, kjemisk eksergi, kinetisk eksergi og potensiell eksergi[60]

$$\psi = \psi_{\text{fys}} + \psi_{\text{kjem}} + \psi_{\text{kin}} + \psi_{\text{pot}} \quad (2.62)$$

I det aktuelle systemet er endringene i kinetisk og potensiell eksergi neglisjerbare.

### 2.5.5 Fysisk eksergi

Fysisk eksergi er lik det maksimale arbeidet som kan utføres når et system går fra en spesifisert termo-mekanisk tilstand til *dead state*. Systemets og referansemiljøets termo-mekaniske tilstander er spesifisert ved temperatur og trykk, ved henholdsvis  $T, P$  og  $T_0, P_0$ . Den fysiske eksergien til en masseflyt kan beregnes ved:

$$\psi_{\text{fys}} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.63)$$

hvor  $h_0$  og  $s_0$  representerer henholdsvis entalpien og entropien til masseflyten ved *dead state*. For ideelle gasser med antatt konstante spesifikke varmekapasiteter kan ligning 2.63 skrives om til:

$$\psi_{\text{fys}} = c_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.64)$$

For flytende masser som antas inkompressible og med konstant spesifikk varmekapasitet kan Lignin 2.63 skrives om til [63]:

$$\psi_{\text{fys}} = c_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + v_m (P - P_0) \quad (2.65)$$

hvor  $v_m$  er det gjennomsnittlige spesifikke volumet mellom  $P$  og  $P_0$ .

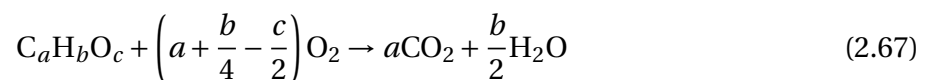
### 2.5.6 Kjemisk eksergi

Konseptet kjemisk eksergi innebærer det maksimale arbeidet som kan utføres når et system eller en masseflyt tas fra en spesifisert tilstand til en referansetilstand hvor det er komplett termodynamisk likevekt; mekanisk, termisk og kjemisk likevekt. Ved beregning av den kjemiske eksergien til en molekyl-art skiller det mellom arter som er en del av et referansemiljø og arter som ikke er en del av et referansemiljø. For atmosfæriske gasser kan den molare kjemiske eksergien uttrykkes ved [63]:

$$\psi_{\text{kjem},i} = R_u T_0 \ln y_{e,i} \quad (2.66)$$

hvor  $R_u$  er den universelle gasskonstanten,  $T_0$  er omgivelsestemperaturen og  $y_i$  er molfraksjonen av den aktuelle gassarten i et miljø som er ulikt referansemiljøet. Molfraksjonen  $y_i$  beregnes ut i fra den aktuelle gassartens molfraksjon i tørr luft og molfraksjonen  $\text{H}_2\text{O}$  i det aktuelle miljøet. Den molare kjemiske eksergien til flytende vann er ikke inkludert i beregningene ettersom vannet i CHP-anlegget tilhører en lukket krets.

For gasser som ikke-atmosfæriske gasser bestemmes den kjemiske eksergien ved å anse to reversible prosesser. Den første er en kjemisk reaksjon som skjer ved  $P_0$  og  $T_0$ , hvor gassarten  $i$  reagerer med koreaktanter fra miljøet og danner produkter som allerede finnes i referansemiljøet. Den andre prosessen består i endring av konsentrasjonen til produktene fra den første prosessen, til konsentrasjonen de ville hatt i referansemiljøet. For hydrokarbon-baserte gassformige brennstoff gjelder den generelle ligningen for reaksjon med oksygen:



Bestemmelse av den kjemiske eksergien til gassarten  $i$  i en gassblanding kan bestemmes ut

i fra ligningen:

$$\psi_{\text{kjem},i} = - \sum_{j \neq i} \nu_j g_j(T_0, P_0) + \sum_{j \neq i} \nu_j \psi_{\text{kjem},j} \quad (2.68)$$

hvor  $\nu_j$  er den støkiometriske koeffisienten for hver art i ligning 2.67, dermed er  $\nu_{\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c} = -1$ ,  $\nu_{\text{O}_2} = -(a + b/4 - c/2)$ ,  $\nu_{\text{CO}_2} = a$  og  $\nu_{\text{H}_2\text{O}} = b/2$ . Data for Gibbs frie energi oppgis ofte ved referansetilstanden  $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$  og  $P_{\text{ref}} = 101,325 \text{ kPa}$ . Omregning fra referanse tilstanden til den aktuelle tilstanden kan utføres ved:

$$- \sum_j \nu_j g_{0,j} = - \sum_j \nu_j g_{\text{ref},j} + (T_{\text{ref}} - T_0) \left( - \sum_j \nu_j s_{\text{ref},j} \right) \quad (2.69)$$

Ved å kombinere ligning 2.68, 2.69 og 2.66 er det mulig å komme frem til ligningen:

$$\psi_{\text{kjem},i} = \psi_{\text{kjem},\text{ref},i} \frac{T_0}{T_{\text{ref}}} + \frac{T_{\text{ref}} - T_0}{T_{\text{ref}}} (-\Delta H_{\text{ref}}) + T_0 R \sum_{j \neq i} \nu_j \ln \frac{y_{\text{ref},j}}{y_{e,j}} \quad (2.70)$$

hvor  $\psi_{\text{kjem},\text{ref},i}$ ,  $y_{\text{ref},j}$  og  $-\Delta H_{\text{ref}}$  er verdier ved referansetilstanden ( $T_{\text{ref}}$ ,  $P_{\text{ref}}$ ,  $\text{RF}_{\text{ref}}$ ). Den kjemiske eksergien til en en gassblanding regnes som en vanlig ekstensiv egenskap ved:

$$\psi_{\text{kjem},m} = \sum_i y_i \psi_{\text{kjem},i} + RT_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.71)$$

## 2.6 Økonomisk analyse

Fullførelsen av et termisk designprosjekt krever en økonomisk analyse og evaluering som inkluderer blant annet investeringskostnader, drivstoffkostnader, operasjons- og vedlikeholdskostnader (O& M) og produktkostnader. Forutsigelser om systemets langsiktige kostnader og besparelser/inntekter krever flere antagelser om økonomi, teknologi og lovmessig miljø. Denne seksjonen vil ta for seg estimering av systemets initielle investeringer, beregning av produktkostnader og evaluering av systemets lønnsomhet kontra andre investeringsmuligheter.

En av de viktigste faktorene som påvirker et termisk system er produktenes kostnad. Kostnaden til en vare er pengene som brukes på å tilegne seg eller produsere varen. Markedsprisen til varen er ikke bare avhengig av varens produksjonskostnad, men også faktorer som forsyning, etterspørsel, konkurranse, reguleringer og subsidier. I design av termiske systemer er man først

og fremst opptatt av produksjonskostnadene. Markedspris brukes derfor bare til drivstoffkostnader og til å gi verdi til systemets bi-produkter.

Den økonomiske analysen i denne oppgaven vil utføres etter inntektskravmetoden (*revenue requirement method* [7]). Ved denne metoden kan hovedproduktets kostnad beregnes i fire steg:

1. Estimering av totale investeringskostnader.
2. Bestemmelse av økonomisk, finansiell, operasjons- og markedsparametre for detaljert kostnadsberegning.
3. Beregning av inntektskrav.
4. Beregning av spesifikk produktkostnad.

### **2.6.1 Estimering av totale investeringskostnader**

Investeringskostnader er, i motsetning til O & M og drivstoffkostnader, en engangsutbetaling av kapital. Investeringskostnader behandles derfor annerledes en O & M og drivstoffkostnader.

Kapitalen som trengs for kjøp av land, bygging av fasiliteter og kjøp og installasjon av maskineri og utstyr kalles fast-kapitalinvestering (FCI). Fast-kapitalinvesteringer representerer summen som måtte utbetales dersom systemet skulle bygges over natten. De totale investeringskostnadene (TCI) er summen av FCI og andre utlegg. For en oversikt over alle komponentene i de totale investeringene se tabell 2.2. I tabellen er faste kostnader inndelt i de to hovedkategoriene: direkte kostnader (DC) og indirekte kostnader (IC). Direkte kostnader omfatter kostnadene av alt permanente utstyr, material, arbeid, osv, mens indirekte kostnader omfatter slik som ingeniørtjenester, byggekostnader og eventualiteter. Andre utlegg utenom FCI innbefatter startoppkostnader, forskning og utvikling o.l.

#### **Utstyrskostnader**

Estimering av utstyrskostnader er essensielt i en hver detaljert kostnadsanalyse. Utstyrskostnader kan best innhentes ved sitat fra leverandør i tilfellet av en innledende kostnadsanalyse.

Tabell 2.2: Oversikt over komponentene i de totale investeringer (TCI)[7]

- 
- I. Fast-investeringer (FCI)
    - A. Direkte kostnader (DC)
      - 1. *Onsite* kostnader
        - Innkjøpt-utstyr, kostnad (PEC;15-40% av FCI)
        - Innkjøpt-utstyr, installasjon(20-90% av PEC; 6-14% av FCI)
        - Rør (10-70% av PEC; 3-20% av FCI)
        - Instrumentering og kontroller (6-40% av PEC; 2-8% av FCI)
        - Elektrisk utstyr og materialer (10-15% av PEC; 2-10% av FCI)
      - 2. *Offsite* kostnader
        - Eiendom (0-10% av PEC;0-2% av FCI)
        - Bygging- og arkitekturarbeid(15-90% av PEC; 5-23% av FCI)
        - Service fasiliteter (30-100% av PEC; 8-20% av FCI)
    - B. Indirekte kostnader (IC)
      - 1. Ingeniørtjenester og ledelse (25-72% av PEC; 6-15% av DC; 4-21% av FCI)
      - 2. Byggekostnader (15% av DC; 6-22% av FCI)
      - 3. Eventualiteter (8-25% av summen over; 5-20% av FCI)
  - I. Andre utlegg
    - A. Oppstartskostnader (5-12% av FCI)
    - B. Arbeidskapital (10-20% av TCI)
    - C. Kostnad av lisenser, forskning og utvikling
    - D. Godtgjørelsen av midler som brukes under bygging (AFUDC)
-

### Drift- og vedlikeholdskostnader

Drift og vedlikeholdskostnader baseres på antagelser, erfaringer fra tidligere anlegg eller estimat fra leverandør.

#### 2.6.2 *Carrying Charges*

*Carrying Charges* (CC) er forpliktelser assosiert med en investering. Disse er i natur annerledes enn driftkostnader ved at de synker utover levetiden til maskineriet de er assosiert med. CC inkluderer avskrivninger, skatter, forsikring og avkastning. CHP-enheten er ikke ment for å gi noen netto inntekt og er antatt finansiert med egne midler så det er ikke noe krav til avkastning. CC blir da årlige avskrivninger. CHP-enheten avskrives i henhold til saldogruppe J: Fast teknisk installasjon i bygninger - 10 % [64].

#### 2.6.3 Inflasjon, eskalering og annuitet

Inflasjon er økning i pris av en vare på grunn av økning i tilgjengelig valuta og kreditt uten en proporsjonel økning i tilgjengelig gods og ytelser av lignende kvalitet. Den virkelige eskaleringsraten til en utgift er den årlige raten for økning i utgiften på grunn av faktorer som ressurstømming, økt forespørsel og teknologiske nyvinninger. Den reelle eskaleringsraten er uavhengig av inflasjon. Den nominelle eskaleringsraten tar hensyn til både inflasjon og den reelle eksaleringsraten. For den nominelle eksaleringsraten er konsumprisindeksen (KPI) brukt. Det skilles mellom KPI for energiprodukter og KPI for andre produkter.

Kostnadseskalering fører til en økende utgifter utover maskineriets levetid. Utgiftene øker med  $(1+r)$  hvert år, hvor  $r$  er nominell eksaleringsrate. *Constant-cost levelization factor* (CELFF) er en faktor som brukes for å uttrykke forholdet mellom en utgifts verdi ved begynnelsen av det første året og en ekvivalent annuitet som kalles *levelized value*. Faktoren er avhengig av både den effektive renten  $i_{\text{eff}}$  og den nominelle eskaleringsraten. CELFF uttrykkes ved [7]:

$$\text{CELFF} = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \text{CRF} \quad (2.72)$$

hvor

$$k = \frac{1 + r}{1 + i_{\text{eff}}} \quad (2.73)$$

og

$$\text{CRF} = \frac{i_{\text{eff}}(1 + i_{\text{eff}})^n}{(1 + i_{\text{eff}})^n - 1} \quad (2.74)$$

Den effektive renten  $i_{\text{eff}}$  representerer pengenes fremtidige verdi. Prinsippet bygger på at en krone i hånden i dag er verdt mer enn en krone i hånden om et år, fordi kronen kan investeres. Total kostnad beregnes for hvert år som den fremtidige verdien av til drivstoffkostnadene, vedlikeholdskostnadene og avskrivningene

$$\text{TRR}_F = \text{FC}_F + \text{OMC}_F + \text{CC}_F \quad (2.75)$$

Annuiteten til TRR i ligning 2.75 beregnes ved å først regne nåverdi ved

$$P = F \frac{1}{(1 + i_{\text{eff}})^n} \quad (2.76)$$

For så å regne annuiteten ved

$$\text{TRR}_A = \sum \text{TRR}_P \cdot \text{CRF} \quad (2.77)$$

Annuiteten til drivstoffkostnadene og drift- og vedlikeholdskostnadene beregnes ved å først finne nåverdi for deretter å regne annuitet ved

$$\text{FC}_A = \sum \text{FC}_P \cdot \text{CEL}_{\text{FC}} \quad (2.78)$$

og

$$\text{OMC}_A = \sum \text{OMC}_P \cdot \text{CEL}_{\text{OMC}} \quad (2.79)$$

Hvor den nominelle eksaleringraten  $r$  er forskjellig i faktorene  $\text{CEL}_{\text{FC}}$  og  $\text{CEL}_{\text{OMC}}$ . Annuiteten til avskrivningene regnes ved

$$\text{CC}_A = \text{TRR}_A - \text{FC}_A - \text{OMC}_A \quad (2.80)$$



$CC_A$  og  $FC_A$  og  $OMC_A$  er videre omregnet til  $\dot{Z}_{CI}$  og  $\dot{Z}_{OM}$  ved henholdsvis:

$$\dot{Z}_{CI} = CC_A / (8760 \cdot 3600) \quad (2.81)$$

og

$$\dot{Z}_{OM} = (FC_A + OMC_A) / (8760 \cdot 3600) \quad (2.82)$$

## 2.7 Eksergoøkonomisk analyse

Formålet med eksergoøkonomisk analyse er, som nevnt tidligere, enten å (a) kalkulere separate kostnader for hvert produkt i et system som har mer enn et produkt, (b) forstå kostnaddannelsesprosessen og kostnadsflyten i systemet, (c) optimere spesifikke variabler i en enkel systemkomponent eller (d) optimere det samlede systemet [7]. I oppnåelse av formålet brukes kostnadsbalanser hyppig. Kostnadsbalanser fungerer på samme måte som energi-, entropi- og eksergibalanser. Kostnadene inn må være like kostnadene ut. Kostnader kan hverken bli til eller forsvinne. I en konvensjonell økonomisk analyse settes gjerne kostnadsbalansen over systemet i sin helhet og det antas at systemet opererer ved *steady state*. Balansen kan da bli seende ut:

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (2.83)$$

Denne ligningen uttrykker kostnadsraten assosiert ved produksjonen i systemet ( $\dot{C}_{p,tot}$ ) som summen av kostnaden av drivstoff ( $\dot{C}_{f,tot}$ ), kostnaden av kapitalinvestering ( $\dot{Z}_{tot}^{CI}$ ) og kostnaden av drift og vedlikehold ( $\dot{Z}_{tot}^{OM}$ ). Variabler denotert med  $\dot{C}$  representerer i denne teksten kostnader assosiert med en eller annen form for eksergistrøm: enten det er massestrøm, arbeidsstrøm eller varmeoverføring. Variabler denotert  $\dot{Z}$  representerer alle resterende kostnader. For et system som operer i *steady state* kan det være mange inn- og utadstrømmende massestrømmer og energistrømmer. Assosiert med disse strømmene vil det være eksergistrømmer. Eksergi er definert som den verdifulle delen av energi (dvs. den delen som kan omformes til arbeid) så det gir mening å tildele kostnader i systemet på eksergibasis. Denne tildelingen kalles eksergikostnads-kalkyle. I eksergikostnads-kalkyle assosieres en kostnad ved hver eksergistrøm. For eksergistrømmer medfølgende massestrømmer inn  $\dot{X}_i$ , massestrømmer ut  $\dot{X}_u$ , arbeid  $\dot{W}$  og varmeovergang

$\dot{X}_q$  skrives:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{X}_i = c_i(\dot{m}_i \psi_i) \quad (2.84a)$$

$$\dot{C}_u = c_u \dot{X}_u = c_u(\dot{m}_u \psi_u) \quad (2.84b)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (2.84c)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{X}_q \quad (2.84d)$$

Her er variablene  $c_i$ ,  $c_u$ ,  $c_w$  og  $c_q$  eksergispesifikke kostnader. I eksergikostnads kalkyle settes det kostnadsbalanser over hver komponent i systemet. Dette gjør det mulig å definere kostnadene til de individuelle eksergiødeleggelsene. Disse kostnadene kan igjen brukes som viktig input til avgjørelser om drift eller utbedring av systemet. En kostnadsbalanse på den  $k$ -ende komponenten i systemet viser at kostnadsratene assosiert ved eksergistrøm inn er lik kostnadsraten assosiert med eksergistrøm ut pluss eventuelle investeringskostnader og operasjons- og vedlikeholdskostnader. Summen av de to siste leddene denoteres  $\dot{Z}_k$ . For en komponent som mottar varme og produserer arbeid, slik som en varmekraftmaskin, kan kostnadsbalansen skrives [7]:

$$\sum_u \dot{C}_{u,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (2.85)$$

Kostnadsbalanser skrives generelt slik at alle leddene i balansen er positive. I balansen går det ut i fra at de energistrømmene i systemet, de spesifikke kostnadene til eksergistrømmene inn og investerings- og operasjons- og vedlikeholdskostnadene er kjent. Følgelig er det de spesifikke kostnadene til eksergistrømmene ut som beregnes. I flere tilfeller fører dette til ligninger med to eller flere ukjente. For eksempel i tilfellet motoren i CHP-enheten.

I motoren produseres det både varme og kraft, samtidig som eksosgasser forsvinner ut av enheten og noe varme forsvinner til omgivelsene ved konveksjon og stråling. For å kunne løse kostnadsbalansen trengs det dermed flere relasjoner. I CHP-enheten utnyttes både arbeidet og varmen som produseres i motoren, så disse kan sees på som likestilte produkter, og det regnes at de produseres med samme gjennomsnittlige eksergispesifikke kostnad.

$$c_w = c_q \quad (2.86)$$

Eksergistrømmen i eksosgassen regnes som tap i motoren, i den betydning at den ikke er en del av motorens produkt. I et system hvor eksosgassene ut fra motoren forsvinner ut i omgivelsene uten å utnyttes videre, og formålet med den eksergoøkonomiske analysen var å beregne kostnadene til de endelige produktene eller å evaluere det helhetlige systemet, ville de assosierte kostnadene  $\dot{C}_e$  vært lik null. I CHP-enheten utnyttes derimot eksergien i eksosgassen fra stempelmotoren ved at de varmeveksler med kjølekretsen og bidrar til en økt varmeproduksjon. Kostnadsraten  $\dot{C}_{e,k}$  assosiert med eksergistrømmen i eksosgassene  $\dot{X}_{e,k}$  beregnes ved å anta at eksergistrømmen dekkes av ekstra drivstofforbruk, uttrykt ved:

$$\dot{C}_e = c_F \dot{X}_e \quad (2.87)$$

Samme fremgangsmåte kan brukes til å beregne kostnadsratene assosiert med varmetap ved konveksjon og stråling. Både eksergistrømmen og kostnadsraten assosiert med luftstrømmen inn er neglisjerbare. Kostnadsbalansen for motoren blir da:

$$\dot{C}_w + \dot{C}_q + \dot{C}_e + \dot{C}_{q,tap} = \dot{C}_F + \dot{Z}_k \quad (2.88)$$

Kostnadsbalansen for generator og varmevekslere kan beregnes ved å bruke F- og P-prinsippene. F-prinsippet referer til fjerning av eksergi fra en eksergistrøm som er definert som drivstoff. I følge prinsippet må den spesifikke kostnaden assosiert med fjerningen av eksergi være den samme som kostnaden eksergi ble tilført strømmen med *upstream* i systemet. P-prinsippet referer til tilførsel av eksergi til en eksergistrøm. P-prinsippet tilsier at all eksergi tilført en strøm som er definert som en produktstrøm tilføres med den samme spesifikke kostnaden [36]. For enkelhets skyld antas oljefilter å være en del av motoren.

# Kapittel 3

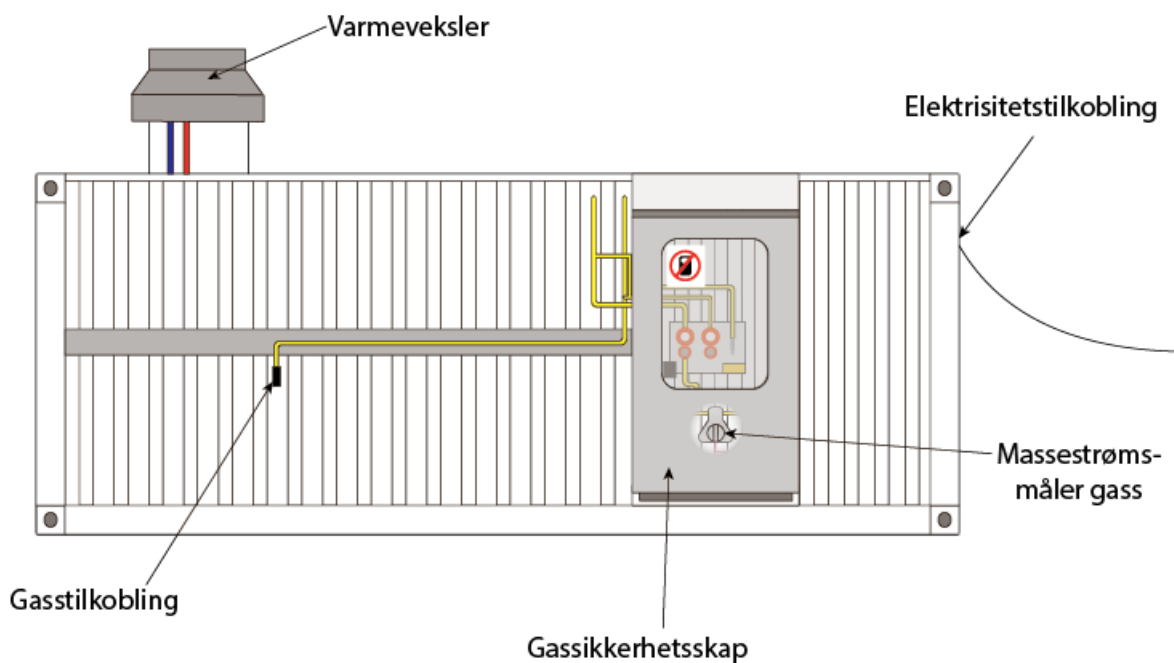
## Metode

Beregningene i denne oppgaven baserer seg på målinger utført i 2007 og 2015. Målingene fra 21.03.2007 ble utført av Øystein Lindberg [17] i samarbeid med PKS på Mongstad. XRG1 13 CHP-enheten sto da som en del av et større anlegg med flere CHP-enheter som alle kunne styres fra én og samme PC. CHP-enheten var på dette tidspunktet komplett instrumentert for analyse av produsert varme og elektrisk effekt samt elektrisk virkningsgrad, varmekvinningsgrad og total virkningsgrad. Mer om disse målingenes utførelse og motivasjon finnes i referanse [17].

Fra CHP-enheten ble overlevert fra Statoil til Høgskolen i Bergen til begynnelsen på arbeidet med denne oppgaven har enheten ikke vært i bruk, og mye tyder på at testingen utført 21.03.2007 i forbindelse med studentoppgaven til Øystein Lindberg [17] er de siste testene utført på enheten. Det har ikke lyktes Høgskolen i Bergen å oppnå samme grad av instrumentering i som CHP-enheten hadde i 2007 i løpet av den tilmålte til denne oppgaven. Det har derfor vært nødvendig å anvende målingene fra 2007 supplert med egne målinger for å kunne gjøre de ønskede beregningene. Anleggets utforming og måleoppsett fra måling utført 10.07.2015 er beskrevet i seksjonen under.

### 3.1 CHP-anleggets utforming

XRG1 13 CHP-enheten er plassert i en container med eksterne tilkoblinger for gass og elektrisitet (se Figur 3.1). På containerens ene langside er det festet et gassikringsskap med tilkoblingen til gassbatteri med CNG. Skapet inneholder blant annet en ekspansjonsventil for reduksjon av



Figur 3.1: Illustrasjon av containerens utside sett fra siden.

gasstrykk og et flowmeter for måling av gassforbruk. Gass i rør mellom ekspansjonsventil og CHP-enheten har et overtrykk på 30 mbar. På taket av containeren er det plassert en varmeveksler for utveksling av CHP-enhetens produserte varme med omgivelsene. Gassbatteri med CNG er plassert på containerens bakside med ledning til containerens gasstilkobling (se Figur 3.1).

Containerens innside er delt i to av en vegg på tvers av containeren. I rommet nærmest inngangen er det plassert logge-PC, sikringskap, styringskap og brannslukningsutstyr. I rommet lengst unna containerens inngang er CHP-enheten plassert sammen med varmelager og varmefordeler (se Figur 3.2). Ved måling er det her også plassert en gasskjøler og en gassanalysator. CHP-enheten er plassert med åpning mot containerens inngang. Tilkobling til kjølevann, elektrisitet, gass og eksos er på CPH-enhetens bakside. På eksosrøret er en port for prøvetaking, plassert like etter utgang fra enheten (se Figur 2.3). Kjølevannskretsen som går gjennom CHP-enheten varmeveksler med en ekstern krets i systemets varmefordeler. Den eksterne kretsen er videre tilkoblet et varmelager og varmeveksleren som er plassert på containerens tak. Temperaturen i den eksterne kretsen bestemmes av en termostat med muligheter for innstilling av ønsket temperatur. Grensesnitt for innstilling av temperatur er plassert på vegg i containerens

motorrom (se Figur 3.2).

### **Instrumentering og logging**

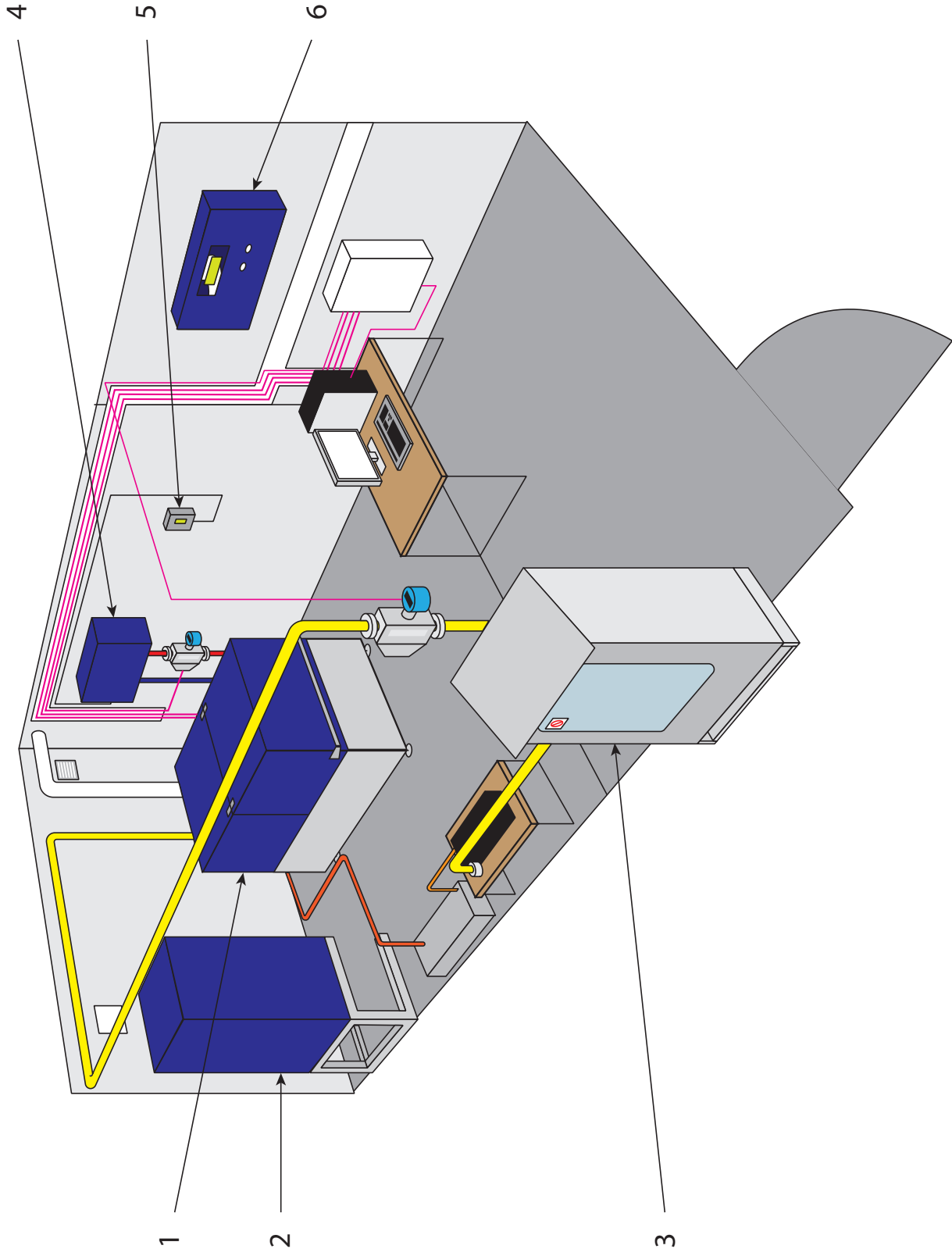
Fra sin tid hos PKS på Mongstad er CHP-anlegget utstyrt med instrumentering for logging av data under testkjøring. Alle verdier logges i et LabVIEW-basert styringsprogram utviklet av PKS. Logge-programmet opererer, i tillegg til måledata, også med input fra bruker. Basert på disse gir programmet output i form av både målte og beregnede data. Tabell C.1 inneholder en oversikt over alle logge-programmets mulige input og output.

Instrumentering tilstede på CHP-enheten fra tiden på Mongstad er: temperaturfølere i kjølevannsrør inn og ut av enheten, massestrømsmåler på kjølevannskretsen, massestrømsmåler for måling av gassforbruk og apparat for måling av produsert elektrisk effekt. Alle disse mengdene logges i styringsprogrammet medfølgende enheten.

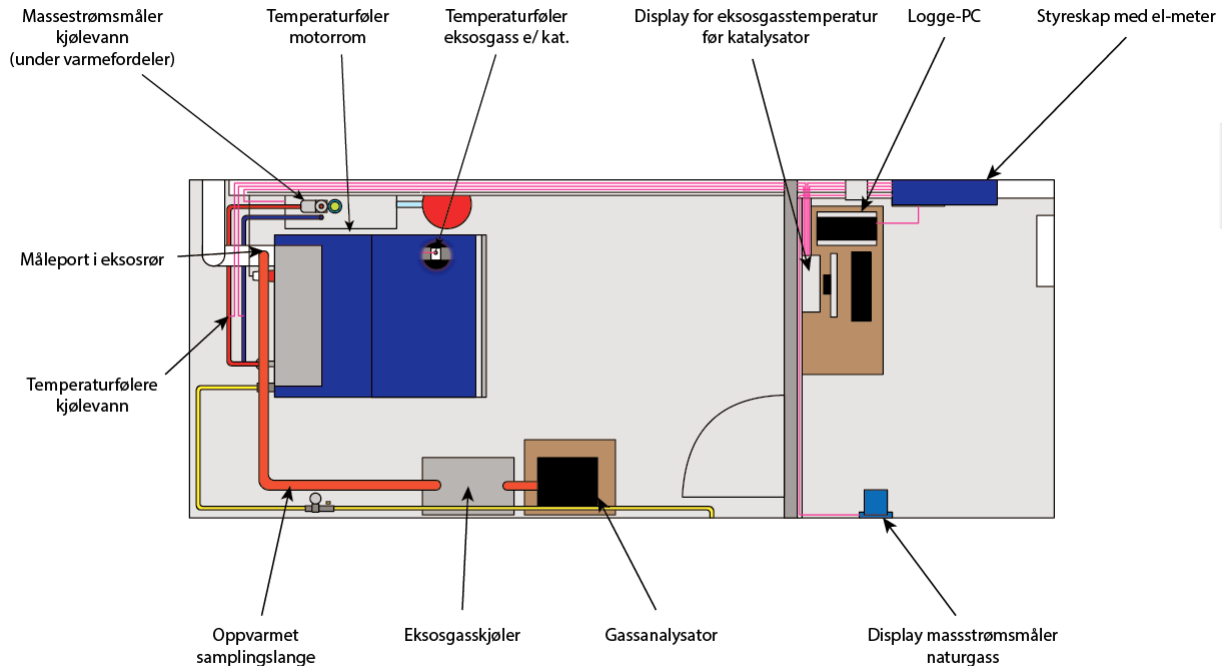
Ved måling av Høgskolen i Bergen er det påsatt instrumentering for måling av: eksosstemperatur før katalysator, temperatur i containeren, eksosgasstemperatur etter CHP-enheten og gassanalysator for måling av eksosgassammensetning. På grunn av at ekoseret kun er utstyrt med én port for prøvetaking ble det først gjort målinger med gassanalysator tilkoblet og deretter med temperaturføler.

Kjølevannstemperatur ble målt av temperaturfølere rett etter utløp og rett før innløp til enheten. Følerne var plassert så nærme CHP-enheten som mulig for å bestemme temperaturen før varmetap i rør. Kjølevannstrømmen ble målt av et R-serie Micro Motion® flowmeter. Flowmeteret måler massestrøm og tetthet ved Coriolis effekten. Et lignende flowmeter er brukt til måling av naturgassens massestrøm, dette også fra Micro Motion®. Et Kampstrup 685-382-OK-10 el-meter er brukt til å måle produsert elektrisk effekt. Måling av eksosgasstemperatur før katalysator ble utført med en temperaturføler med tilkobling til en eksisterende kondisjoneringsenhet inne i containerens kontrollrom. Temperatur i motorrom og eksosgasstemperatur ut fra enheten ble målt med håndholdte temperaturfølere. Eksosgassammensetning ble målt først med en Tiesto 350 XL og deretter en Horiba PG 350 gassanalysator.

Ved måling ble verdier for CHP-enhetens umidlede elektriske effekt, midlede elektriske effekt, kjølevannstemperatur inn og ut, massestrøm kjølevann og massestrøm naturgass logget i styreprogrammet (se tabell 3.2), mens verdier for eksosgasstemperatur før katalysator, tempera-



Figur 3.2: Illustrasjon over CHP-anleggets utforming i container. Hovedkomponentene er: 1) CHP-enhet, 2) varmelager, 3) gassikringskap, 4) varmefordeler, 5) temperaturstyring og 6) styringskap.



Figur 3.3: Plassering av instrumentering ved måling 10.07.2015.

tur i motorrom, eksosgassstemperatur ut fra CHP-enheten og eksosgassammensetning ble avlest og notert. Ønsket elektrisk effekt ble ved hver måling manuelt bestemt i styringsprogrammet. Tabell 3.1 inneholder en oversikt over utstyrstilkobling ved målingene som utført.

Resultater fra målingene fra 2015 finnes i vedlegg G. Resultater fra målinger utført i 2007 finnes i vedlegg H. Verdier for omgivelsestrykk, -temperatur og relativ fuktighet er hentet fra Geofysisk Instituttets nettsider [65] og finnes i vedlegg I.

## 3.2 Energi- og eksergianalyse

Energi- og eksergianalyse har blitt utført på basis av målinger utført 21.03.2007 av Øystein Lindberg [17] i samarbeid med PKS på Mongstad supplert med målinger utført 10.07.2015 i regi av Høgskolen i Bergen. Energi- og eksergibalansene for CHP-enheten er basert utelukkende på måleresultater fra 2007 da disse inneholder verdier for de nødvendige variablene. Energi- og eksergianalyse av stempelmotoren og resten av CHP-enhetens indre komponenter er også for det meste utført på basis av målinger utført i 2007. Målinger fra 2015 er her brukt til å validere beregningsmodeller og til å bekrefte antagelser gjort av forfatter. I tillegg er målt eksosgassstem-



Tabell 3.1: Utførelse av målinger 2015.

| Test nr. | ønsket effekt | utstyr i eksosport           |
|----------|---------------|------------------------------|
| 1        | 13,5 kW       | Tiesto 350 XL gassanalysator |
| 2        | 4,5 kW        | Tiesto 350 XL gassanalysator |
| 3        | 13,5 kW       | Horiba PG 350 gassanalysator |
| 4        | 10,5 kW       | Horiba PG 350 gassanalysator |
| 5        | 7,5 kW        | Horiba PG 350 gassanalysator |
| 6        | 4,5 kW        | Horiba PG 350 gassanalysator |
| 7        | 13,5 kW       | håndholdt temperaturføler    |
| 8        | 10,5 kW       | håndholdt temperaturføler    |
| 9        | 7,5 kW        | håndholdt temperaturføler    |
| 10       | 4,5 kW        | håndholdt temperaturføler    |
| 11       | 13,5 kW       | håndholdt temperaturføler    |

peratur før katalysator målt i 2015 brukt til modellering av katalysator. Målte variabler brukt i energianalyse av CHP-enheten og enhetens indre komponenter er oppgitt i tabell 3.2. Se Vedlegg H for verdier målt 21.03.2007.

Tabell 3.2: Målte variabler brukt i energianalyse av CHP-enheten

| Fra målinger utført 21.03.2007 |   |          |
|--------------------------------|---|----------|
| Drivstofforbruk                | $\dot{m}_g$   | g/s      |
| Midlet elektrisk effekt        | $\dot{W}_{el}$  | kW       |
| Kjølevannsstrøm                | $\dot{V}_v$   | l/t      |
| Kjølevannstemperatur inn       | $T_6$   | °C       |
| Kjølevannstemperatur ut        | $T_{14}$  | °C       |
| Temperatur i motorrom          | $T_c$   | °C       |
| Volumetrisk konsentrasjoner    | HC, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>                                | ppm og % |
| Eksosgasstemperatur            | $T_5$   | °C       |
| Fra målinger utført 10.07.2015 |   |          |
| Eksosgasstemperatur            | $T_3$   | °C       |
| Volumetrisk konsentrasjoner    | H <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> | ppm og % |

### 3.2.1 Energibalanse for CHP-enheten

CHP-enhetens ytelse er evaluert ved å anse enheten som et kontrollvolum med innstrømning av luft, naturgass og kjølevann og utstrømning av eksosgass, opphetet kjølevann og varme ved konveksjon og stråling. CHP-enhetens komponenter og tilstandspunkter for enhetens massestrømmer er markert i Figur 3.4. CHP-enhetens energibalanse er satt opp som:

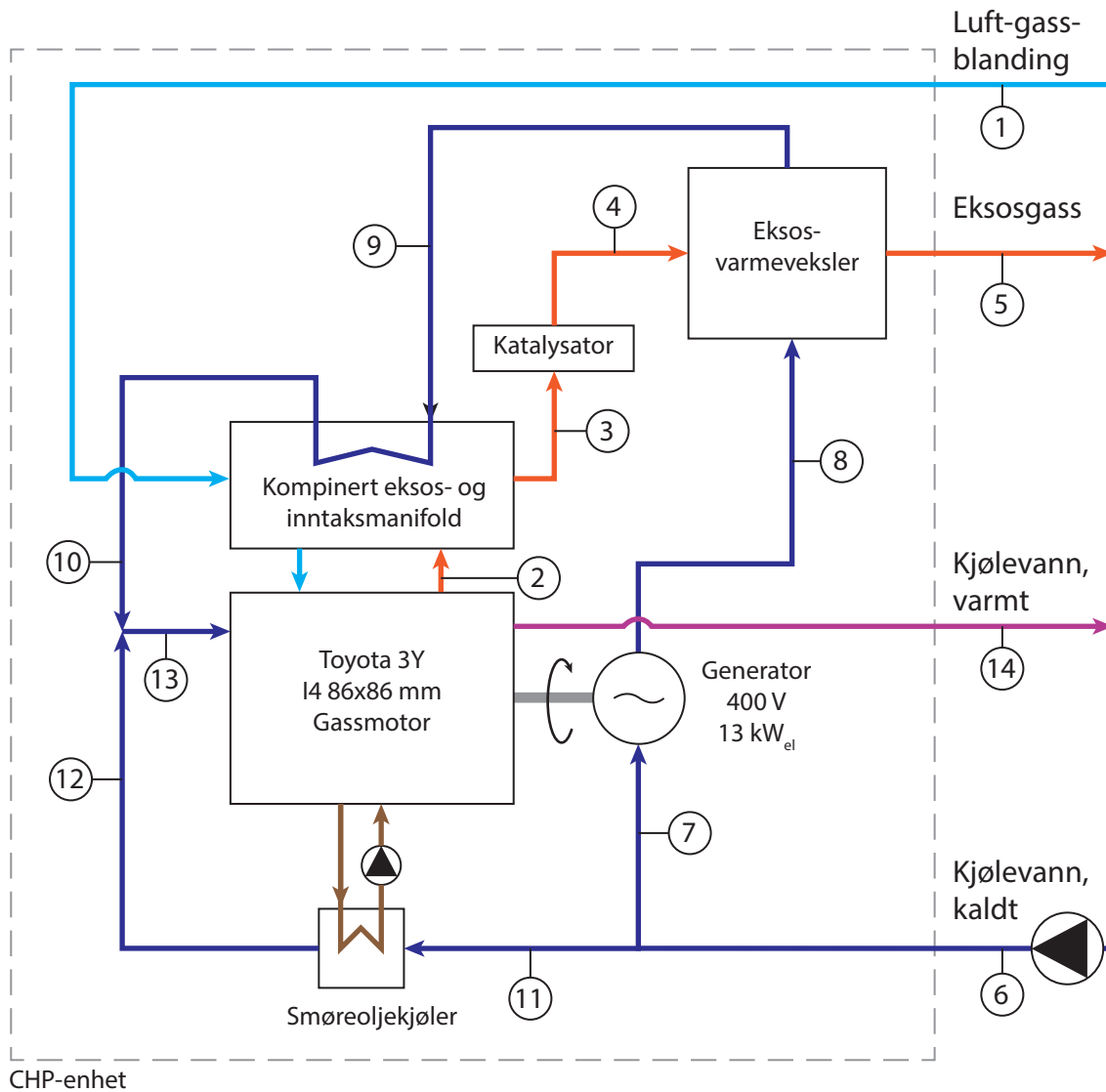
$$\dot{Q}_g = \dot{W}_{el} + \dot{Q}_v + \dot{E}_e + \dot{Q}_{tap} \quad (3.1)$$

hvor  $\dot{Q}_g$  er naturgassens forbrenningsvarme,  $\dot{W}_{el}$  er netto produsert elektrisk effekt,  $\dot{Q}_v$  er varme til kjølevannet,  $\dot{E}_e$  denoterer energi til eksosgassene og  $\dot{Q}_{tap}$  er varmetap ved konveksjon og stråling.

Forbrenningsvarmen fra naturgassen er beregnet ved:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot \text{LHV}_g \quad (3.2)$$

hvor  $\dot{m}_g$  er målt gassforbruksrate og  $\text{LHV}_g$  er naturgassens lavere brennverdi beregnet ut fra



Figur 3.4: Blokkdiagram over CHP-enheten.

Tabell 3.3: Naturgassens sammensetning ved måling 21. mars 2007.

| Komposisjon [17] |                                |        | Molarmasse [55]    | Kritiske verider [55] |                     | Brennverdier [66]      |                       |
|------------------|--------------------------------|--------|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Navn             | Formel                         | vol%   | $M_i$<br>[kg/kmol] | $T_{cr,i}$<br>[K]     | $P_{cr,i}$<br>[MPa] | Brutto $_i$<br>[MJ/kg] | Netto $_i$<br>[MJ/kg] |
| Karbondioksid    | CO <sub>2</sub>                | 0,525  | 44,01              | 304,3                 | 7,398               | -                      | -                     |
| Nitrogen         | N <sub>2</sub>                 | 0,000  | 28,02              | 126                   | 3,392               | -                      | -                     |
| Metan            | CH <sub>4</sub>                | 93,480 | 16,04              | 196,7                 | 4,641               | 55,515                 | 50,028                |
| Etan             | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 4,433  | 30,07              | 305,4                 | 4,883               | 51,902                 | 47,511                |
| Propan           | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0,802  | 44,09              | 370                   | 4,257               | 50,325                 | 46,332                |
| i-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,512  | 58,12              | 408,2                 | 3,648               | 49,347                 | 45,561                |
| n-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,099  | 58,12              | 525,2                 | 3,797               | 49,505                 | 45,719                |
| i-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,071  | 72,15              | 461                   | 3,33                | 48,91                  | 45,249                |
| n-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,019  | 72,15              | 469,8                 | 3,375               | 49,006                 | 45,345                |
| Tyngre           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 0,059  | 84                 | 503                   | 2,976               | 48,678                 | 45,103                |

naturgassens sammensetning ved:

$$\text{LHV}_g = \sum_{i=1}^k \frac{y_i M_i}{M_g} \cdot \text{LHV}_i \quad (3.3)$$

Naturgassens volumetriske sammensetning er oppgitt i Tabell 3.3

Den elektriske effekten  $\dot{W}_{el}$  er målt elektrisk effekt. Varmen til kjølevann  $\dot{Q}_v$  er beregnet som forskjell i kjølevannets entalpi mellom innløp til og utløp fra CHP-enheten. Ut i fra målt temperatur og volumstrøm er kjølevannsvarmen beregnet ved:

$$\dot{Q}_v = \dot{V}_v \cdot \rho_{14} \cdot (h_{14} - h_6) \quad (3.4)$$

hvor  $\rho_{14}$ ,  $h_{14}$  og  $h_6$  er tabulerte verdier for henholdsvis vannets tetthet og spesifikke entalpi i tilstandspunkt 14 og vannets spesifikke entalpi i tilstandspunkt 6. Verdier for tetthet og spesifikk entalpi er funnet på bakgrunn av vannets målte temperatur ( $T_6$  og  $T_{14}$ ) og den hete kretsens systemtrykk på 0,82 bar<sub>g</sub>. Alle tabulerte data er funnet ved å bruke CoolProp, et *open source* C++ bibliotek inneholdene bl.a. termodynamiske data for rene substanser.

Eksosgassens energi består av både kjemisk energi, lagret i HC og CO som følge av ufullsten-

dig forbrenning, og fysisk energi, fra forbrenningsprosessen. Summen av energien i eksosgassen er beregnet ved:

$$\dot{E}_e = \dot{m}_g \cdot e_e^{\text{kjem}} + \dot{m}_e \cdot c_{p,e} \cdot T_e - \dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot T_a \quad (3.5)$$

Massestrøm luft er beregnet ved:

$$\dot{m}_a = \lambda \cdot L_{\min} \cdot \dot{m}_g \quad (3.6)$$

hvor  $\dot{m}_g$  er en målt kvantitet,  $L_{\min}$  er beregnet ved:

$$L_{\min} = \frac{O_{2,\min}}{0,21} \quad (3.7)$$

og  $\lambda$  er beregnet ved:

$$\lambda = \frac{21\%}{(21\% - O_2\%)} \quad (3.8)$$

Massestrøm eksos  $\dot{m}_e$  er beregnet som summen av massestrøm luft og massestrøm naturgass:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_a + \dot{m}_g \quad (3.9)$$

Kjemisk energi i eksosgassene er beregnet på bakgrunn av målt konsentrasjon av HC og CO. Den kjemiske energien i CO er beregnet som prosent av tilført kjemisk energi ved:

$$e_{\text{CO}}^{\text{kjem}} = \frac{283,0 \cdot b}{\text{LHV}_g \cdot (b + c + e) \cdot (12 + y + 16z)} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

Kjemisk energi i HC i eksosgassene er beregnet i prosent av tilført kjemisk energi ved:

$$e_{\text{UHC}}^{\text{kjem}} = \frac{e}{b + c + e} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

Den totale kjemiske energien som forgår i eksosgassene som ubrukt forbrenningsentalpi er på massebasis (kJ/kg brennstoff) beregnet ved:

$$e_e^{\text{kjem}} = \left( e_{\text{CO}}^{\text{kjem}} + e_{\text{UHC}}^{\text{kjem}} \right) \cdot \text{LHV}_g \quad (3.12)$$

Spesifikk varmekapasitet for luft  $c_{p,a}$  er funnet fra tabulert data. Spesifikk varmekapasitet for

eksosgassene er beregnet på molbasis ut fra eksosgassenes sammensetning ved:

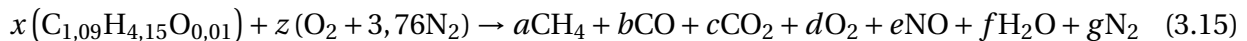
$$\bar{c}_{p,e} = \sum y_{\text{våt},i} \cdot a_i + \sum y_{\text{våt},i} \cdot b_i \cdot T_e + \sum y_{\text{våt},i} \cdot c_i \cdot T_e^2 + \sum y_{\text{våt},i} \cdot d_i \cdot T_e^3 \quad (3.13)$$

hvor  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  og  $d_i$  er gassart-spesifikke konstanter og  $T_e$  er målt avgasstemperatur. Molfraksjonen  $y_{\text{våt},i}$  er molfraksjonen til gassarten  $i$  ved våt gass, dvs ved eksosgasskomposisjon medregnet  $\text{H}_2\text{O}$ . Spesifikk varmekapasitet på massebasis er beregnet ved:

$$c_{p,e} = \frac{\bar{c}_{p,e}}{\sum y_{\text{våt},i} \cdot M_i} \quad (3.14)$$

hvor  $M_i$  er molvekten til gassarten  $i$ .

I forsøket er molfraksjonene HC, CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  og  $\text{NO}_x$  målt. Målt  $\text{NO}_x$  er antatt å bestå av kun NO. Det er også antatt at uforbrent hydrokarboner UHC består av metan  $\text{CH}_4$ . Molfraksjonene  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{N}_2$  er beregnet ut i fra reaksjonsligningen:



hvor  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  og  $e$  er kjent kvantiteter. Antall mol brennstoff per 100 kmol tørr eksosgass  $x$  er beregnet ved karbonbalansen:

$$1,09 \cdot x = a + b + c \quad (3.16)$$

Antall mol  $\text{N}_2$  per 100 kmol tørr eksosgass er beregnet ved:

$$g = 100 - (a + b + c + d + e) \quad (3.17)$$

Antall mol produsert  $\text{H}_2\text{O}$  er beregnet ved hydrogen balansen:

$$f = 4,15 \cdot x - 4 \cdot a \quad (3.18)$$

Antall mol  $\text{O}_2$  per 100 kmol eksosgass er beregnet ved oksygenbalansen:

$$2 \cdot z = b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + e + f - 0,01 \cdot x \quad (3.19)$$

Den totale H<sub>2</sub>O-mengden i eksosen er summen av produsert H<sub>2</sub>O og H<sub>2</sub>O medfølgende motorens innsugde luftmengde. Luftens fuktighet er beregnet ved:

$$y_{\text{H}_2\text{O},a} = \frac{\phi \cdot P_g}{P_o} \quad (3.20)$$

hvor  $\phi$  er målt relativ luftfuktighet,  $P_g$  er metningstrykket ved målt omgivelsestemperatur  $T_o$  og  $P_o$  er målt omgivelsestrykk. Den samlede H<sub>2</sub>O-mengden i eksosen er beregnet ved:

$$y_{\text{H}_2\text{O},e} = f + \frac{y_{\text{H}_2\text{O},a}}{y_{\text{O}_2,a}} \cdot z \quad (3.21)$$

Nye molfraksjoner på basis av våt eksosgass er beregnet fra gassartenes molfraksjon ved tørr eksosgass ved:

$$y_{\text{våt},i} = y_{\text{tørr},i} \cdot \frac{\sum y_{\text{tørr},i}}{\sum y_{\text{våt},i}} \quad (3.22)$$

Varmetapet fra kogereringsenheten  $\dot{Q}_{\text{tap}}$  er beregnet som 2 % av tilført energi:

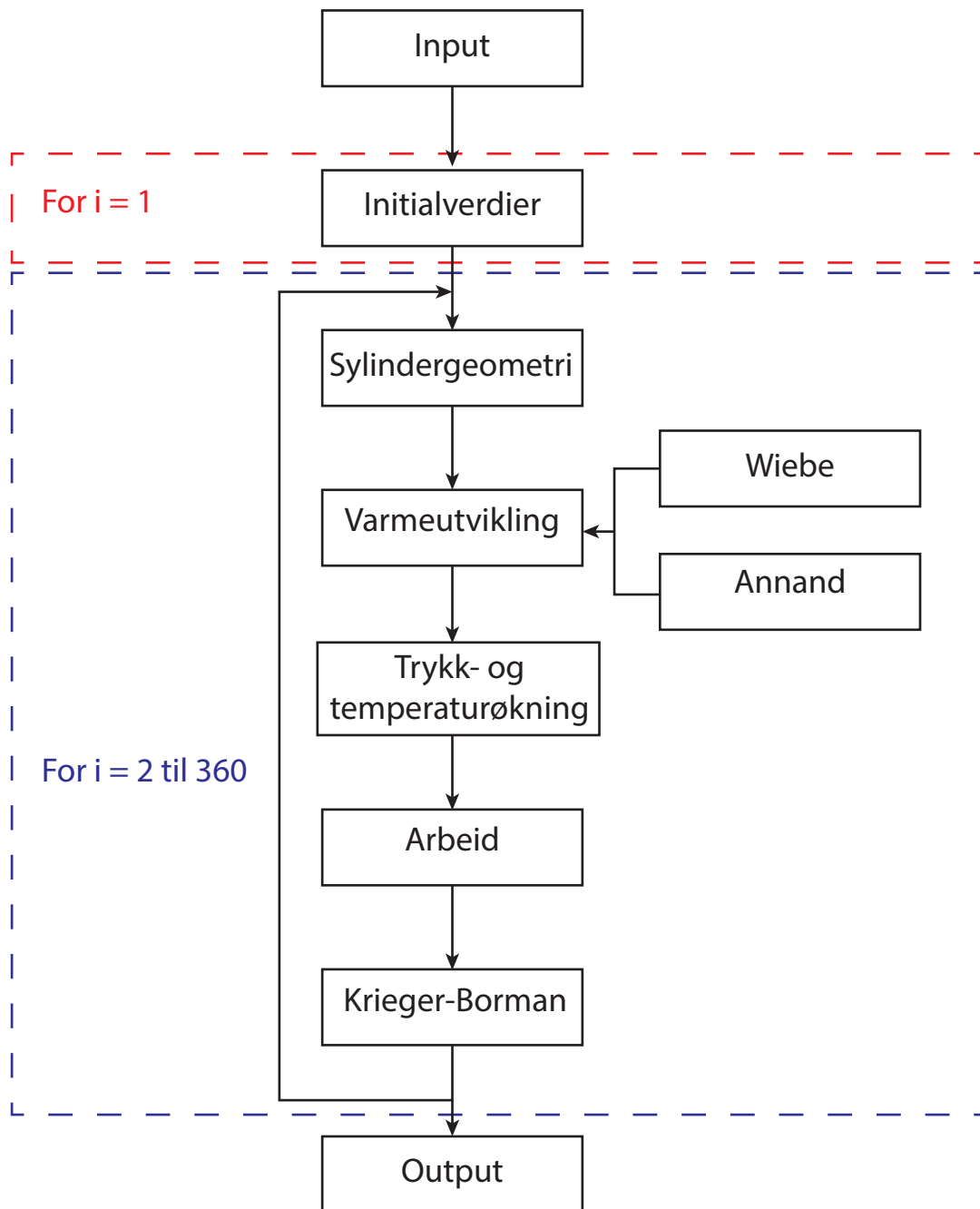
$$\dot{Q}_{\text{tap}} = 0,02 \cdot \dot{Q}_g \quad (3.23)$$

### 3.2.2 Modellering av stempelmotor

I modellering av stempelmotor er det brukt en én-sone modellen for simulering av varmeutvikling og varmeovergang i sylinder. Modellen er programmert i Microsoft Visual Basic for Applications. Beregningene er utført ved iterasjon med oppløsning 1 veivinkel (°VV). Modellens utforming er illusstrert i figur 3.5.

#### Input

I første trinn defineres modellens input-verdier. Disse er definert i henhold til data funnet i datablad, antatte verdier, som tenningstidspunkt, forbrenningsperiode og veivstanglengde, og vanlige verdier for stempelmotormodeller, som koeffisientene i Wiebe-funksjonen og i Annands korrelasjon for varmeovergang i sylinder. Veivstanglengden  $L$  er antatt å være to ganger motorens slaglengde ( $L = 2 \cdot S$ ). En oversikt over alle inputverdiene brukt i modellen finnes i tabell 3.4.



Figur 3.5: Stempelmotormodellens trinnvise utførelse



Tabell 3.4: Parametere brukt i simulering av stempelmotor og generator

| Symbol                          | Størrelse       | Forklaring   |
|---------------------------------|-----------------|--|
| RPM                             | 1535 RPM        | Rotasjonshastighet i omdreininger per minutt             |
| $B$                             | 0,086 m         | Stempelmotorens sylinderboring                           |
| $S$                             | 0,086 m         | Stempelmotorens slaglengde                               |
| $L$                             | 0,172 m         | Stempelmotorens veivstanglengde (antatt ca $2 \cdot S$ ) |
| $N_{\text{syl}}$                | 4               | Antall sylindere i stempelmotoren                        |
| $r$                             | 8,8             | Stempelmotorens kompresjonsforhold                       |
| LHV                             | 49,71 MJ/kg     | Naturgassens brennverdi                                  |
| $\text{AFR}_{\text{støk}}$      | 16,345 kg/kg    | Støkiometrisk luft-brennstofforhold                      |
| $\text{AFR}_{\text{mol, støk}}$ | 9,977 kmol/kmol | Støkiometrisk luft-brennstofforhold                      |
| $T_c$                           | 24 °C           | Innsugsluftens temperatur                                |
| $P_o$                           | 101325 Pa       | Innsugsluftes trykk                                      |
| $a_{\text{wie}}$                | 5               | Dimensjonsløs koeffisient i Wiebe-funksjonen             |
| $w_{\text{exp}}$                | 2               | Dimensjonsløs koeffisient i Wiebe-funksjonen             |
| $a$                             | 0,49            | Dimensjonsløs koeffisient i Annands korrelasjon          |
| $b$                             | 0,7             | Dimensjonsløs koeffisient i Annands korrelasjon          |

### Initialverdier

Initialverdier er beregnet for  $i = 0$  (ved BDC) basert på inputverdier. Initialverdier for trykk og temperatur er antatt å være atmosfæretrykk  $P_{\text{atm}}$  og temperatur  $T_c$  i container. Dvs motoren er modellert uten trykktap i rør, gassmikser og manifold inn mot forbrenningskammer. Initialverdi for  $\gamma$  er initialt satt til 1,4. Viskositet  $\mu$  og koeffisient for termisk varmeledningsevne  $k$  til sylindergassen er beregnet med polynomfunksjonene (henholdsvis ligning D.1a og D.1b) presenter i vedlegg D. Reynolds-tallet for sylindergassen er beregnet ved:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot \bar{S}_p \cdot B}{\mu} \quad (3.24)$$

hvor  $\rho$  er gassens tetthet,  $\bar{S}_p$  er gjennomsnittlig stempelhastighet (her antatt å være lik gjennomsnittlig gasshastighet i sylinder),  $B$  er sylinderens boring og  $\mu$  er sylindergassens viskositet. Nusselt-tallet er beregnet ved:

$$\text{Nu} = 0,49 \cdot \text{Re}^{0,7} \quad (3.25)$$

### Sylindergeometri

Sylindergeometrien er beregnet ved *Slider-Crank*-modellen. Sylinderens avstand til TDC  $y(\theta)$  og sylinderens volum  $V(\theta)$  som funksjoner av veivinkel er beregnet ved koden i figur 3.6.

```

=====
'Spesifiserer definerer veivinkel.
theta(i) = i + 1
'Spesifiserer stampelets avstand til TDC (m)
y(i) = S / 2 - L + (S / 2) * Cos(theta(i) * 3.14 / 180) + ((L ^ 2 - _
((S / 2) ^ 2) * Sin(theta(i) * 3.14 / 180) ^ 2)) ^ 0.5
'Spesifiserer volum som funksjon av veivinkel (m^3)
V(i) = V_min + ((3.14 / 4) * B ^ 2) * y(i)
'Spesifiserer forandring i volum som funksjon av veivinkel
DV(i) = V(i) - V(i - 1)
=====

```

Figur 3.6: Kode for beregning av sylindergeometri.

### Varmeutvikling i sylinter

Wiebe-funksjonen (ligning 2.28) er brukt til å estimere varmegrigivelsen i sylinter. Parametre brukt i ligningen er oppgitt i tabell 3.4 brukt. Variablene tenningsstidspunkt  $\theta_0$  og forbrenningsperiode  $\theta_d$  er definert spesielt for hvert lastpunkt. Verdier for tenningsstidspunkt og forbrenningsperiode brukt i modellen finnes i tabell 3.5. Kode for beregning av Wiebe-funksjonen finnes i figur 3.7.

```

=====
If theta(i) < theta_0(0, j) Then
  X(i, j) = 0
Else
  X(i, j) = 1 - Exp(-awie * ((theta(i) - theta_0(0, j)) /
    theta_d(0, j)) ^ (wexp + 1))
  If theta(i) < theta_f(0, j) Then
    m_x(i, j) = (m_g(0, j)) / (2 * N)
  End If
End If
'Spesifiserer forandring i massefraksjon forbrent som funksjon av
'veivvinkel
DX(i, j) = X(i, j) - X(i - 1, j)
=====

```

Figur 3.7: Kode for beregning av Wiebe-funksjonen.

Annands korrelasjon for varmeovergang i sylinter er brukt til å modellere varmeovergang fra sylindergassene til kjølevann. Varmeovergangen er beregnet ved ligning 2.30. Kode for beregning av varmeovergang mellom sylindergass og sylindervegg finnes i figur 3.8.

```

=====
'Beregner Reynoldstall som funksjon av veivvinkel
Re(i, j) = rho(i, j) * S_bar_p * B / mu(i, j)
'Beregner Nusstellttall som funksjon av veivvinkel
'(Konstant=.26 for 2-takt, .49 for 4-takt)
Nus(i, j) = 0.49 * Re(i, j) ^ (0.7)
'Beregner varmeovergangskoeffisient ved Annands metode
h_g(i, j) = C_k(i, j) * Nus(i, j) / B
'Beregner konvektive varmetap i sylinter som funksjon av veivvinkel
DQ_w(i, j) = (h_g(i, j) + C_s(i, j)) * a(i) * (T(i - 1, j) - T_w(0, j)) /
* (60 / (360 * RPM))
=====

```

Figur 3.8: Kode for beregning av varmeovergang mellom sylindergass og sylindervegg.

Leddet  $60/(360 \cdot \text{RPM})$  i siste linje i figur 3.8 er en omregningskoeffisient for omregning fra per sekund til per veivinkel. Veggtemperaturen i sylinter  $T_w$  er i likhet med tenningsstidspunkt

Tabell 3.5: Oversikt over last-spesifikke verdier brukt i stempelmotormodellen

| Last   | 13,5 kW | 10,5 kW | 7,5 kW | 4,5 kW |
|--|---------|---------|--------|--------|
| Tenningstidspunkt ( $\theta_0$ ) (°VV før TDC) | 16      | 20      | 30     | 30     |
| Forbrenningsperiode ( $\theta_d$ ) (°)         | 55      | 55      | 55     | 55     |
| Veggtemperatur ( $T_w$ ) (°C)                  | 92,3    | 90,7    | 89,1   | 87,2   |
| Innsugsventil lukkes (IVC) (°etter BDC)        | 30      | 30      | 30     | 30     |
| Eksosventil åpnes (EVO) (°etter BDC)           | 330     | 330     | 330    | 330    |

og forbrenningsperiode satt som en last-spesifikk variabel. Verdien for  $T_w$  er, på grunn av kjøle-kretsens utforming, antatt å være lik kjølevannets temperatur ut av CHP-enheten  $T_{v,ut}$ .

Varmeutviklingen i sylindere er beregnet på basis av Wiebe-funksjonen og Annands korrelasjon for varmeovergang i sylindere. Kode for beregning av varmetutvikling er presentert i figur 3.9.

```

=====
Q_w(i, j) = Q_w(i - 1, j) + DQ_w(i, j)
'Beregner forandring i varme totalt som funksjon av veivinkel
DQ(i, j) = eta_comb * LHV * m_x(i, j) * DX(i, j) - DQ_w(i, j)
'Beregner netto varmetilførsel
Q(i, j) = Q(i - 1, j) + DQ(i, j)
=====

```

Figur 3.9: Kode for beregning av varmetutvikling i sylindere.

$\eta_{comb}$  i koden er forbrenningsvirkningsgraden, beregnet ved

$$\eta_{comb} = (\dot{Q}_g - \dot{m}_g \cdot e_e^{kjem} - \dot{Q}_{kat}) / \dot{Q}_g \quad (3.26)$$

### Trykk- og temperaturøkning

Trykk- og temperaturøkningssraten i sylindere er beregnet mellom lukking av innsugsventil (IVC) og åpning av eksosventil (EVO). Kode for beregning av trykk- og temperaturøkning i sylindere finnes i figur 3.10.

```

'=====  

If theta(i) > IVC(0, j) Then  

    DT(i, j) = T(i - 1, j) * (gamma(i - 1, j) - 1) * ((1 / (P(i - 1, j) _  

    * V(i - 1))) _  

    * DQ(i, j) - (1 / V(i - 1)) * DV(i))  

    DP(i, j) = (-P(i - 1, j) / V(i - 1)) * DV(i) + (P(i - 1, j) _  

    / T(i - 1, j)) * DT(i, j)  

    P(i, j) = P(i - 1, j) + DP(i, j)  

End If  

If theta(i) > EVO(0, j) Then  

    P(i, j) = P_atm  

End If  

If theta(i) > 200 Then  

    If P(i, j) <= P_atm Then  

        P(i, j) = P_atm  

    End If  

End If  

'=====

```

Figur 3.10: Kode for beregning av trykk- og temperaturøkning mellom IVC og EVO.

```

'=====  

'Beregner sylindertemperatur som funksjon av veivinkel  

T(i, j) = T(i - 1, j) + DT(i, j)  

'Beregner sylindrer arbeid som funksjon av veivinkel  

'Behandler atmosfæretrykk som referansetrykk (J)  

W(i, j) = W(i - 1, j) + (P(i, j) - P_atm) * DV(i)  

'Beregner mekanisk effekt som funksjon av veivinkel (kW)  

W_dot(i, j) = (N_cyl * W(i, j) * N / N_r) / 1000  

'Beregner varmeovergang som funksjon av veivinkel (kW)  

Q_dot_w(i, j) = (N_cyl * Q_w(i, j) * N / N_r) / 1000  

'=====

```

Figur 3.11: Kode for beregning av sylindertemperatur, arbeid per sylindrer per kraftsyklus og omregning til effekt for varmeovergang og arbeid.

Gasskonstanten  $R$  og forholdet mellom gassens varmekapasiteter  $\gamma$  ble oppdatert etter hver iterasjon ved Krieger og Bormans metode presentert i vedlegg E.

### Beregning av effekt, middeltrykk og virkningsgrad

Verdiene for varmeovergang og arbeid fra sylinderen er beregnet for ett kraftslag i én sylindrer. Verdiene er derfor omregnet for å kunne brukes i energianalysen av stempelmotoren. Figur 3.11 inneholder kode for beregning av sylindertemperatur, arbeid per sylindrer per kraftsyklus og omregning til effekt for varmeovergang og arbeid.

I stempelmotormodellen er også motorens indikerte middeltrykk (IMEP), bremsespesifikke middeltrykk (BMEP) beregnet. IMEP er beregnet på bakgrunn av beregnet mekanisk effekt fra

```

'=====  

'Beregner indikert middeltrykk (bar)  

Dim imep(0, 3) As Double  

imep(0, j) = W_dot(360, j) * 1200 / (V_s * N_cyl * 1000 * RPM)  

Worksheets("Front").Range("J4:M4") = imep  

'Beregner bremse-spesifikt middeltrykk fra målt effekt (bar)  

Dim bmep(0, 3) As Double  

bmep(0, j) = (W_dot_el_m(0, j)) * 1200 / (0.9028 * V_s * N_cyl * 1000 * RPM)  

Worksheets("Front").Range("J5:M5") = bmep  

'Beregner friksjonstap i motor (bar)  

Dim fmep(0, 3) As Double  

fmep(0, j) = imep(0, j) - bmep(0, j)  

Worksheets("Front").Range("J6:M6") = fmep  

'Beregner mekanisk virkningsgrad (-)  

Dim eta_m(0, 3) As Double  

eta_m(0, j) = bmep(0, j) / imep(0, j)  

Worksheets("Front").Range("J7:M7") = eta_m  

'=====

```

Figur 3.12: Kode for beregning av middeltrykk og mekanisk virkningsgrad.

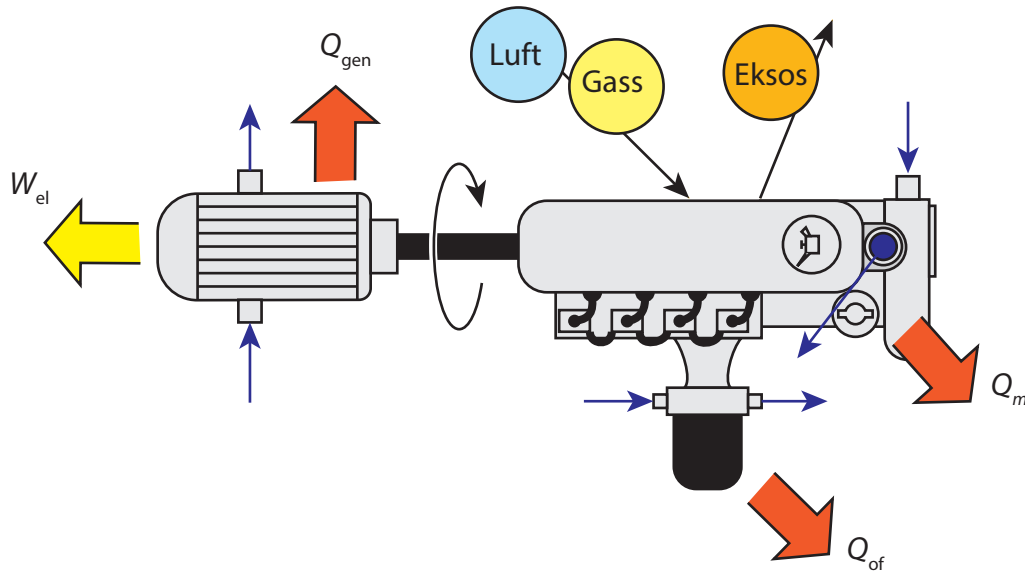
stempelmotormodellen. BMEP er beregnet på basis av målt elektrisk effekt og generatorens virkningsgrad. FMEP, friksjonstapet i stempelmotoren, er beregnet som differansen mellom IMEP og BMEP. Motorens mekaniske virkningsgrad er beregnet som forholdet mellom IMEP og BMEP. Kode for beregning av middeltrykk og mekanisk virkningsgrad finnes i figur 3.12.

### 3.2.3 Energibalanse for stempelmotoren

På grunn av deres sammenkobling i beregningsmodellen er generator og oljefilter inkludert i stempelmotorens energibalanse. Energibalansen er skrevet som:

$$\dot{Q}_g = \dot{W}_{el} + \dot{Q}_m + \dot{Q}_{of} + \dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_e \quad (3.27)$$

$\dot{W}_{el}$  er her målt elektrisk effekt,  $\dot{Q}_m$  er varmeovergang fra sylindergassen til kjølevannet og  $\dot{Q}_{of}$  er varmen som overføres fra motorens smøreolje til kjølevannet.  $\dot{Q}_{of}$  er antatt å være lik friksjonstapet i motor, som er beregnet som forskjellen mellom indikert arbeid, beregnet med stempelmotormodellen, og brutto mekanisk arbeid, beregnet fra målt elektrisk arbeid. I beregningene er en generatorvirkningsgrad på  $\eta = 90,28\%$ , beregnet ut i fra elektrisk og mekanisk effekt oppgitt i datablad [50], brukt.  $\dot{Q}_{gen}$  representerer friksjonsvarme fra generator til kjølevann.



Figur 3.13: Stempelmotor med varmeoppsamling i motorblokk, oljefilter og generator.

Denne er også beregnet på bakgrunn av målt elektrisk effekt og generatorens virkningsgrad.  $\dot{Q}_e$  representerer energien som forlater stempelmotoren i eksosgassene. Denne mengden er beregnet ved å løse ligning 3.27.

I tillegg til i motorblokk, oljefilter og generator foregår det også varmeovergang i en kombinert innsug- og eksosmanifold og eksosgassvarmeveksler. Varmeovergang i manifold er beregnet ved:

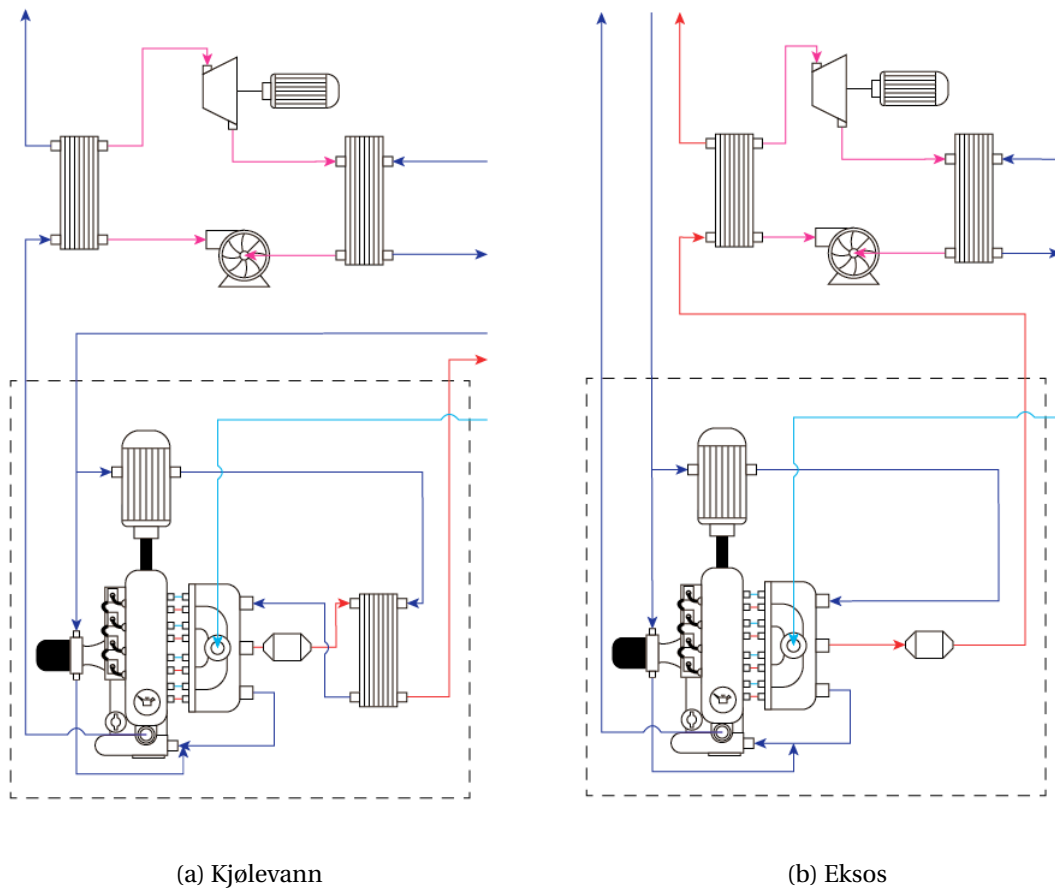
$$\dot{Q}_{\text{man}} = \dot{m}_e \cdot (h_2 - h_3) \quad (3.28)$$

Varmeovergang i eksosgassvarmeveksler er beregnet ved:

$$\dot{Q}_{\text{vv}} = \dot{m}_e \cdot (h_4 - h_5) \quad (3.29)$$

### 3.2.4 Modellering av ORC-krets

ORC-kretsen er modellert i to konfigurasjoner: en enkel krets tilkoblet kjølevann etter CHP-enheten og en enkel krets tilkoblet eksosgassrør i stedet for eksosgassvarmeveksleren som nå



Figur 3.14: Konfigurasjon: (a) enkel ORC tilkoblet kjølevann og (b) enkel ORC tilkoblet eksos.

er der (se figur 3.14a og 3.14b).

I modellen er det brukt arbeidsfluider med passende kritiske temperaturer for hver konfigurasjon. Arbeidsfluidene undersøkt er presentert i tabell 3.6.

Fordampningsvarmen i de to scenarioene er for konfigurasjonen med ORC tilkoblet kjølevann og konfigurasjonen med ORC tilkoblet eksos satt til henholdsvis den totale varmemengden til kjølevann og varmemengden som veksles fra eksosgassen til kjølevann i eksosgassvarmeveksleren. Pumpen og ekspanderen i hvert tilfelle er modellert med 90 % isentropisk virkningsgrad. I alle tilfeller er også arbeidsfluidet modellert med *superheating* 10 K over mettet damp før ekspander. Kjøletemperatur i kondensator er satt til 300 K. Arbeidsfluidets temperatur før pumpe er satt til 10 K over kondensatortemperaturen, dvs. til 310 K. Beregninger er utført slik som beskrevet i seksjon 2.4.3.



Tabell 3.6: Arbeidsfluider undersøkt i ORC-modellen

| Arbeidfluid | GWP  | Kritisk temperatur [K] | Kritisk trykk [MPa] | Molekylvekt [kg/kmol] |
|-------------|------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| Kjølevann   |      |                        |                     |                       |
| R236ea      | 1350 | 412,4                  | 3,42                | 152                   |
| R236fa      | 9400 | 398,1                  | 3,2                 | 152                   |
| R600        | 20   | 425,1                  | 3,86                | 58,1                  |
| R600a       | 20   | 407,8                  | 3,6                 | 58,1                  |
| R123        | 120  | 456,8                  | 3,7                 | 152,9                 |
| R134a       | 1300 | 374,2                  | 4,1                 | 102                   |
| R245fa      | 950  | 427,01                 | 3,7                 | 134                   |
| Eksos       |      |                        |                     |                       |
| Cyclohexane | Lav  | 553,6                  | 4,1                 | 84,2                  |
| Benzene     | Lav  | 562,0                  | 4,9                 | 78,1                  |
| Toluene     | Lav  | 591,8                  | 4,1                 | 92,1                  |
| nonane      | Lav  | 594,6                  | 2,3                 | 128,3                 |
| decane      | Lav  | 617,7                  | 2,1                 | 142,3                 |

### 3.2.5 Eksergibalanse for CHP-enheten

CHP-enhetens eksergibalanse er basert på masse- og energistrømmene tidligere beregnet. Balansen er definert som følger:

$$\dot{X}_g = \dot{W}_{el} + \dot{X}_v + \dot{X}_e + \dot{X}_{varmetap} + \dot{X}_{odelagt} \quad (3.30)$$

I motsetning til masse og energi kan eksergi ødelegges. Eksergibalansen er dermed tilført elementet  $\dot{X}_{odelagt}$  som representerer eksergiødeleggelsen i enheten.  $\dot{X}_{varmetap}$  representerer arbeidspotensialet i varmen som forlater enheten ved konveksjon og stråling. Det antas at varme overføres til container ved containerens lufttemperatur. Eksergi medfølgende varmetapet er derfor beregnet ved:

$$\dot{X}_{varmetap} = \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) \cdot \dot{Q}_{tap} \quad (3.31)$$

$\dot{W}_{el}$  representerer, som i CHP-enhetens energibalanse, netto produsert elektrisk arbeid.  $\dot{X}_v$  representerer arbeidspotensialet i forhold til omgivelsene som er tilført den hete kjølevannskretsen. Det tilførte arbeidspotensialet er beregnet som forskjellene i fysisk eksergi i kjølevannet inn og ut av CHP-enheten ved:

$$\dot{X}_v = \dot{m}_v \cdot [(h_{v,ut} - h_{v,inn}) - T_0(s_{v,ut} - s_{v,inn})] \quad (3.32)$$

$\dot{X}_g$  representerer den kjemiske eksergien i enhetens drivstoff. Drivstoffets kjemiske eksergi er beregnet som det maksimalt oppnåelig arbeidet ved støkiometrisk forbrenning. Det molspe-  
sifikke arbeidspotensialet for hver komponent  $i$  i naturgassen er beregnet ved [63]:

$$\psi_{kjem,i} = \psi_{kjem,ref,i} \frac{T_0}{T_{ref}} + \frac{T_{ref} - T_0}{T_{ref}} (-\Delta H_{ref}) + T_0 R \sum_{j \neq i} \nu_j \ln \frac{y_{ref,j}}{y_{e,j}} \quad (3.33)$$

hvor  $\psi_{kjem,ref,i}$ ,  $y_{ref,j}$  og  $-\Delta H_{ref}$  er verdier ved referansetilstanden ( $T_{ref}$ ,  $P_{ref}$ ,  $RF_{ref}$ ). Naturgassen samlede eksergi er beregnet ved

$$\dot{X}_g = \frac{\dot{m}_g}{M_g} \cdot \left( \sum_i y_i \psi_{kjem} + RT_0 \sum_i y_i \ln y_i \right) \quad (3.34)$$

$\dot{X}_e$  representerer arbeidspotensialet eksosgassene innehar. Dette arbeidspotensialet består i både fysisk og kjemisk eksergi. Eksosgassenes fysiske eksergi er beregnet ved:

$$\psi_{\text{fys}} = c_p \left[ (T_e - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_e}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left( \frac{P_e}{P_0} \right) \quad (3.35)$$

Eksosgassens kjemiske eksergi er beregnet på samme måte som den kjemiske eksergien til CHP-enhetens drivstoff (se Ligning 3.33 og 3.34).

Eksergiødeleggelsen er beregnet ut i fra eksergibalansen ved:

$$\dot{X}_{\text{ødelagt}} = \dot{X}_g - (\dot{W}_{\text{el}} + \dot{X}_\nu + \dot{X}_e + \dot{X}_{\text{varmetap}}) \quad (3.36)$$

### 3.2.6 Eksergibalanse for indre komponenter

Ekergianalyse av systemets indre komponenter fokuserte på å bestemme hvor eksergiødeleggelsen i systemet er størst. Eksergiødeleggelse er beregnet som produktet av omgivelsestemperatur og generert entropi som i ligning 2.50. Generert entropi er beregnet som i ligning 2.54 for eksosgassvarmeveksler, manifold og oljefilter.

For generator er ødelagt eksergi beregnet ved:

$$\dot{X}_{\text{ødelagt}} = \dot{W}_{\text{mek}} - \dot{W}_{\text{el}} - \frac{\dot{Q}_{\text{gen}}}{T_k} \quad (3.37)$$

$T_k$  er satt til å være den gjennomsnittlige kjølevannstemperaturen i varmeoverføringen.

For stempelmotoren er ødelagt eksergi beregnet ved å subtrahere de resterende komponentenes eksergiødeleggelse fra den totale eksergiødeleggelsen. Dette på grunn av vanskeligheten å bestemme eksergiødeleggelsen i den kompliserte forbrenningsprosessen.

## 3.3 Økonomisk analyse

Den økonomiske analysen er utført i henhold til metoder presentert av Bejan et al. [7].

Den økonomiske analysen fokuserte på estimering av investeringskostnader, estimering av drift- og vedlikeholdskostnader og beregning av annuiteter.

### 3.3.1 Estimering av investeringskostnader

Kostnadsanslag for en XRGI CHP-enhet er hentet inn fra EC Power. Investeringskostnaden angitt er medfølgende "...styretavle, varmfordeler, [anleggsdokumentasjon], motorolie og [*Engine Coolant*]" [67].

Installasjonskostnad er hentet fra samme kostnadsanslag [67]. Det er antatt at bygget enheten installeres i allerede har et system for vannbåren varme.

Det er også antatt at gassforsyning installeres samtidig med enheten. Engangskostnad for installering av gass kommer under Service og fasiliteter i tabell 3.9.

Det er antatt at det ikke behøves utgifter til ingeniørtjenester og/eller ledelse for bruk eller tilkobling av CHP-enheten. En kostnad for eventualiteter er beregnet i henhold til prosenten presentert i tabell 2.2.

For ORC-kretsen er estimat for utstyrskostnader hentet fra nettsted for elektronisk handel. Estimert av andre indirekte kostnader er beregnet i henhold til prosentene presentert i tabell 2.2.

### 3.3.2 Estimering av drift- og vedlikeholdskostnader

Drivstoffkostnader er basert på pris for naturgass i rør inkludert statlige avgifter [68]. Årlig forbruk er basert på et kontorbygg i bergensområdet (se Tabell 3.8)

Service utføres i følge dokumentasjonen etter 8500 driftstimer eller etter 2 år. Det antas at enheten er i tilnærmet konstant drift, og serviceutgiftene antas derfor å være årlige. En service utgift inkluderer i følge dokumentasjonen "Motorolie CHP NG 30 (30 l i 3 [dunker]), prop, luftfilter, oliefilter, [tennpluggen]." [67].

XRGI-enhetens drift i forhold til å dekke byggets energibehov er basert på et enkelt regneark for utregning av besparelse ved installasjon av en XRGI-enhet fra EC Power [67]. Enheten kjøres her 12 timer med full last (13 kW) og 12 timer med lav last (4,7 kW). Dette medfører en kapasitetsfaktor på 68 %.

### 3.3.3 Beregning av annuiteter

De siste årene har det vært en voldsom stigning i KPI for energiprodukter, denne stigningen er ikke realistisk at fortsetter ut CHP-enhetens levetid. En gjennomsnittlig stigning i KPI over de

Tabell 3.7: Parametre og antagelser for beregning av kapitalkostnader.

|   |              |
|---|--------------|
| Kurs DKK (29.04.2015)                         | kr 1,13      |
| Kurs Dollar (30.04.2015)                      | kr 7,54      |
| Gjennomsnittlig nominell eskaleringsrate      | 2,3 %        |
| Gjennomsnittlig nominell eksaleringsrate gass | 5,2 %        |
| Gjennomsnittlig kostnad av penger             | 12 %         |
| Økonomisk levetid (år)                        | 20           |
| Gass (Gasnor)                                 |              |
| · Pris (/Sm <sup>3</sup> )                    | kr 5,50      |
| · Fasteledd (/år)                             | kr 975,00    |
| · CO2-avgift til staten (/Sm <sup>3</sup> )   | kr 0,84      |
| · Tilknytningsgebyr                           | kr 10 000,00 |
| · Forbruk (Sm <sup>3</sup> /år)               | 26716,216    |
| O&M   |              |
| · Kapasitetsfaktor (fra EC Power)             | 68 %         |
| · Service (etter 8500 h eller 2 år)           | kr 4 395,45  |
| · Type finansiering                           | Egenkapital  |

Tabell 3.8: Årlig energiforbruk for et kontorbygg i bergensområdet (fra SSB)

| El-forbruk (kWh) | Varmeforbruk (kWh) | Totalt forbruk (kWh) |
|------------------|--------------------|----------------------|
| 96955            | 90089              | 187045               |

Tabell 3.9: Estimat av total investeringskostnad for CHP-enheten i norske kroner (NOK)

|  |                     |                      |
|--|---------------------|----------------------|
| I. Fast-investeringer (FCI)                |                     |                      |
| A. Direkte kostnader (DC)                  |                     |                      |
| 1. <i>Onsite</i> kostnader                 |                     |                      |
| Innkjøpt-utstyr                            |                     |                      |
| ·  | XRGI-enhet          | kr 232 330,68        |
| <b>Total kostnad innkjøpt utstyr (PEC)</b> |                     | <b>232 330,68</b>    |
| Installasjon                               |                     | kr 84 380,94         |
| Rør  |                     | kr 0,00              |
| Instrumentering                            |                     | kr 0,00              |
| <b>Total onsite kostnader</b>              |                     | <b>kr 316 711,61</b> |
| 2. <i>Offsite</i> kostnader                |                     |                      |
| ·  | Service fasiliteter | kr 10 000,00         |
| <b>Total offsite kostnader</b>             |                     | <b>kr 10 000,00</b>  |
| <b>Total direkte kostnader</b>             |                     | <b>kr 326 711,61</b> |
| B. Indirekte kostnader (IC)                |                     |                      |
| 1. Ingeniørtjenester og ledelse            |                     | kr 0,00              |
| 3. Eventualiteter                          |                     | kr 23 233,07         |
| <b>Total indirekte kostnader</b>           |                     | <b>kr 23 233,07</b>  |
| <b>Sum FCI</b>                             |                     | <b>kr 349 944,68</b> |

Tabell 3.10: Estimat av total investeringskostnad for ORC-kretsen i norske kroner (NOK)

|  |                     |                     |  |
|--|---------------------|---------------------|--|
| <b>I. Fast-investeringer (FCI)</b>         |                     |                     |  |
| <b>A. Direkte kostnader (DC)</b>           |                     |                     |  |
| 1. <i>Onsite</i> kostnader                 |                     |                     |  |
| Innkjøpt-utstyr                            |                     |                     |  |
| .  | Platevarmeveksler   | kr 1 024,96         |  |
| .  | Platevarmeveksler   | kr 1 024,96         |  |
| .  | Pumpe               | kr 1 055,11         |  |
| .  | Ekspander           | kr 7 536,48         |  |
| .  | Kjølemiddel         | kr 1 895,00         |  |
| <b>Total kostnad innkjøpt utstyr (PEC)</b> |                     | <b>kr 12 536,50</b> |  |
| Innkjøpt-utstyr, installasjon              |                     | kr 00,00            |  |
| Rør  |                     | kr 4 137,05         |  |
| Instrumentering                            |                     | kr 1 253,65         |  |
| <b>Total onsite kostnader</b>              |                     | <b>kr 17 927,20</b> |  |
| 2. <i>Offsite</i> kostnader                |                     |                     |  |
| .  | Service fasiliteter | kr 1 253,65         |  |
| <b>Total offsite kostnader</b>             |                     | <b>kr 1 253,65</b>  |  |
| <b>Total direkte kostnader</b>             |                     | <b>kr 19 180,85</b> |  |
| <b>B. Indirekte kostnader (IC)</b>         |                     |                     |  |
| 1. Ingeniørtjenester og ledelse            |                     | kr 00,00            |  |
| 3. Eventualiteter                          |                     | kr 1 253,65         |  |
| <b>Total indirekte kostnader</b>           |                     | <b>kr 1 253,65</b>  |  |
| <b>Sum FCI</b>                             |                     | <b>kr 20 434,5</b>  |  |

siste 20 årene, mellom 1984-2014, er derfor brukt. Denne er på 5,2 %. Stigning i KPI for andre produkter er for kontinuitetens del valgt over samme periode. Denne er på 2,3 %. Levealderen til anlegget er estimert til å være 20 år.

Den økonomiske analysen er utført som beskrevet i seksjon 2.6.3.

### 3.4 Eksergoøkonomisk analyse

Den eksegoøkonomiske analysen er utført på bakgrunn av ekserganalysen og den økonomiske analysen. I den eksegoøkonomiske analysen ble en balanse for systemet i sin helhet, både med og uten en ORC-krets, brukt til å sammenligne den spesifikke kostnaden ekseergi produseres med i systemet.

Systemet regnes å ha en drivstoffstrøm, nemlig naturgassen. Naturgassens eksergispesifikke pris er regnet ved:

$$c_F = \frac{FC \cdot A_{CO_2}}{\varepsilon_g \cdot \rho_{iso,g}} \quad (3.38)$$

hvor FC er drivstoffkostnadene i kr/Sm<sup>3</sup>, A<sub>CO<sub>2</sub></sub> er en statlig CO<sub>2</sub> avgift i kr/Sm<sup>3</sup>,  $\varepsilon_g$  er den masse-spesifikke kjemiske eksergien til naturgassen og  $\rho_{iso,g}$  er naturgassens tetthet ved standardbetingelsene definert i ISO 13443.

Systemet regnes å ha to tap: varmetap i eksosen og varmetap ved konveksjon og stråling. Den spesifikke kostnadene til tap i systemet er beregnet i henhold til F-metoden (bl.a beskrevet i referanse [7]). I følge F-metoden har tap i systemet samme eksergispesifikke kostnad som systemets drivstoff. Følgelig er:

$$c_{tap} = c_F \quad (3.39)$$

Systemet har to produkter: elektrisk kraft og varmtvann. Den spesifikke kostnaden til disse er definert i henhold til P-metoden (også beskrevet i referanse [7]) som like. Dvs.:

$$c_{el} = c_{vv} \quad (3.40)$$

Følgende eksegoøkonomiske balanse er satt opp for systemet:

$$c_F \cdot \dot{X}_g = c_F \cdot (\dot{X}_e + \dot{X}_{varmetap}) + \dot{Z}_{OM} + \dot{Z}_{CI} \quad (3.41)$$



hvor  $\dot{Z}_{OM}$  er drift- og vedlikeholdskostnader og  $\dot{Z}_{Cl}$  er kapitalkostnader oppgitt i kr/s.

# Kapittel 4

## Resultater

### 4.1 Måleresultater

Måleresultatene fra målinger utført 10.07.2015 er presentert i tabell 4.1. Resultatene presentert her er bare det utvalget av resultatene som ble brukt i analysene utført i denne oppgaven. Av målingene kommer det frem at utslipp av H<sub>2</sub> og SO<sub>2</sub> som antatt er neglisjerbare i forhold til andre utslipp fra enheten.

Tabell 4.1: Måleresultatene fra måling med gassanalyser 10.07.2015.

| Test nr | Tid   | Ønsket effekt<br>kW | Temp. eksos<br>°C | Gassanalyser  | H <sub>2</sub><br>ppm | SO <sub>2</sub><br>ppm |
|---------|-------|---------------------|-------------------|---------------|-----------------------|------------------------|
| 1       | 11:25 | 13,5                | 471,9             | Tiesto 350 XL | 13                    | -                      |
| 2       | 11:37 | 4,5                 | 397,3             | Tiesto 350 XL | 8                     | -                      |
| 3       | 12:32 | 13,5                | 470,2             | Horiba PG 350 | -                     | 6,3                    |
| 4       | 12:38 | 10,5                | 459,2             | Horiba PG 350 | -                     | 7,1                    |
| 5       | 12:43 | 7,5                 | 426,7             | Horiba PG 350 | -                     | 6,9                    |
| 6       | 12:51 | 4,5                 | 397               | Horiba PG 350 | -                     | 4,3                    |

Blant måleresultatene finnes også temperaturen målt mellom manifold og katalysator som er brukt i analysen av CHP-enhetens indre energi- og eksergistrømmer. Måling av eksostemperatur ut fra enheten i 2015 gav en verdi under kjølevanntemperaturen, en umulig verdi. Denne

Tabell 4.2: Output fra den iterative stempelmotormodellen.

|                        |        |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Ønsket effekt (kW)     | 13,5   | 10,5   | 7,5    | 4,5    |
| IMEP (bar)             | 5,97   | 4,87   | 3,75   | 2,62   |
| BMEP (bar)             | 5,75   | 4,30   | 3,13   | 1,83   |
| FMEP (bar)             | 0,22   | 0,58   | 0,63   | 0,80   |
| Mekanisk virkningsgrad | 96 %   | 88 %   | 83 %   | 70 %   |
| Eksostemperatur (°C)   | 629,58 | 508,34 | 395,95 | 285,67 |
| Luftstrømning (kg/s)   | 0,0203 | 0,0169 | 0,0133 | 0,0087 |
| Indikert effekt (kW)   | 15,25  | 12,45  | 9,59   | 6,70   |
| Bremseeffekt (kW)      | 14,70  | 10,98  | 7,98   | 4,66   |

er dermed ikke brukt i analysen. Resten av måleresultatene finnes i vedlegg G.

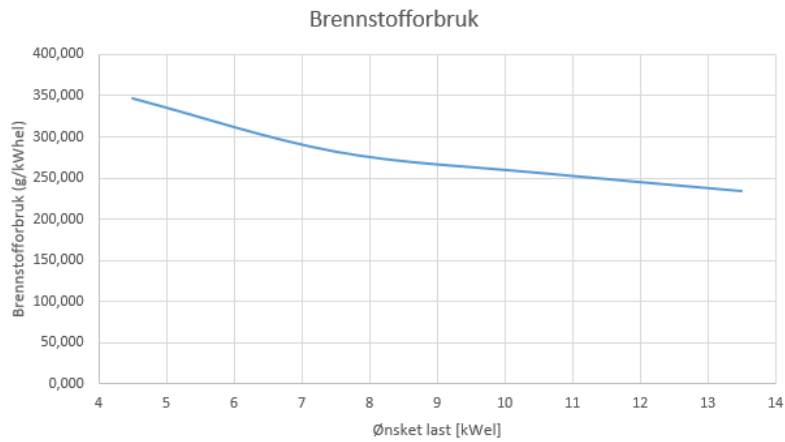
Analyse av noen av ytelsesparametrene for motoren, plottet på bakgrunn av målinger utført i 2007, viser at brennstoffurbruket per kWh produsert elektrisk kraft er laveste ved full last (se figur 4.1a). Enhetens elektriske virkningsgrad er på ligningende måte høyest ved denne lasten. CHP-enhetens varmekvinningsgrad kan observeres å være høyest ved 4,5 kW last, dvs. ved den laveste lasten (se figur 4.1b). Farlige utslipp fra enheten (HC, CO og NO<sub>x</sub>) er samlet lavest ved full last (se figur 4.1c).

## 4.2 Energianalyse

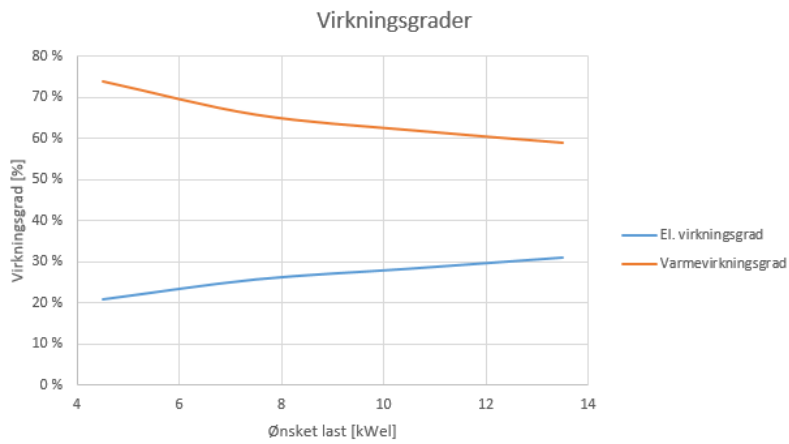
Sankey-diagrammet i figur 4.2 representerer energiflytene i CHP-enheten uten ORC-basert spillvarmeutnyttelse. Verdien merket "Eksos" representerer forbrenningsvarmen som forlater CHP-enheten i eksosen, mens verdien merket "Kjølevann" representerer forbrenningsvarmen som overføres til kjølevannskretsen. Det kommer frem av diagram at CHP-enhetens elektriske virkningsgrad er 29 %. Den totale virkningsgraden til enheten er 84 % ved full effekt.

En analyse av enhetens energifordeling ved 4,5, 7,5, 10,5 og 13,5 kW (figur 4.3) viser at CHP-enheten har noenlunde lik total virkningsgrad gjennom hele ytelsesspekteret, men at varmekvinningsgrad øker med lavere elektrisk ytelse.

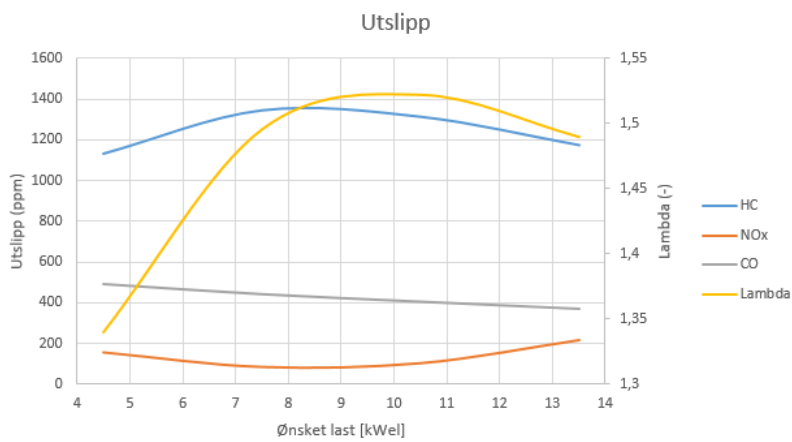
Tabell 4.2 viser resultatene fra den iterative stempelmotormodellen som er utviklet for denne



(a) Brennstoffforbruk

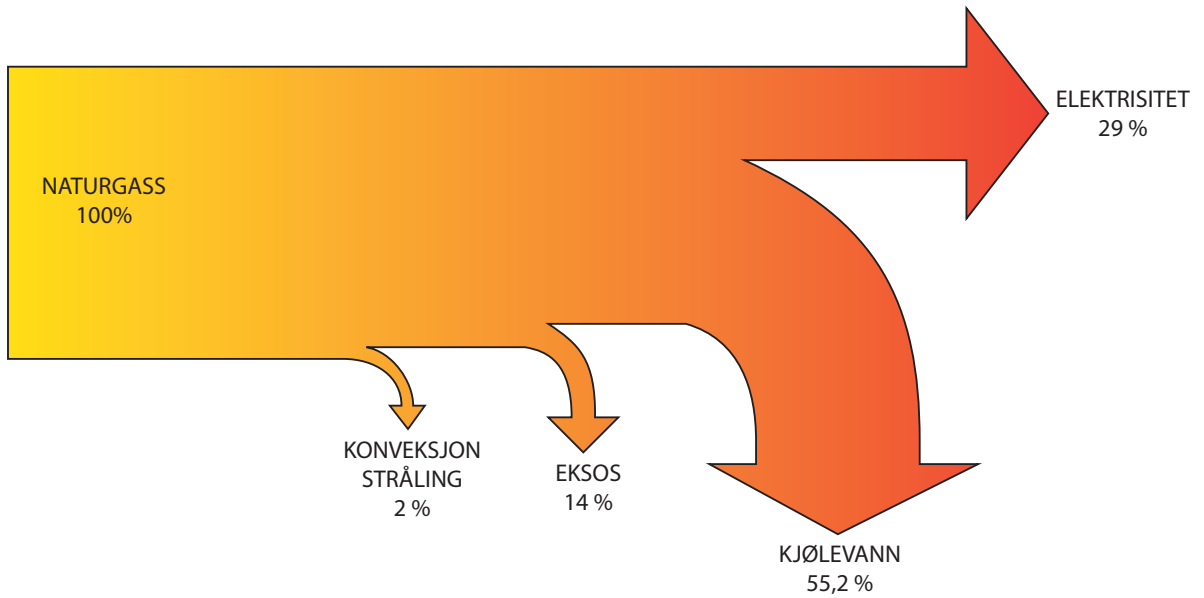


(b) Virkningsgrader

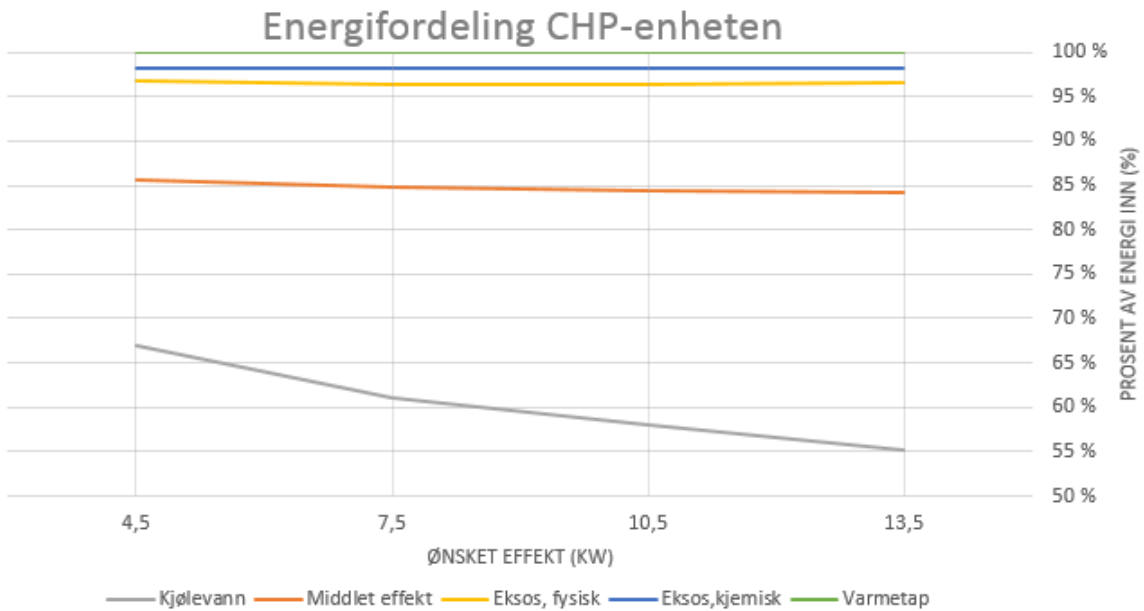


(c) Utslipp

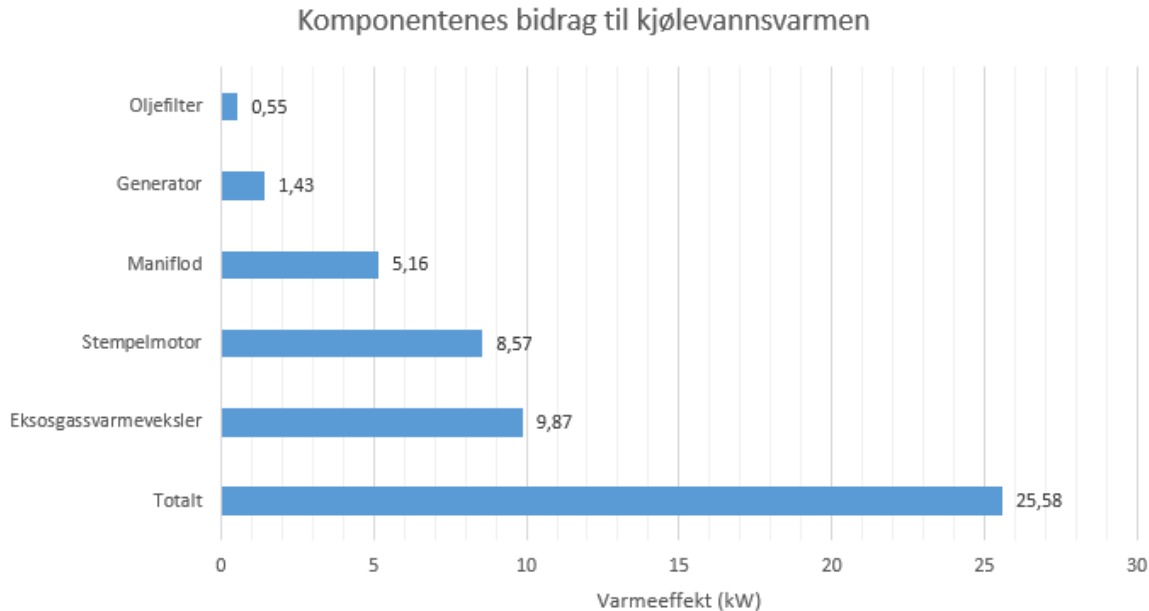
Figur 4.1: Grafisk fremstilling ytelsesparametre for CHP-enheten fra målinger gjort i 2007.



Figur 4.2: Sankey-diagram for CHP-enheten ved full effekt (13,5 kW).



Figur 4.3: Energifordelingen til CHP-enheten i prosent av energi inn ved: 4,5, 7,5, 10,5 og 13,5 kW.



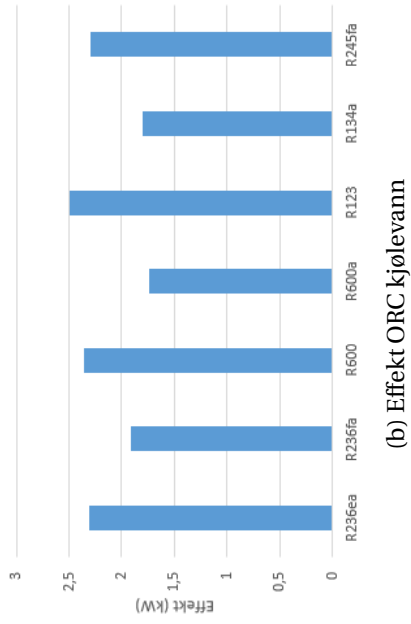
Figur 4.4: Komponentens varmeovergang til kjølevann ved full elektrisk effekt.

oppgaven. I følge resultatene har stempelmotoren høyest mekanisk virkningsgrad ved full ytelse. Dette selv uten modellering av strømningsstap i strupeventil. Av resultatene i tabell 4.2 kommer det også frem at stempelmotormodellen, ved ønsket elektrisk effekt under 10,5 kW gir lavere enn målt eksostemperatur før katalysator. Det er derfor valgt å fokusere på CHP-enheten ved full effekt ved videre analyser.

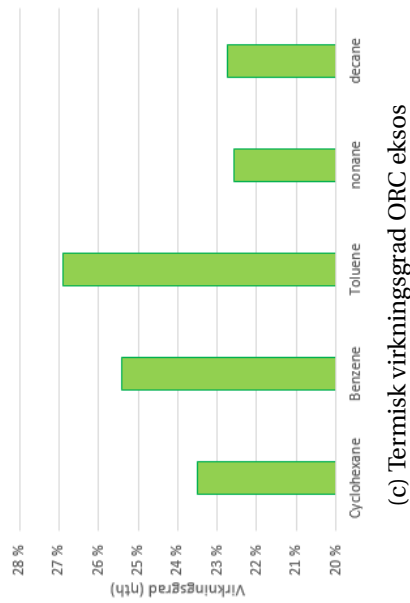
Figur 4.4 viser varmemengden som overføres til kjølevannet i hver vannkjølte komponent. Det kommer frem at den største varmemengden overføres i eksosgassvarmeveksleren. Her overføres 9,87 kW termisk energi. Totalt overføres det 25,58 kW termisk energi til kjølevannet.

I analyse av ORC er to scenarier undersøkt. Det første er et scenario hvor en fordampner er tilkoblet kjølevannskretsen etter CHP-enheten. ORC-kretsen vil i dette tilfellet utnytte 25,58 kW varme i fordampneren. I det andre scenarioet er fordampner tilkoblet eksosen i CHP-enheten i stedet for eksosgassvarmeveksleren. Her brukes 9,87 kW varme i fordampneren.

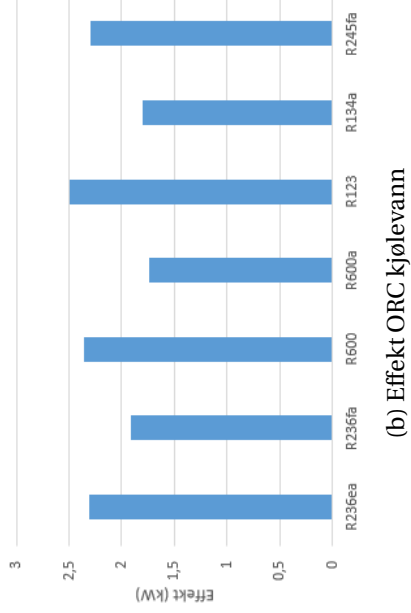
Figur 4.5 viser resultatene av analysen av de to scenarioene. Av figuren kommer det frem at konfigurasjonen med ORC-kretsen tilkoblet eksos utført med Toluene som arbeidsfluid er den som gir høyest ytelse ved høyest termisk virkningsgrad. En enkel ORC-krets tilkoblet eksos med Toluene som arbeidsfluid kan i følge analysen levere 2,66 kW elektrisk effekt ved 27 % termisk virkningsgrad og 42 % andre lovs virkningsgrad.



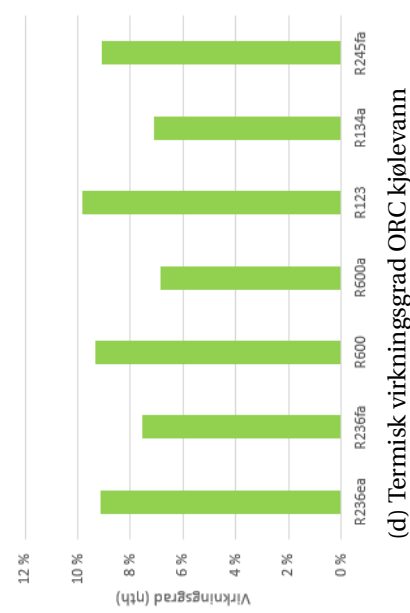
(a) Effekt ORC eksos



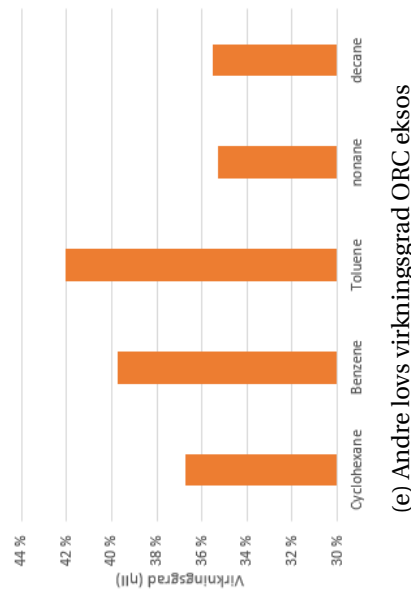
(b) Termisk virkningsgrad ORC eksos



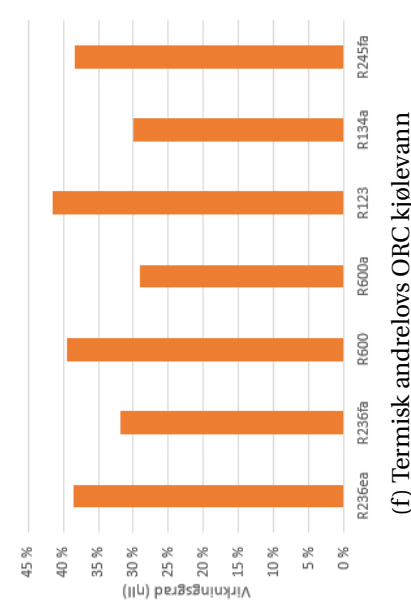
(c) Effekt ORC kjølevann



(d) Termisk virkningsgrad ORC kjølevann

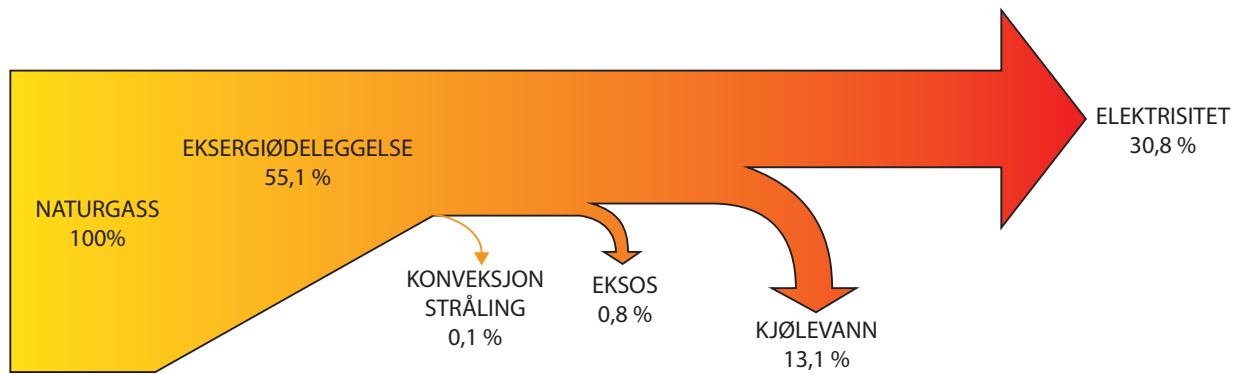


(e) Andre lvs virkningsgrad ORC eksos

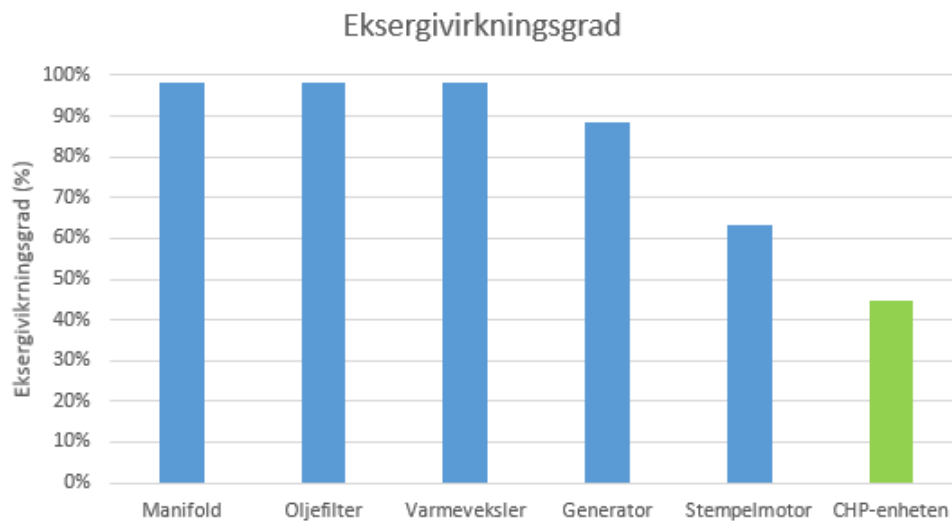


(f) Termisk andreløvs ORC kjølevann

Figur 4.5: Resultat fra analyse av to muligheter for tilkobling av ORC: på eksos (t.v.) og på kjølevann (t.h.).



Figur 4.6: Grassmann-diagram for CHP-enheten ved full effekt (13,5 kW).



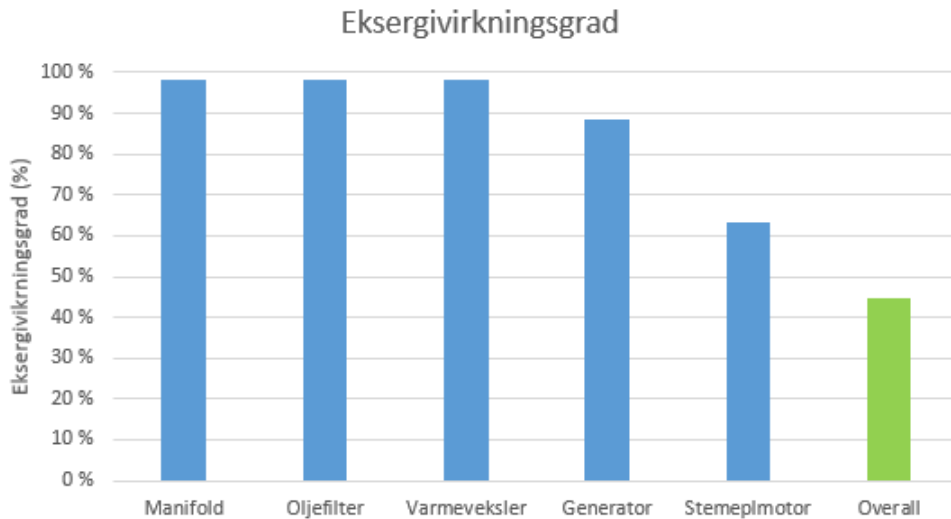
Figur 4.7: Oversikt over eksergiødeleggelse i CHP-enhetens viktigste komponenter.

### 4.3 Eksergianalyse

Grassmann-diagrammet i figur 4.6 viser prosentverdier for eksergiflytene ut av systemet. Verdiene merket "Eksos" og "Kjølevann" viser på samme måte som i Sankey-diagrammet endringene i eksergi i henholdsvis luft- og kjølevannskretsene. Av diagrammet kommer det frem at systemets totale eksergivirkningsgrad er 43 %. Eksergiødeleggelsen i CHP-enheten er hele 52 % av tilført eksergi.

Figur 4.7 viser en oversikt eksergiødeleggelsen i de CHP-enhetens. Som forventet er eksergiødeleggelsen desidert størst i stempelmotoren, hvor energikonverteringen finner sted.





Figur 4.8: Oversikt over eksergivirkningsgraden for CHP-enhetens viktigste komponenter.

Tabell 4.3: Oversikt over energi- og tilhørende eksergistrømmer i systemet.

| Komponent             | Varme (kW) | Arbeid (kW) | Eksergi (kW) |
|-----------------------|------------|-------------|--------------|
| Generator             | 1,43       | 13,27       | 13,57        |
| Manifold              | 5,16       | 0,00        | 1,17         |
| Eksosgassvarmeveksler | 9,87       | 0,00        | 2,16         |
| Oljefilter            | 0,55       | 0,00        | 0,12         |
| Varmetap              | 0,86       | 0,00        | 0,052        |
| Stempelmotor          | 8,57       | 14,70       | 16,92        |

Figur 4.8 viser eksergivirkningsgraden til CHP-enhetens indre komponenter, samt CHP-enheten i helhet. Av figuren kommer det frem at CHP-enheten har dårligere eksergivirkningsgrad enn alle sine indre komponenter.

Tabell 4.3 inneholder en oversikt over alle energistrømmene i systemet, og tilhørende eksergistrømmer. Av tabellen synes det at eksergistrømmene er beskjedne i komponenter hvor kan varme overføres i forhold til konverteringsenhetene: stempelmotoren og generatoren.

Tabell 4.4 inneholder en oversikt over alle massestrømmene i systemet med tilhørende eksergistrømmer. Eksergistrømmene i tabell 4.4 representerer strømmens arbeidspotensiale i forhold til omgivelsene, og ikke nødvendigvis eksergi tilført strømmen av forbrenningsprosessen.

Tabell 4.4: Oversikt over massestrømmene i systemet.

| Tilstand<br>nr | Flyt identifikasjon | Massestrøm $\dot{m}$<br>kg/s | Temperatur, $T$<br>°C | Trykk, $P$<br>kPa | Entalpi, $h$<br>kJ/kg | Entropi, $s$<br>kJ/kgK | Spesifikk eksergi, $\psi$<br>kJ/kg | Eksergi, $\dot{X}$<br>kW |
|----------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1              | Luft og gass        | 0,0212                       | 23,7                  | 100,92            | 298,747               | 3,877                  | 56,020                             | 1,185                    |
| 2              | Eksos               | 0,0212                       | 629,6                 | 100,92            | 1189,308              | 5,039                  | 622,743                            | 13,178                   |
| 3              | Eksos               | 0,0212                       | 472,7                 | 100,92            | 945,378               | 4,828                  | 437,555                            | 9,259                    |
| 4              | Eksos, renset       | 0,0212                       | 503,6                 | 100,92            | 1023,368              | 4,872                  | 503,202                            | 10,648                   |
| 5              | Eksos, renset       | 0,0212                       | 93,1                  | 100,92            | 556,705               | 4,089                  | 254,963                            | 5,395                    |
| 6              | Vann                | 0,488                        | 79,9                  | 182               | 334,845               | 1,075                  | 35,308                             | 17,243                   |
| 7              | Vann                | 0,416                        | 79,9                  | 182               | 334,845               | 1,075                  | 35,308                             | 14,692                   |
| 8              | Vann                | 0,416                        | 80,8                  | 182               | 338,278               | 1,084                  | 36,034                             | 14,994                   |
| 9              | Vann                | 0,416                        | 86,4                  | 182               | 362,010               | 1,151                  | 41,214                             | 17,150                   |
| 10             | Vann                | 0,416                        | 89,4                  | 182               | 374,415               | 1,185                  | 44,038                             | 18,325                   |
| 11             | Vann                | 0,072                        | 79,9                  | 182               | 334,845               | 1,075                  | 35,308                             | 2,551                    |
| 12             | Vann                | 0,072                        | 81,7                  | 182               | 342,454               | 1,096                  | 36,924                             | 2,667                    |
| 13             | Vann                | 0,488                        | 88,2                  | 182               | 369,687               | 1,172                  | 42,952                             | 20,976                   |
| 14             | Vann                | 0,488                        | 92,3                  | 182               | 386,626               | 1,219                  | 46,893                             | 22,900                   |

Tabell 4.5: Beregnede spesifikke kostnader for CHP-enheten med og uten ORC.

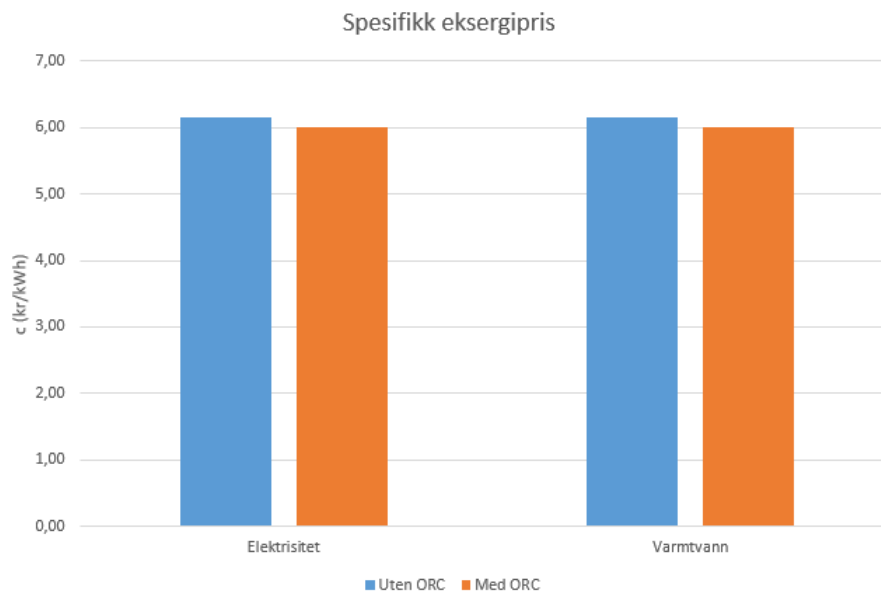
|          | Drivstoff<br>(kr/kWh) | Produkt<br>(kr/kWh) | Drift- og vedlikehold<br>(kr/h) | Kapitalkostnader<br>(kr/h) |
|----------|-----------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Uten ORC | 0,660                 | 6,160               | 29,249                          | 59,183                     |
| Med ORC  | 0,660                 | 6,011               | 29,249                          | 59,461                     |

Systemet leverer uten ORC tilkoblet 13,27 kW eksergi i form av elektrisk effekt og 5,66 kW i form av varmtvann. Med ORC tilkoblet leverer systemet 15,93 kW i form av elektrisk effekt og 3,52 kW i form av varmtvann.

#### 4.4 Eksergoøkonomisk analyse

Resultatene fra den eksergoøkonomiske analysen er presentert i tabell 4.5 og figur 4.9. Tabell 4.5 viser spesifikke kostnader for drivstoff, produkt, drift- og vedlikehold og kapitalkostnader. Investeringskostnadene er høyere for systemet med ORC-krets enn systemet uten ORC-krets, og følgelig er kapitalkostnadene for systemet med ORC høyere enn for systemet uten ORC.

Med en ORC-krets tilkoblet CHP-enhet vil systemet levere mer eksergi enn uten. Resultatet av dette er at den elektrisk effekt og varme produseres med en litt lavere eksergispesifikk kostnad, som illustrert i figur 4.9.



Figur 4.9: Spesifikk eksergipris for elektrisitet og varmtvann for enheten med og uten en ORC-krets.

# Kapittel 5

## Diskusjon

Av analysen kommer det frem at dersom en enkel ORC-krets med Toluene som arbeidsfluid kobles til eksosen til CHP-enheten i stedet for eksosgassvarmeveksleren, er det mulig å produsere eksergi med en lavere spesifikk kostnad enn den CHP-enheten produserer med idag. Dette indikerer at det er mulig å modifisere en CHP-enhet for å tilkomme etterspørsel for mer elektrisk effekt til bl.a. bolig og kontorbygg. I følge analysen har en slik modifisering ikke bare termodynamisk potensiale, men den er også økonomisk gunstig. En modifisering vil også kunne vise seg å være enda mer gunstig, dersom en mer avansert ORC-krets anvendes. Den enkle kretsen med Toluene som arbeidsfluid har f.eks. et rekupereringspotensiale på 1,72 kW, noe som hvis utnyttet kunne gitt enda høyere ytelse og virkningsgrader.

På den annen side kan en mer detaljert analyse vise at den økonomiske gunstigheten ikke er tilstede allikevel.

Analysen som den er utført i denne oppgaven baserer seg på målinger utført i 2007. Det var ambisjon om å gjøre egne målinger og bruke disse som basis for analysen, men det har ikke lyktes å ferdigstille CHP-anlegget og tilhørende instrumentering og loggeutstyr til et tilfredstillende nivå. Derfor har egne målinger kun blitt brukt der målingene fra 2007 var mangelfulle, som f.eks. eksogassstemperatur før katalysator og utslipp av  $H_2$  og  $SO_2$ . Usikkerhet rundt utførelsen av målingene fra 2007 gjør at det også vil bli usikkerhet rundt beregningene i denne oppgaven. Usikkerheten ligger i hovedsak ved kalibrering av utstyr. En av grunnen til dette er måleresultater for utslipp av CO og HC. I følge målingene fra 2007 er utslipp av HC på det meste 1344 ppm (ved 7,5 kW) og utslipp av CO på det meste 493 ppm (ved 4,5 kW). Disse verdiene virker høye, spe-

sielt ettersom det hevdes at målingene av eksosgassammensetning er utført etter katalysator. Det har ikke lyktes å måle HC ved egen målinger, men måling av CO-utslipp viser en at høyeste verdi ligger på 76 ppm (ved 13,5 kW), altså bare ca 1/6 av den høyeste verdien som ble målt i 2007. Selv med disse uoverensstemmelsene ble det valgt å gå videre med analysen. De høye verdiene for HC og CO i eksosgassen ble forsøkt gjort opp for ved å anta noe dårligere katalysatorvirkningsgrad. Katalysatorvirkningsgraden ble for HC antatt å 70 % og CO å være 60 %, dvs. i det øvre sjiktet av virkningsgradspekteret presentert av EPA [59] for to-veis katalysatorer brukt i dieselmotorer. I følge Stone [26] skulle virkningsgraden ligge på 95-99 % for en toveis katalysator ved den målte eksogasstemperaturen. En katalysator som operer med en ren eksogass, som eksogass fra gassmotorer er, ved høy temperatur vil kunne anslås å ha høyere virkningsgrader enn de brukt i denne oppgaven, noe egne målinger av CO til en viss grad bekrefter.

Foruten uoverensstemmelsen ved måling av eksogassutslipp er det god overensstemmelse ved målinger av elektrisk effekt, kjølevannstemperaturer, kjølevannsstrøm og gassstrøm (se vedlegg H og G).

Når det gjelder energi- og eksergianalyse av CHP-enheten er det forholdsvis lite usikkerhet rundt beregning av produsert energi og eksergi. Analyse av CHP-enhetens indre komponenter derimot er sterkt avhengig av nøyaktigheten til stempelmotormodellen som er utviklet til denne oppgaven. Modellen er en iterativ modell, skrevet i Visual Basic for Applications (VBA), basert på empiriske relasjoner. Modeller av denne typen baseres som oftest på kjente variabler, som bl.a.: ventiltider, ventilløft, tenningsstidspunkt, forbrenningsperiode, trykkforløp i sylindere og strømningsstap. Disse variablene måles og modellen brukes så til å simulere ikke-målte verdier. I stempelmotormodellen i denne oppgaven er ingen av de ovennevnte variablene kjent. Modellen er derfor basert på antagelser, samt noen målte variabler som brennstofforbruk og produsert effekt. For at modellen skal gi et noenlunde troverdig resultat er input-variablene justert slik at den gir indikert effekt noe over bremsespesifikk effekt, beregnet på bakgrunn av målt elektrisk effekt, og en eksogasstemperatur over målt eksogasstemperatur før katalysator. Resultatene som er oppnådd fra modellen (oppgitt i tabell 4.2) viser en mekanisk virkningsgrad for stempelmotoren ved full effekt på 96 %. Denne er noe høy, men med tanke på at strømningsstap ikke er inkorporert i modellen er det mulig at virkningsgraden vil nå en mer troverdig verdi ved videre utvikling av modellen.

Selv om stempelmotoren er noe uferdig har den ikke mer innvirkning på resultatet i oppgaven enn oversikt over komponentenes bidrag til kjølevannsvarmen og oversikt over ødelagt eksergi innad i enheten. Disse er sekundære resultater som er inkludert for å gi indikasjon på komponentenes bidrag til produksjonen.

Mellom stempelmotoren og varmeveksler er det et målepunkt for eksosgastemperaturen. Dette betyr at beregninger av tilgjengelig energi for ORC-kretsen ikke er avhengig stempelmodellen. Det anses på den andre siden som viktig for videre analyse av CHP-enheten at det utvikles en fullverdig modell av stempelmotoren.

I ORC-konfigurasjonen som ble valgt i denne oppgaven, med fordamper tilkoblet eksogassen i stedet for eksogassvarmeveksler, mister kjølevannkretsen noe av varmebidraget mellom før det går inn i manifold og senere motorblokk. Dette gjør at kjølevanntemperaturen vil være lavere ved inngang til motorblokk. Fra undersøkelser av CHP-enhetens oppsett kan de se ut som om enheten styres ut i fra termostater i bl.a. eksogassvarmeveksler og i kjølevannstrøm ut i fra motorblokk. En endring i kjølevanntemperaturen kan påvirke styringen av enheten. Hvilken effekt dette vil ha vites ikke, og bør undersøkes.

Det er i design av ORC-kretsen i denne oppgaven ikke tatt hensyn til designprosessen presentert i seksjon 2.3.5, med samtidig valg av ekspander og arbeidsfluid. Det er på grunn av tidsmangel kun utført en enkel termodynamisk analyse, og valg av konfigurasjon og arbeidsfluid er basert på denne. Dersom en ORC-krets tilknyttet CHP-enheten skal bygges, bør det utføres en mer avansert analyse av ORC-kretsen med fokus på appliserbarheten for teknologi for fordampning og ekspansjon ved de gitte temperaturene og energimengdene.

Kostnaden til et enkelt ORC-anlegg er basert på priser innhentet fra internettsider for netthandel. Prisene er hentet inn for komponenter som skal kunne yte det som i følge den termodynamiske analysen kreves av dem. Dersom byggingen av anlegget skal utføres, bør det i neste fase av planleggingen utføres en mer detaljert estimering av investeringskostnader. En høyere investeringskostnad vil kunne påvirke resultatet i denne oppgaven som sier at modifisering av en CHP-enhet med tilkobling av en ORC-krets gir en lavere eksergispesifikk produksjonskostnad. Resultatet er på den annen side ikke på langt nært så følsomt for økning i investeringskostnader som økning i produsert eksergi. Med tilkoblet ORC-krets leverer systemet samlet bare 0,52 kW mer eksergi enn uten ORC, men for at systemet skal levere eksergi med samme eksergispesifikke

produksjonskostnaden må investeringskostnaden på ORC-anlegget økes med rett i underkant av kr 215 000 dersom det antas at hele anlegget har en levetid på 20 år og at det ikke forekommer ekstra drift- og vedlikeholdskostnader ved tilkobling av et ORC-anlegg.



# Kapittel 6

## Oppsummering

### 6.1 Konklusjon

I følge energianalysen produserer CHP-enheten 13,27 kW elektrisk effekt og 25,58 kW varme ved henholdsvis 29 % og 55 % virkningsgrad. Den totale virkningsgraden ved full effekt er 84 %. Ved lavere effekter er varmekvinningsgraden høyere og den elektriske virkningsgraden lavere. Varmen samles opp i systemet i eksosgassvarmeveksler, stempelmotor, oljefilter, generator og manifold. Av disse komponentene leverer eksosgassvarmeveksleren mest varme til kjølevannet.

I følge eksergianalysen er andelen eksergiødeleggelse ved full effekt 55 %. Ved lavere effekter er eksergiødeleggelsen noe større. Størst er den ved 4,5 kW, hvor den er på 62 %. Komponenten i systemet med størst eksergiødeleggelse er stempelmotoren.

I følge den eksergoøkonomiske analysen produserer det samlede systemet elektrisk effekt og varme med en lavere eksergispesifikk kostnad med ORC-krets tilkoblet enn uten, 6,01 kr/kWh med mot 6,16 kr/kWh uten. Det konkluderes med at det er mulig å modifisere en CHP-enhet med en ORC-krets slik at systemet produserer elektrisk effekt og varme med en lavere eksergispesifikk kostnad dersom det samlede systemet har en levetid på 20 år og den tilkoblede ORC-kretsen ikke bidrar til ytterligere drift- og vedlikeholdskostnader.

## 6.2 Anbefalinger for fremtidig arbeid

På kort sikt anbefales det først og fremst at det jobbes videre med å oppnå et tilfredsstillende måleoppsett, med instrumentering for måling av: temperatur i motorrom, gassforbruk, kjølevannstrøm, kjølevanntemperaturer, eksostemperatur ut fra enheten, eksostemperatur før katalysator, elektrisk effekt og eksosgassammensetning. Ved måling av eksosgassammensetning anbefales det å måle: CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC, H<sub>2</sub> og SO<sub>2</sub>, da det er påvist at alle disse gassartene er tilstede i eksosgassen.

På kort sikt anbefales det også å forsøke å detaljprosjekttere en ORC-krets basert på metoden foreslått Quoilin et al. [35], med samtidig valg av ekspander og arbeidsfluid. På den måten er det kanskje mulig å legge grunnlaget for bygging av en ORC-krets.

På lang sikt anbefales det at gjøres målinger på stempelmotoren slik at det er mulig å danne en mer avansert stempelmotormodell. Disse målingene kan enten gjøres på motoren som står i CHP-enheten eller det kan være en idé å innhente en identisk motor som kan brukes til målinger. Toyota 3Y-motoren er en relativt vanlig bilmotor, og skal være lett å få tak i. Variabler som måles er bl.a.: trykkforløp i sylindere, strømningsstap forbi ventiler, luftbevegelse i sylindere, friksjonsstap. Verdier som tenningsstidspunkt kan tenkes å fås ut fra CHP-enhetens Gill Instruments GS6 tenningsmodul. Ventiltider og ventilløft kan mulig finnes ved å studere kamaksel.

På lang sikt anbefales det også å forsøke å bygge en ORC-krets som kan tilkobles CHP-enheten, enten til eksos, som foreslått i denne oppgaven, eller til kjølevann, som kanskje er den enkleste løsningen.

# Bibliografi

- [1] IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion - Highlights. Technical report, International Energy Agency, 2014. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2014.html>.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], 2013.
- [3] EU. Directive 2004/8/ec of the european parliament and of the council of 11 february 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending directive 92/42/ee. European Union, 2004.
- [4] Marius Monsen Ragnøy. Teknologikartlegging - kraftgjenvinning fra lavtemperatur spillvarme. Technical report, Rambøll, 2014.
- [5] David Koeberlein. Cummins SuperTruck Program. Online, 06 2015. [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace057\\_koeberlein\\_2013\\_o.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace057_koeberlein_2013_o.pdf).
- [6] Motorship.com. Waste heat recovery system operates at lower temperature. *Motorship*, 2014.
- [7] Adrian Bejan, George Tsatsaronis, and Michael Moran. *Thermal Design & Optimazation*. John Wiley & Sons, inc, 1996.
- [8] EU. Regulation (ec) no 715/2007 of the european parliament and of the council of 20 june 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and

- commercial vehicles (euro 5 and euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. Technical report, EU, 2007.
- [9] EU. Directive 1999/94/ec of the european parliament and of the council of 13 december 1999 relating to the availability of consumer information on fuel economy and co2 emissions in respect of the marketing of new passenger cars. Technical report, EU, 2000.
- [10] Daniel Jenni. Agaswärme und Turbine - die neue Dampfmaschine. *Automobile revue*, 2014.
- [11] *Technisches Datenblatt - XRG113G-TO Erdgas Energiesystem*. EC Power.
- [12] Ann Christin Bøeng. På verdenstoppen i bruk av strøm. *Samfunnsspeilet*, 4, 2014.
- [13] Ann Christin Bøeng. Energibruk i husholdningene, 2012. Technical report, Statistisk sentralbyrå, 2014.
- [14] Hanne Marit Dalen and Bodil Merethe Larsen. Formålsfordeling av husholdningens elektrisitetsforbruk i 2006. Technical report, Statistisk sentralbyrå, 2006.
- [15] Anne Sofie Abrahamsen, Marius Bergh, and Nadiya Fedoryshyn. Energibruk i bygg for tjenesteytende virksomhet 2011. Technical report, Statistisk sentralbyrå, 2013.
- [16] Solveig Irgens. Tek15: Slik er forslaget. Online, 06 2015. <http://www.lavenergiprogrammet.no/nyheter-fra-lavenergiprogrammet/tek15-slik-er-forslaget-article2447-122.html>.
- [17] Øystein Lindberg. Energiproduksjon ved bruk av små kogenereringsanlegg. fokus på instrumentering og miljø. Master's thesis, Universitetet i Stavanger, 2007.
- [18] Kyung Tae Yun, Heejin Cho, Rogelio Luck, and Pedro J. Mago. Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery. *Applied Energy*, 2013.
- [19] F Caresana, Brandoni C, P Felichotti, and CM Bartolini. Energy and economic analysis of an ice-based variable speed-operated micro-cogenerator. *Applied Energy*, 2011.
- [20] H Cho, R Luck, SD Eksioğlu, and Chamra LM. Cost-optimized real-time operation of chp systems. *Energy and Buildings*, 2009.

- [21] PJ Mago, LM Chamra, and J Ramsey. Micro combined cooling, heating, and power systems hybrid electric-thermal load following operation. *Applied Thermal Engineering*, 2010.
- [22] H Ren and W Gao. Economic and environmental evaluation of micro chp systems with different operating modes for residential buildings in japan. *Energy and Buildings*, 2010.
- [23] N Fumo, PJ Mago, and LM Chamra. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems. *Applied Energy*, 2009.
- [24] HI Onovwiona, VI Ugursal, and AS Fung. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. *Applied Thermal Engineering*, 2006.
- [25] J Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Tata Mcgraw Hill Education, 2011.
- [26] Richard Stone. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Palgrave Macmillan, 4 edition, 2012.
- [27] Jeremy Cuddihy. A user-friendly, two-zone heat release model for predicting spark-ignition engine performance and emissions. Master's thesis, University of Idaho, 2014.
- [28] EH Wang, HG Zhang, BY Fan, MG Ouyang, Y Zhao, and QH Mu. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 2011.
- [29] TC Hung, TY Shai, and SK Wang. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 1997.
- [30] V Maizza and A Maizza. Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste heat energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*, 2001.
- [31] BT Liu, KH Chien, and CC Wang. Effekt of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery systems. *Energy*, 2004.
- [32] D Wei, Z Lu, and J Gu. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy conversion and management*, 2007.
- [33] D Wei, X Lu, Z Lu, and J Gu. Dynamic modeling and simulation of an organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2008.

- [34] Jian Song, Yin Song, and Chun wei Gu. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle(ORC) waste heat recovery system for marine diesel. *Energy*, 2015.
- [35] Sylvain Quoilin, Sébastien Decalye, Arnaud Legros, Ludovic Guillaume, and Vincent Lemort. Working fluid selection and operating maps for Organic Rankine Cycle expansion machines. In *International Compressor Engineering Conferance at Purdue, July 16-19, 2012*, .
- [36] Andrea Lazzaretto and George Tsatsaronis. Speco: A systematic and general methodology for calculation efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 2006.
- [37] G Tsatsaronis and M Winhold. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion plants. *Energy Int.*, 1985.
- [38] RB Evans and M Tribus. A contribution to the theory of thermoeconomics, report no. 62–63. Technical report, UCLA Engineering Department, 1962.
- [39] B. Erlach, G. Tsatsaronis, and F. Czesla. A new approach for assigning costs and fuels to cogeneration products. *Appl Thermody*, 2001.
- [40] R.B. Evans El Sayed. Thermoeconomics and the design of heat systems. *Trans ASME J Eng Power*, 1970.
- [41] C.A. Frangopoulos. Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy*, 1987.
- [42] C.A. Frangopoulos. Optimal synthesis and operation of thermal systems by the thermo-economic functional approach. *J Eng Gas Turbines Power*, 1992.
- [43] M. Khaljani, R. Khoshbakhti Saray ., and K. Bahlouli. Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 2015.
- [44] Ugyr Yildirim and Afsin Gungor. An application of exergoeconomic analysis for a CHP system. *Electrical power and energy systems*, 2012.

- [45] WADE. Guide to decentralized energy technologies. Technical report, World Alliance for Decentralized Energy, 2003.
- [46] Martin Pehnt, Martin Cames, Corinna Fischer, Barbara Praetorius, Lambert Schneider, Katja Schumacher, and Jan-Peter Voß. *Micro Cogeneration - Towards Decentralized Energy Systems*. Springer, 2006.
- [47] H Hoff and M Köper. Weiterentwicklung von Gasmotoren für Nano-, Micro- und Mini-BHKW. In *Dessauer Gasmotoren-Konferenz*, 2015.
- [48] Toyota-Industries. Y-series. Online, 01.2015. <http://www.toyota-industries.com/component/products/y.html>.
- [49] unknown. Toyota Y Engine. Online, 03.2015. [http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Y\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Y_engine).
- [50] EC Power. *XRGI 13G Combined Heat and Power System - Installation Guide*, 2006.
- [51] R. Saidur, M.Rezaei, W.K.Muzammil, M.H.Hassan, S.Paria, and M.Hasanuzzaman. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16:5649–5659.
- [52] DuPont. Refrigerants. Online, 5 2015. [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_CA/products/understanding.htm](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_CA/products/understanding.htm).
- [53] Sylvain Quoilin, Sébastien Declaye, Bertrand F. Tchanche, and Vincent Lemort. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*, 31:2885–2893, .
- [54] Vincent Lemort, Ludovic Guillaume, Arnaud Legros, Sébastien Declaye, and Sylvain Quoilin. A comparison of piston, screw and scroll expanders for small scale rankine cycle systems. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies*, 2013.
- [55] Knut Helland. Gassteknologi: Produksjon og behandling av naturgass. Høgskolen i Bergen, Avd. for ing.utdanning, Desember 2003.

- [56] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, 7 edition, 2011.
- [57] R.B. Krieger and G.L. Borman. The computation of apparent heat release for internal combustion engines. *ASME*, 1967.
- [58] Ricardo. Performance analysis. Forelesningsnotater høst 2014.
- [59] EPA. Diesel oxidation catalyst general information. Online, 6 2015. <http://epa.gov/cleandiesel/documents/420f10031.pdf>.
- [60] Silvio de Oliveira Junior. *Exergy: Production, Cost and Renewability (Green Energy and Technology)*. Springer, 2013.
- [61] DR Morris and J Szargut. Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth. *Energy*, 11:733–755.
- [62] J Szargut. International progress in second law analysis. *Energy*, 5:709–718.
- [63] Ivar S Ertesvaag. Sensitivity of chemical exergy for atmospheric gases and gaseous fuels to variations in ambient conditions. *Exergy Conversion and Management*, 48:1983–1995.
- [64] altinn. Avskrivninger. Online, 6 2015. <https://www.altinn.no/no/Starte-og-drive-bedrift/Drive/Regnskap-og-revisjon/Hva-er-bokforingsplikt/Aktivring-eller-kostnadsforing/Avskrivninger/>.
- [65] Geofysisk Institutt. Søkeresultat. Online, 01.2015. [http://veret.gfi.uib.no/index.php?action=query\\_data](http://veret.gfi.uib.no/index.php?action=query_data).
- [66] Lars Magne Nerheim. Sammenligning av avgassutslippene fra en tradisjonell- og en hybrid drevet biogass-buss under drift på en gitt linje i bergen, 2015.
- [67] Per Madsen. Sv: Ec power xrgi 13g - masteroppgave, 30.04.2015. PM@ecpower.dk.
- [68] Gasnor. Bolig - priser/betingelser. Online, 01.2015. <http://gasnor.no/bolig/priserbetingelser/>.
- [69] Frank Kreith. *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. Springer, 2000.



# Figurer

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Cummins system for spillvarmeutnyttelse på truckmotor [5] . . . . .  | 5  |
| 1.2  | Formålsfordeling av husholdningens elektrisitetsforbruk i 1990, 2001 og 2006 (temperaturkorrigert) [14] . . . . .        | 6  |
| 2.1  | Oversikt over noen konverteringsteknologier for bruk i mikro-konverteringsenheter [46] . . . . .                         | 17 |
| 2.2  | Styringsstrategi for XRGI-enheten (Merk: Toyota 3Y-motoren er ikke en <i>cross-flow</i> -motor) . . . . .                | 21 |
| 2.3  | Oversikt over (a) CHP-enhetens layout (b) Komponentene i motorrommet og (c) tilkoblinger og servicepunkter [50]. . . . . | 22 |
| 2.4  | Temperatur- og ytelsesområde for noen tilgjengelige WHR-teknologier [4]. . . . .   | 24 |
| 2.5  | Termoelektrisk generator (TEG). . . . .  | 25 |
| 2.6  | Stirling-motor med alfa-konfigurasjon (a) og beta-konfigurasjon (b). . . . .   | 26 |
| 2.7  | PCM varmeputer [4] . . . . .   | 27 |
| 2.8  | Den enkle, ideelle Rankine-syklusen . . . . .  | 28 |
| 2.9  | Eksempel på denotering av kjølemiddel. . . . .   | 29 |
| 2.10 | Eksempler på forskjellige metningskurver [53]. . . . .   | 30 |
| 2.11 | Eksempler på forskjellige ORC-konfigurasjoner. . . . .   | 33 |
| 2.12 | Operasjons-kart for forskjellige ekspandere [35] [54]. . . . .   | 35 |
| 2.13 | Kontrollvolum med inn- og utgående masse- og energistrømmer. . . . .   | 36 |
| 2.14 | Utslipp fra en SI motor ved forskjellige luftoverskuddstall [26] . . . . .   | 41 |
| 2.15 | Kilder til utslipp i forbrenningsrommet til en SI motor[26] . . . . .  | 42 |
| 2.16 | Sylindergeometri og timingdiagram for kraftslaget. . . . .   | 48 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.17 | Katalytisk konverter med oksidasjon av HC og CO . . . . .   | 50  |
| 2.18 | Typisk konverteringsvirkningsgrad for en oksidasjonskatalysator [25] . . . . .  | 51  |
| 2.19 | Eksempel på Ts-diagrammet til en enkel ORC. . . . .   | 53  |
| 3.1  | Illustrasjon av containerens utside sett fra siden. . . . .   | 71  |
| 3.2  | Illustrasjon over CHP-anleggets utforming i container. Hovedkomponentene er:<br>1) CHP-enhet, 2) varmelager, 3) gassikrningsskap, 4) varmefordeler, 5) tempera-<br>turstyring og 6) styringsskap. . . . . | 73  |
| 3.3  | Plassering av instrumentering ved måling 10.07.2015. . . . .  | 74  |
| 3.4  | Blokkdiagram over CHP-enheten. . . . .  | 77  |
| 3.5  | Stempelmotormodellens trinnvise utførelse . . . . .   | 82  |
| 3.6  | Kode for beregning av sylindergeometri. . . . .   | 84  |
| 3.7  | Kode for beregning av Wiebe-funksjonen. . . . .   | 85  |
| 3.8  | Kode for beregning av varmeovergang mellom sylindergass og sylindervegg. . . . .  | 85  |
| 3.9  | Kode for beregning av varmeutvikling i sylinder. . . . .  | 86  |
| 3.10 | Kode for beregning av trykk- og temperaturøkning mellom IVC og EVO. . . . .   | 87  |
| 3.11 | Kode for beregning av sylindertemperatur, arbeid per sylinder per kraftsyklus og<br>omregning til effekt for varmeovergang og arbeid. . . . .   | 87  |
| 3.12 | Kode for beregning av middeltrykk og mekanisk virkningsgrad. . . . .  | 88  |
| 3.13 | Stempelmotor med varmeoppsamling i motorblokk, oljefilter og generator. . . . .   | 89  |
| 3.14 | Konfigurasjon: (a) enkel ORC tilkoblet kjølevann og (b) enkel ORC tilkoblet eksos. . . . .  | 90  |
| 4.1  | Grafisk fremstilling ytelsesparametre for CHP-enheten fra målinger gjort i 2007. . . . .  | 102 |
| 4.2  | Sankey-diagram for CHP-enheten ved full effekt (13,5 kW). . . . .   | 103 |
| 4.3  | Energifordelingen til CHP-enheten i prosent av energi inn ved: 4,5, 7,5, 10,5 og<br>13,5 kW. . . . .  | 103 |
| 4.4  | Komponentens varmeovergang til kjølevann ved full elektrisk effekt. . . . .   | 104 |
| 4.5  | Resultat fra analyse av to muligheter for tilkobling av ORC: på eksos (t.v.) og på<br>kjølevann (t.h.). . . . .   | 105 |
| 4.6  | Grassmann-diagram for CHP-enheten ved full effekt (13,5 kW). . . . .  | 106 |
| 4.7  | Oversikt over eksergiødeleggelse i CHP-enhetens viktigste komponenter. . . . .  | 106 |

4.8 Oversikt over eksergivirkningsgraden for CHP-enhetens viktigste komponenter. . . 107

4.9 Spesifikk eksergipris for elektrisitet og varmtvann for enheten med og uten en ORC-  
krets. . . . . 110

B.1 Spesifikasjoner fra [toyota-industries.com](http://toyota-industries.com) [48] . . . . . 137

# Tabeller

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | En oversikt over tilstander brukt til beregning. . . . .                           | 58  |
| 2.2  | Oversikt over komponentene i de totale investeringer (TCI)[7] . . . . .            | 64  |
| 3.1  | Utførelse av målinger 2015. . . . .  | 75  |
| 3.2  | Målte variabler brukt i energianalyse av CHP-enheten . . . . .                     | 76  |
| 3.3  | Naturgassens sammensetning ved måling 21. mars 2007. . . . .                       | 78  |
| 3.4  | Parametere brukt i simulering av stempelmotor og generator . . . . .               | 83  |
| 3.5  | Oversikt over last-spesifikke verdier brukt i stempelmotormodellen . . . . .       | 86  |
| 3.6  | Arbeidsfluider undersøkt i ORC-modellen . . . . .                                  | 91  |
| 3.7  | Parametre og antagelser for beregning av kapitalkostnader. . . . .                 | 95  |
| 3.8  | Årlig energiforbruk for et kontorbygg i bergensområdet (fra SSB) . . . . .         | 95  |
| 3.9  | Estimat av total investeringskostnad for CHP-enheten i norske kroner (NOK) . . . . | 96  |
| 3.10 | Estimat av total investeringskostnad for ORC-kretsen i norske kroner (NOK) . . . . | 97  |
| 4.1  | Måleresultatene fra måling med gassanalyser 10.07.2015. . . . .                    | 100 |
| 4.2  | Output fra den iterative stempelmotormodellen. . . . .                             | 101 |
| 4.3  | Oversikt over energi- og tilhørende eksergistrømmer i systemet. . . . .            | 107 |
| 4.4  | Oversikt over massestrømmene i systemet. . . . .                                   | 108 |
| 4.5  | Beregnete spesifikke kostnader for CHP-enheten med og uten ORC. . . . .            | 109 |
| C.1  | Oversikt over input til og output fra testanleggets logge-program. . . . .         | 139 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| D.1 | Molarmasse, kritiske verdier og ideel gass spesifikke varmekapasiteter som en funksjon av temperatur for reaktanter, koreaktanter og produkter av forbrenningsprosessen. . . . . | 141 |
| E.1 | Koeffisienter i Krieger og Bormans polynommetode . . . . .   | 144 |
| E.1 | Naturgassens sammensetning ved måling 21. mars 2007. . . . .   | 146 |
| E.2 | Naturgassens sammensetning ved måling 2015. . . . .  | 146 |

# Nomenklatur

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\bar{S}_p$     | Gjennomsnittlig stempelhastighet (m/s)                          |
| $\bar{T}_g$     | Gjennomsnittlig temperatur i sylindervolumet i kraftslaget [K]. |
| $\dot{C}_F$     | Kostndandsstrøm drivstoff (kr/s)                                |
| $\dot{C}_P$     | Kostndandsstrøm produkt (kr/s)                                  |
| $\dot{E}_e$     | Energi i eksosgassene (kW)                                      |
| $\dot{m}$       | Massestrøm (kg/s)   |
| $\dot{m}_a$     | Massestrøm luft (kg/s)  |
| $\dot{m}_e$     | Massestrøm eksosgass (kg/s)                                     |
| $\dot{m}_g$     | Drivstofforbruk   |
| $\dot{Q}$       | Varme effekt (kW)   |
| $\dot{Q}_e$     | Varme i følge med eksosgassen (kW)                              |
| $\dot{Q}_g$     | Energi tilført med drivstoffet                                  |
| $\dot{Q}_m$     | Varme fra sylinter til kjølevann (kW)                           |
| $\dot{Q}_v$     | Varme til kjølevann (kW)  |
| $\dot{Q}_{gen}$ | Varme fra generator til kjølevann (kW)                          |
| $\dot{Q}_{man}$ | Varme fra manifold til kjølevann (kW)                           |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $\dot{Q}_{of}$     | Varme fra oljefilter til kjølevann (kW)                               |
| $\dot{Q}_{tap}$    | Varmetap ved konveksjon og stråling (kW)                              |
| $\dot{Q}_{vv}$     | Varme fra eksosgassvarmeveksler til kjølevann (kW)                    |
| $\dot{V}_v$        | Volumstrøm kjølevann ( $m^3/s$ )                                      |
| $\dot{W}$          | Arbeid (kW)   |
| $\dot{W}_{el}$     | Elektrisk effekt (kW)   |
| $\dot{X}$          | Eksergi (kW)  |
| $\dot{Z}_{CI}$     | Kostnadsstrøm kapital (kr/s)  |
| $\dot{Z}_{OM}$     | Kostnadsstrøm drift og vedlikehold (kr/s)                             |
| $\eta_{carnot,th}$ | Carnot-virkningsgrad  |
| $\eta_{comb}$      | Forbrenningsvirkningsgrad   |
| $\eta_{el}$        | Elektrisk virkningsgrad   |
| $\eta_{II}$        | Andre lovs virkningsgrad  |
| $\eta_{iso}$       | Isentropisk virkningsgrad   |
| $\eta_{th}$        | Termisk virkningsgrad   |
| $\eta_{tot}$       | Total virkningsgrad   |
| $\eta_{varme}$     | Varmevirkingsgrad   |
| $\gamma$           | Forholdet mellom gassens spesifikke varmekapasiteter $c_p$ og $c_v$ . |
| $\lambda$          | Luftoverskuddstall  |
| $\mu$              | Viskositet ( $kg/(m \cdot s)$ )                                       |
| $\psi$             | Eksergi (kJ/kg)   |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\psi_{\text{fys}}$  | Fysisk eksergi (kJ/kg)                            |
| $\psi_{\text{kjem}}$ | Kjemisk eksergi (kJ/kg)                           |
| $\rho$               | Tetthet (kg/m <sup>3</sup> )                      |
| O <sub>2</sub> %     | Målt O <sub>2</sub> prosent i eksosgassen (%)     |
| $\Theta$             | Vilkårlig ekstensiv egenskap)                     |
| $\theta$             | Veivinkel [°]                                     |
| $\theta_0$           | Tenningstidspunkt [°VV etter BDC]                 |
| $\theta_d$           | Forbrenningsperiode [°VV]                         |
| $a$                  | Halve slaglengden til motoren [m].                |
| $A(\theta)$          | Sylinderens indre areal (m <sup>2</sup> )         |
| $a_{\text{wie}}$     | Koeffisient i Wiebe-funksjonen                    |
| $B$                  | Stempelmotorens boring [m]                        |
| $c_p$                | Spesifikk varmekapasitet (kJ/kgK)                 |
| $c_F$                | Eksergispesifikk kostnad drivstoff (kr/kJ)        |
| $c_P$                | Eksergispesifikk kostnad produkt (kr/kJ)          |
| $e^{\text{kjem}}$    | Kjemisk energi i prosent av forbrenningsvarmen(%) |
| $h$                  | Entalpi (kJ/kg)                                   |
| $H_{\text{kat}}$     | Varmeutvikling i katalysator (kW)                 |
| $I$                  | Irreversibilitet (kJ)                             |
| $i_{\text{eff}}$     | Effektiv rente                                    |
| $L$                  | Stempelmotorens veivstanglengde [m]               |



|                   |  |
|-------------------|--|
| $L_{\min}$        | Luftmengde nødvendig for støkiometrisk forbrenning (kmol luft/kmol brennstoff)             |
| $M$               | Molarmasse (kg/kmol)   |
| $m_f$             | massefraksjon av en gassart(kg/kg gassblanding)  |
| $O_{\min}$        | O <sub>2</sub> -mengde nødvendig for støkiometrisk forbrenning (kmol luft/kmol brennstoff) |
| $P_o$             | Atmosfæretrykk (kPa)   |
| $P_{\text{crit}}$ | Kritisk trykk (MPa)  |
| $P_r$             | Redusert trykk   |
| $R$               | Gasskonstanten (kJ/kgK)  |
| $r$               | Nominell eksaleringsrate   |
| $r$               | Stempelmotorens kompresjonsforhold.  |
| $S$               | Stempelmotorens slaglengde [m].  |
| $s$               | Entropi (kJ/kgK)   |
| $T$               | Temperatur (K)   |
| $T_0$             | Omgivelsestemperatur (K)   |
| $T_c$             | Temperatur i container (K)   |
| $T_H$             | Temperatur i "hett" varmereservoar   |
| $T_L$             | Temperatur i "kaldt" varmereservoar  |
| $T_w$             | Sylinderveggtemperatur (K)   |
| $T_{\text{cd}}$   | Kondensasjonstemperatur (K)  |
| $T_{\text{crit}}$ | Kritisk temperatur (K)   |
| $T_{\text{ev}}$   | Fordampningstemperatur (K)   |

|             |  |
|-------------|--|
| $T_r$       | Redusert temperatur  |
| $V(\theta)$ | Sylindervolum ( $m^3$ )  |
| $V_s$       | Stempelmotorens slagvolum [ $m^3$ ].                             |
| $V_{maks}$  | Forbrenningsrommets største volum (ved BDC) [ $m^3$ ].           |
| $V_{min}$   | Forbrenningsrommets klaringsvolum (ved TDC) [ $m^3$ ].           |
| $w_{exp}$   | Koeffisient i Wiebe-funksjonen                                   |
| $y$         | Volum-/molfraksjon av en gassart ( $m^3/m^3$ gassblanding)       |
| $y(\theta)$ | Stempeletsavstand til TDC (m)                                    |
| $Z$         | Kompressibilitetsfaktor  |
| BMEP        | Bremssespesifikt middeltrykk (bar)                               |
| CC          | <i>Carrying Charges</i>  |
| CELLF       | <i>Constant-Cost Levilization Factor</i>                         |
| CHP         | (Combined Heat and Power) - kombinert kraft- og varmeproduksjon. |
| DC          | Direkte kostnader  |
| FC          | ( <i>Fuel Cost</i> ) Drivstoffkostnader                          |
| FCI         | Fast-kapital investering   |
| FMEP        | Friksjonsspesifikt middeltrykk (bar)                             |
| IC          | Indirekte kostnader  |
| IMEP        | Indikert middeltrykk (bar)                                       |
| KPI         | Konsumerprisindeks   |
| LHV         | Lavere brennverdi (MJ/kg)  |

Nu Nusselt-tallet

O & M Drift og vedlikehold

ORC (Organic Rankine Cycle) - prinsipp for dampkraft med organiske fluider som arbeidsmedium.

Re Reynolds-tallet

RF Relativ fuktighet (%)

RPM Omdreininger per sekund ( $s^{-1}$ )

TCI Totale investeringskostnader

TEG (Thermoelectric Generator) - varmekraftmaskin som konverterer varme til elektrisitet ved Seebeck- effekten.

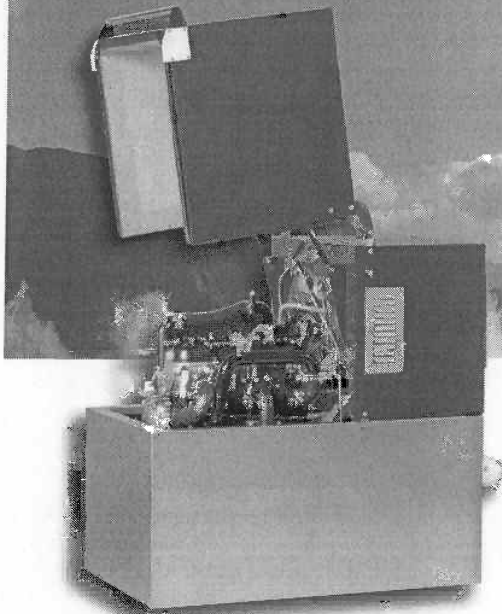
WHR (Waste Heat Recovery) - spillvarmeutnyttelse

# **Tillegg A**

## **CHP XRGI 13G - Spesifikasjoner**

# CHP XRGI 13G

## NGAS Energy Solution



### PERFORMANCE

|   |   |
|---|---|
| Mechanical performance at 2000 r/min      | 14.4 kW @ 1500  |
| Electrical efficiency - maximum           | 28% +/- 1%  |
| Electrical output                         | 4 - 13 kW   |
| Thermal output                            | 17 - 29 kW  |
| Electrical efficiency by varying load     | More than 26% by load > 10 kW elec                    |
| Total efficiency, heat and power combined | Up to 95% by load > 10 kW elec                        |
| Consumption at maximum load               | 2.2 - 4.2 m <sup>3</sup> /h (11 kW h/m <sup>3</sup> ) |



### SYSTEM COMPONENTS

#### Cabinet

|                                       |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| Double walls                          | 2 + 1.5 mm steel plate |
| External dimensions (W x H x D)       | 1110 x 1250 x 750 mm   |
| Insulation                            | 50 mm mineral wool     |
| Maintenance access - surrounding unit | Minimum 600 mm         |

#### Engine

|                     |              |
|---------------------|--------------|
| Type                | Toyota       |
| Fuel                | Natural Gas  |
| Cooling             | Water cooled |
| Number of cylinders | 4            |
| Swept volume        | 2000 cc      |

#### Generator

|                |              |
|----------------|--------------|
| Operating type | Asynchronous |
| Cos φ          | 0.8          |

#### Heat Storage

|   |                              |
|---|------------------------------|
| Thermal Store                               | Pre-insulated 475 ltr        |
| External dimensions (H x B x D)             | 700 x 700 x 1680mm (475 ltr) |
| Storage Capacity at 40°C return temperature | 17.3 kWh per 475 ltr vessel  |

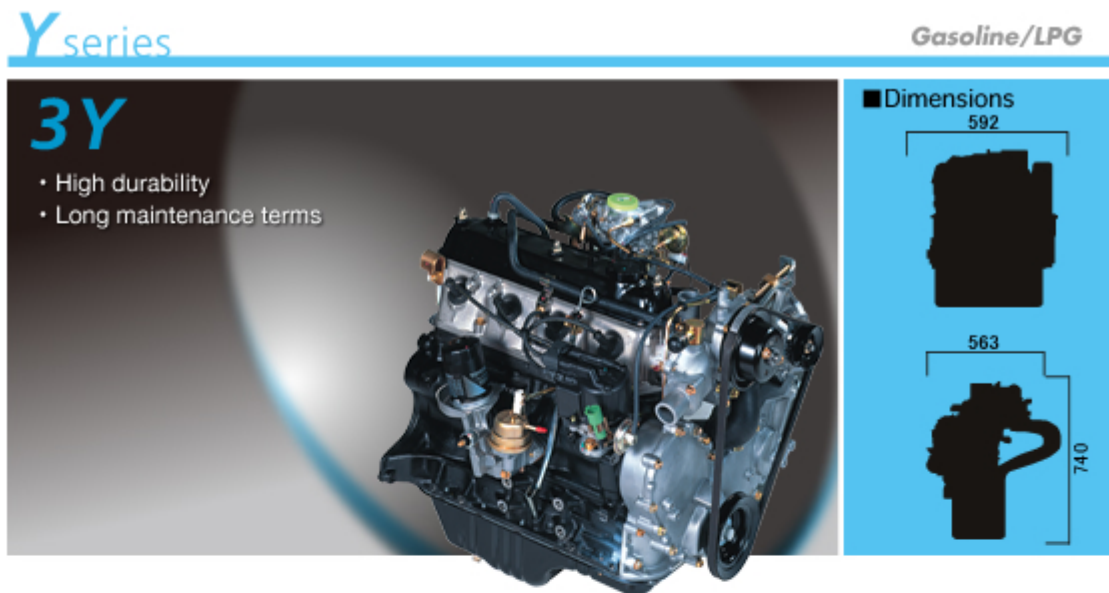
### ELECTRICAL SYSTEM

|                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| Nominal voltage                 | 3 phase, 400 v        |
| Maximum full load current, out. | 3 x 23A approximately |
| Nominal generator current       | 3 x 26A approximately |

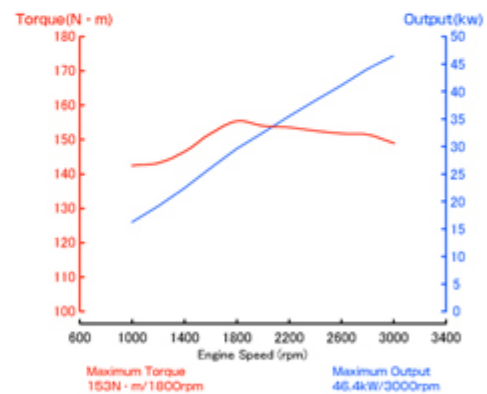
SHOB I104 Specifications are subject to change I/02/06

## **Tillegg B**

### **Toyota 3Y - Spesifikasjoner**



|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Engine type                          | 3Y   |
| Number of cylinders, mounting        | Inline 4, vertically mounted                                 |
| Bore x stroke                        | 86 x 86mm  |
| Total piston displacement            | 1998cc   |
| Valve mechanism                      | OHV chain-driven   |
| Combustion chamber type              | Wedge shape  |
| Cycle, Cooling system                | 4 cycle water cooled   |
| Performance                          |  |
| Maximum Output (LPG)                 | 46.4kW (@3000rpm)*   |
| Maximum Torque (LPG)                 | 153Nm (@1800rpm)   |
| Dimensions (length x width x height) | 592 x 563 x 740mm (without fan)                              |
| Dry weight                           | 117kg  |
| Fuel                                 | Gasoline/LPG   |
| Application                          | Lift truck, Gas heat pump(GHP), Combined Heat and Power(CHP) |



\*Within the range of current GHP.

\*Specification is subject to change without notice.

Figur B.1: Spesifikasjoner fra toyota-industries.com [48]

## **Tillegg C**

### **Input og output loggeprogram**



Tabell C.1: Oversikt over input til og output fra testanleggets logge-program.

| Mengde                                     | Symbol   | Enhet  |
|--|--|--|
| Input                                      |  |  |
| Tid (automatisk)                           | t  | tt:mm  |
| Ønsket elektrisk effekt                    | $\dot{W}_{el}$   | kW   |
| Ønsket varmeforbruk                        | $\dot{Q}_v$  | kW   |
| Energiinnhold i drivstoff                  | LHV  | MJ/kg eller MJ/Nm <sup>3</sup>               |
| Tetthet drivstoff                          | $\rho_g$   | kg/Ndm <sup>3</sup> eller kg/Nm <sup>3</sup> |
| Midlingstid                                | $\Delta t$   | s  |
| Output                                     |  |  |
| Drivstoffforbruk                           | $\dot{m}_g$  | g/s  |
| Drivstoffforbruk                           | $\dot{V}_g$  | Nm <sup>3</sup> /t                           |
| Spesifikt drivstoffforbruk                 | BSFC   | g/kWt  |
| Energi tilført med drivstoffet             | $\dot{Q}_g$  | kW   |
| Elektrisk virkningsgrad                    | $\eta_{el}$  | %  |
| Varmevirkingsgrad                          | $\eta_{varme}$   | %  |
| Total virkningsgrad                        | $\eta_{tot}$   | %  |
| Umidlet elektrisk effekt                   | $\dot{W}_{el,umidlet}$                                     | kW   |
| Midlet elektrisk effekt                    | $\dot{W}_{el}$   | kW   |
| Varme til kjølevann                        | $\dot{Q}_k$  | kW   |
| Avgassmåler                                | -  | av/på (0/1)                                  |
| Volumetrisk konsentrasjoner                | HC, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> | ppm og %                                     |
| Spesifikke massekonsentrasjoner            | HC, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> | g/kWt  |
| Spesifikke massekonsentrasjoner            | HC, NO <sub>x</sub> , CO                                   | mg/Nm <sup>3</sup>                           |
| Beregnet lambda                            | $\lambda$  | -  |
| Kjølevannsstrøm                            | $\dot{V}_v$  | l/t  |
| Kjølevannstemperatur inn                   | $T_6$  | °C   |
| Kjølevannstemperatur ut                    | $T_{14}$   | °C   |
| Varmelager (virtuelt)                      | $Q_{vl}$   | kJ   |
| Varm/kald temperaturføler<br>i varmebuffer | -  | 0/1  |
| Temperatur i motorrom                      | $T_c$  | °C   |
| Eksosgasstemperatur                        | $T_5$  | °C   |

# Tillegg D

## Termodynamisk data

**Viskositet og varmeledningsevne som funksjon av temperatur:**

$$\mu(T) = 7,457 \cdot 10^{-6} + 4,1547 \cdot 10^{-8} T - 7,4793 \cdot 10^{-12} T^2 \quad (\text{D.1a})$$

$$k(T) = 6,1944 \cdot 10^{-3} + 7,3814 \cdot 10^{-5} T - 1,2491 \cdot 10^{-8} T^2 \quad (\text{D.1b})$$

Tabell D.1: Molarmasse, kritiske verdier og ideel gass spesifikke varmekapasiteter som en funksjon av temperatur for reaktanter, koreaktanter og produkter av forbrenningsprosessen.

| Navn             | Komposisjon                    |                    |                   | Molarmasse          |                       |                      | Kritiske verdier |             |            | Spesifikk varmekapasitet |   |  | Temperatur |
|------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------|-------------|------------|--------------------------|---|--|------------|
|                  | Formel                         | $M_i$<br>[kg/kmol] | $T_{cr,i}$<br>[K] | $P_{cr,i}$<br>[MPa] | Brutto $i$<br>[MJ/kg] | Netto $i$<br>[MJ/kg] | $a_i$            | $b_i$       | $c_i$      | $d_i$                    | $\tilde{c}_p = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3$ |  |            |
| Metan            | CH <sub>4</sub>                | 16,04              | 196,7             | 4,641               | 55,515                | 50,028               | 19,89            | 5,024E-2    | 1,269E-5   | -11,01E-9                | 273-1800 K                                      |  |            |
| Etan             | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 30,07              | 305,4             | 4,883               | 51,902                | 47,511               | 6,900            | 17,27E-2    | -6,406E-5  | 7,285E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| Propan           | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 44,09              | 370               | 4,257               | 50,325                | 46,332               | -4,04            | 30,48E-2    | -15,72E-5  | 31,74E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| i-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58,12              | 408,2             | 3,648               | 49,347                | 45,561               | -7,913           | 41,60E-2    | -23,01E-5  | 49,91E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| n-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58,12              | 525,2             | 3,797               | 49,505                | 45,719               | 3,96             | 37,15E-2    | -18,34E-5  | 35,00E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| i-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 72,15              | 461               | 3,33                | 48,91                 | 45,249               | 6,774            | 45,43E-2    | -22,46E-5  | 42,29E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| n-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 72,15              | 469,8             | 3,375               | 49,006                | 45,345               | 6,774            | 45,43E-2    | -22,46E-5  | 42,29E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| Tyngre           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 84                 | 503               | 2,976               | 48,678                | 45,103               | 6,938            | 55,22E-2    | -28,65E-5  | 57,69E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| Oksygen          | O <sub>2</sub>                 | 32                 | 154,3             | 5,033               | -                     | -                    | 25,48            | 1,520E-2    | -0,7155E-5 | 1,312E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| Nitrogen         | N <sub>2</sub>                 | 28,01              | 126               | 3,392               | -                     | -                    | 28,90            | -0,1571E-2  | 0,8081E-5  | -2,873E-9                | 273-1800 K                                      |  |            |
| Nitrogenmonoksid | NO                             | 30,1               | 180               | 6,480               | -                     | -                    | 29,34            | -0,09395E-2 | 0,9747E-5  | -4,187E-9                | 273-1800 K                                      |  |            |
| Karbondioksid    | CO <sub>2</sub>                | 44,01              | 304,3             | 7,698               | -                     | -                    | 22,26            | 5,981E-2    | -3,501E-5  | 7,469E-9                 | 273-1800 K                                      |  |            |
| Karbonmonoksid   | CO                             | 28,01              | 133               | 3,500               | -                     | 10,100               | 28,16            | 0,1675E-2   | 0,5372E-5  | -2,222E-9                | 273-1800 K                                      |  |            |
| Vann damp        | H <sub>2</sub> O               | 18,02              | 647               | 22,100              | -                     | -                    | 32,24            | 0,1923E-2   | 1,055E-5   | -3,595E-9                | 273-1800 K                                      |  |            |

# Tillegg E

## Krieger og Bormans Polynommetode

**Konstanter som funksjon av temperatur:**

$$A(T) = a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5$$

$$B(T) = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4$$

**Konstanter som funksjon av Lambda:**

$$D(\lambda) = d_0 + d_1 \lambda^{-1} + d_3 \lambda^{-3} \tag{E.2}$$

**Konstant som funksjon av temperatur og Lambda:**

$$E(T, \lambda) = (e_0 + e_1 \lambda^{-1} + e_3 \lambda^{-3}) / T \tag{E.3}$$

**Konstanter som funksjon av temperatur, trykk og Lambda:**

$$F(T, P, \lambda) = (f_0 + f_1 \lambda^{-1} + f_3 \lambda^{-3} + ((f_4 + f_5 \lambda^{-1}) / T)) \text{Log}(f_6 P) \tag{E.4}$$

## Korreksjonsfaktorer for indre energi og gasskonstanten:

$$u_{\text{corr}}(T, P, \lambda) = C_u \exp(D(\lambda) + E(T, \lambda) + F(T, P, \lambda))$$

$$R_{\text{corr}}(T, P, \lambda) = C_r \exp\left(r_0 \ln(\lambda) + \frac{r_1 + r_2/T + r_3 \ln(f_6 P)}{\lambda}\right)$$

**Indre energi og gasskonstanten som funksjon av temperatur, trykk og lambda:**

$$u(T, P, \lambda) = A(T) - B(T)/\lambda + u_{\text{corr}}(T, P, \lambda)$$

$$R(T, P, \lambda) = 0,287 + 0,02/\lambda + R_{\text{corr}}(T, P, \lambda)$$

**Spesifikk varmekapasitet og gamma som funksjon av temperatur, trykk og Lambda:**

$$c_v(T, P, \lambda) = \frac{\partial u(T, P, \lambda)}{\partial T}$$

$$\gamma(T, P, \lambda) = 1 + \frac{R(T, P, \lambda)}{c_v(T, P, \lambda)}$$

Tabell E.1: Koeffisienter i Krieger og Bormans polynommetode

|                                  |                                   |                               |                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| $a_1$<br>0,692                   | $a_2$<br>$39,17 \cdot 10^{-6}$    | $a_3$<br>$52,9 \cdot 10^{-9}$ | $a_4$<br>$-228,62 \cdot 10^{-13}$ |
| $a_5$<br>$227,58 \cdot 10^{-17}$ | $b_0$<br>3049,33                  | $b_1$<br>$-5,7 \cdot 10^{-3}$ | $b_2$<br>$-9,5 \cdot 10^{-5}$     |
| $b_3$<br>$21,53 \cdot 10^{-9}$   | $b_4$<br>$-200,26 \cdot 10^{-14}$ | $C_u$<br>2,32584              | $C_r$<br>$4,186 \cdot 10^{-3}$    |
| $d_0$<br>10,41066                | $d_1$<br>7,85125                  | $d_3$<br>-3,71257             | $e_0$<br>$-15,001 \cdot 10^3$     |
| $e_1$<br>$-15,838 \cdot 10^3$    | $e_3$<br>$9,613 \cdot 10^3$       | $f_0$<br>-0,10329             | $f_1$<br>-0,38656                 |
| $f_3$<br>0,154226                | $f_4$<br>-14,763                  | $f_5$<br>118,27               | $f_6$<br>14,503                   |
| $r_0$<br>-0,2977                 | $r_1$<br>11,98                    | $r_2$<br>-25442               | $r_3$<br>-0,4354                  |

# **Tillegg F**

## **Gassammensetning**

Tabell F.1: Naturgassens sammensetning ved måling 21. mars 2007.

| Komposisjon [17] |                                |        | Molarmasse [55]    | Kritiske verider [55] |                     | Brennverdier [66]      |                       |
|------------------|--------------------------------|--------|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Navn             | Formel                         | vol%   | $M_i$<br>[kg/kmol] | $T_{cr,i}$<br>[K]     | $P_{cr,i}$<br>[MPa] | Brutto $_i$<br>[MJ/kg] | Netto $_i$<br>[MJ/kg] |
| Karbondioksid    | CO <sub>2</sub>                | 0,525  | 44,01              | 304,3                 | 7,398               | -                      | -                     |
| Nitrogen         | N <sub>2</sub>                 | 0,000  | 28,02              | 126                   | 3,392               | -                      | -                     |
| Metan            | CH <sub>4</sub>                | 93,480 | 16,04              | 196,7                 | 4,641               | 55,515                 | 50,028                |
| Etan             | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 4,433  | 30,07              | 305,4                 | 4,883               | 51,902                 | 47,511                |
| Propan           | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0,802  | 44,09              | 370                   | 4,257               | 50,325                 | 46,332                |
| i-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,512  | 58,12              | 408,2                 | 3,648               | 49,347                 | 45,561                |
| n-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,099  | 58,12              | 525,2                 | 3,797               | 49,505                 | 45,719                |
| i-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,071  | 72,15              | 461                   | 3,33                | 48,91                  | 45,249                |
| n-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,019  | 72,15              | 469,8                 | 3,375               | 49,006                 | 45,345                |
| Tyngre           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 0,059  | 84                 | 503                   | 2,976               | 48,678                 | 45,103                |

Tabell E.2: Naturgassens sammensetning ved måling 2015.

| Komposisjon [66] |                                |        | Molarmasse [55]    | Kritiske verider [55] |                     | Brennverdier [66]      |                       |
|------------------|--------------------------------|--------|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Navn             | Formel                         | vol%   | $M_i$<br>[kg/kmol] | $T_{cr,i}$<br>[K]     | $P_{cr,i}$<br>[MPa] | Brutto $_i$<br>[MJ/kg] | Netto $_i$<br>[MJ/kg] |
| Karbondioksid    | CO <sub>2</sub>                | 0,000  | 44,01              | 304,3                 | 7,398               | -                      | -                     |
| Nitrogen         | N <sub>2</sub>                 | 0,640  | 28,02              | 126                   | 3,392               | -                      | -                     |
| Metan            | CH <sub>4</sub>                | 95,022 | 16,04              | 196,7                 | 4,641               | 55,515                 | 50,028                |
| Etan             | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 3,441  | 30,07              | 305,4                 | 4,883               | 51,902                 | 47,511                |
| Propan           | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0,504  | 44,09              | 370                   | 4,257               | 50,325                 | 46,332                |
| i-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,247  | 58,12              | 408,2                 | 3,648               | 49,347                 | 45,561                |
| n-Butan          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,065  | 58,12              | 525,2                 | 3,797               | 49,505                 | 45,719                |
| i-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,081  | 72,15              | 461                   | 3,33                | 48,91                  | 45,249                |
| n-Pentan         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,000  | 72,15              | 469,8                 | 3,375               | 49,006                 | 45,345                |
| Tyngre           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 0,000  | 84                 | 503                   | 2,976               | 48,678                 | 45,103                |



# **Tillegg G**

## **Måleresultater 10.07.2015**

Testresultater 2015

Date: 10.07.2015

| Test nr | Tid   | Ønsket effekt<br>kW | umidlet effekt<br>kW | midlet effekt<br>kW | Temp. kjølevann inn<br>C | Temp. kjølevann ut<br>C | Temp. eksos før kat<br>C | Temp. eksos ut<br>C | Temp. motorrom<br>C | Flow kjølevann<br>l/h | Gasstrøm<br>g/s | Gassanalysator | NOx<br>ppm | CO<br>ppm | CO2<br>% | O2<br>% | H2<br>ppm | SO2<br>ppm |
|---------|-------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|----------------|------------|-----------|----------|---------|-----------|------------|
| 1       | 11:25 | 13,5                | 13,17                | 13,23               | 74,7                     | 91,4                    | 471,9                    | 55,8                | 24,8                | 1195,4                | 0,863           | Tiesto         | 192        | 73        | 8,13     | 7,01    | 13        | -          |
| 2       | 11:37 | 4,5                 | 4,191                | 4,19                | 75                       | 85,9                    | 397,3                    | 56,9                | 24,1                | 1196,2                | 0,4045          | Tiesto         | 326        | 26        | 9,75     | 4,09    | 8         | -          |
| 3       | 12:32 | 13,5                | 13,05                | 13,11               | 74,2                     | 92,4                    | 470,2                    | -                   | 26                  | 1199,3                | 0,862           | Horiba         | 234,7      | 76        | 8,02     | 6,74    | -         | 6,3        |
| 4       | 12:38 | 10,5                | 10,11                | 10,05               | 74,4                     | 90,5                    | 459,2                    | -                   | 26,2                | 1195,1                | 0,706           | Horiba         | 119,3      | 69        | 7,93     | 6,92    | -         | 7,1        |
| 5       | 12:43 | 7,5                 | 7,06                 | 7,02                | 74,5                     | 88,9                    | 426,7                    | -                   | 26,2                | 1194,7                | 0,548           | Horiba         | 111,7      | 51        | 8,2      | 6,46    | -         | 6,9        |
| 6       | 12:51 | 4,5                 | 4,114                | 4,11                | 75,1                     | 86,5                    | 397                      | -                   | 26,2                | 1185                  | 0,399           | Horiba         | 324,4      | 31        | 9,6      | 3,98    | -         | 4,3        |
| 7       | 13:15 | 13,5                | 13,06                | 13,21               | 74,7                     | 93,2                    | 472,7                    | 67                  | 26,6                | 1199,4                | 0,857           | -              | -          | -         | -        | -       | -         | -          |
| 8       | 13:21 | 10,5                | 10,27                | 10,2                | 74,6                     | 91,5                    | 461,1                    | 68                  | 26                  | 1190,3                | 0,717           | -              | -          | -         | -        | -       | -         | -          |
| 9       | 13:31 | 7,5                 | 7,25                 | 7,19                | 75,3                     | 89,4                    | 430,4                    | 66,2                | 25,7                | 1185,5                | 0,56            | -              | -          | -         | -        | -       | -         | -          |
| 10      | 13:36 | 4,5                 | 4,197                | 4,19                | 74,5                     | 86,5                    | 397,8                    | 63,1                | 26,3                | 1186,8                | 0,4088          | -              | -          | -         | -        | -       | -         | -          |
| 11      | 13:41 | 13,5                | 13,17                | 13,23               | 74,5                     | 93,3                    | 471,1                    | 71,1                | 25,5                | 1181,4                | 0,857           | -              | -          | -         | -        | -       | -         | -          |

# **Tillegg H**

## **Måleresultater 21.03.2007**

StatOil / ECPower datalog-system for ECPower CHP-anlegg

Motornavn: Toyota gass (3Y anm. JK)

Dato [dd/mm/åå]: 21.03.2007

Opprinnelig filnavn: C:\Måledata Toyota\Øystein\13,5kW - Toyota Naturgass Studentoppgave

Kommentar til loggingen: Test for: Stud. oppgave

Gasstype: NG Febr. 07

Net CV[MJ/kg]: 35,73

| Avgas-temp. [j<br>hh:mm | 93,1<br>Ønsket effekt<br>(kW) | Varmeforbruk<br>(kW) | Drivstoff-<br>forbruk (g/s) | Drivstoff-<br>forbruk (nm3/h) | Spes. dr.stoff-<br>forbruk (g/kWh) | Tilført med<br>drivstoffet (kW) | El. virkn.<br>grad (%) | Varme virkn.<br>grad (%) | Varme virkn.<br>grad (%) | Umidlet prod.<br>el. effekt (kW) |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,868                       | 4,341                         | 236,4                              | 43,08                           | 30,69                  | 61,2                     | 61,2                     | 12,86                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,868                       | 4,341                         | 236,6                              | 43,08                           | 30,66                  | 61,2                     | 61,2                     | 13,28                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,865                       | 4,326                         | 235,6                              | 42,93                           | 30,79                  | 60,8                     | 60,8                     | 13,28                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,858                       | 4,292                         | 233,6                              | 42,6                            | 31,05                  | 61,6                     | 61,6                     | 13,65                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,86                        | 4,299                         | 233,6                              | 42,6                            | 31,05                  | 61,6                     | 61,6                     | 13,65                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,865                       | 4,326                         | 234,7                              | 42,94                           | 30,9                   | 61,4                     | 61,4                     | 13,23                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,87                        | 4,351                         | 236                                | 43,19                           | 30,74                  | 60,7                     | 60,7                     | 13,23                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,867                       | 4,337                         | 235,2                              | 43,05                           | 30,85                  | 61                       | 61                       | 12,73                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,861                       | 4,306                         | 235,2                              | 43,05                           | 30,85                  | 60,9                     | 60,9                     | 12,73                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,86                        | 4,300                         | 233,8                              | 42,68                           | 31,03                  | 61,4                     | 61,4                     | 13,3                             |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,865                       | 4,327                         | 234,9                              | 42,95                           | 30,88                  | 61,1                     | 61,1                     | 13,3                             |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,871                       | 4,355                         | 236,1                              | 43,22                           | 30,73                  | 60,6                     | 60,6                     | 13,39                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,868                       | 4,339                         | 235                                | 43,06                           | 30,87                  | 60,6                     | 60,6                     | 13,39                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,862                       | 4,309                         | 233,2                              | 42,77                           | 31,1                   | 60,9                     | 60,9                     | 13,25                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,86                        | 4,298                         | 232,7                              | 42,65                           | 31,18                  | 61,5                     | 61,5                     | 13,25                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,863                       | 4,313                         | 233,5                              | 42,81                           | 31,06                  | 61,3                     | 61,3                     | 13,16                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,87                        | 4,348                         | 235,5                              | 43,15                           | 30,8                   | 61,3                     | 61,3                     | 13,16                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,866                       | 4,331                         | 234,7                              | 42,99                           | 30,9                   | 60,8                     | 60,8                     | 13,37                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,86                        | 4,302                         | 234,7                              | 42,69                           | 30,9                   | 61,4                     | 61,4                     | 13,37                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,859                       | 4,296                         | 232,7                              | 42,64                           | 31,18                  | 61,4                     | 61,4                     | 13,35                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,863                       | 4,316                         | 233,8                              | 42,83                           | 31,03                  | 61,2                     | 61,2                     | 13,35                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,869                       | 4,344                         | 235,3                              | 43,11                           | 30,83                  | 60,4                     | 60,4                     | 13,51                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,868                       | 4,340                         | 235,3                              | 43,08                           | 30,83                  | 60,4                     | 60,4                     | 13,51                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,861                       | 4,306                         | 235,1                              | 42,73                           | 30,86                  | 60,4                     | 60,4                     | 13,38                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,859                       | 4,296                         | 233,2                              | 42,73                           | 31,11                  | 60,9                     | 60,9                     | 13,38                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,864                       | 4,322                         | 232,6                              | 42,63                           | 31,19                  | 61,1                     | 61,1                     | 12,95                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,87                        | 4,352                         | 234                                | 42,9                            | 31                     | 61,1                     | 61,1                     | 12,95                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,87                        | 4,348                         | 236                                | 43,15                           | 30,74                  | 60,2                     | 60,2                     | 12,93                            |
| 16:27                   | 13,5                          | 25                   | 0,862                       | 4,310                         | 234,3                              | 42,78                           | 30,96                  | 60,4                     | 60,4                     | 12,93                            |
| Gjennomsnitt            | 13,500                        | 25,000               | 0,865                       | 4,323                         | 234,597                            | 42,899                          | 30,923                 | 60,993                   | 60,993                   | 13,235                           |
| Std.avvik               | 0,000                         | 0,000                | 0,004                       | 0,020                         | 1,158                              | 0,199                           | 0,152                  | 0,403                    | 0,403                    | 0,244                            |

| Midlet prod.<br>el. effekt (kW) | Varme til<br>kjølev. (kW) | Avgassmåler<br>0=Boo/1=Testo | HCmet<br>(ppm) | NOx<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | CO2<br>(%) | O2<br>(%) | Spes. HC<br>(g/kWh) | Spes. NOx<br>(g/kWh) |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|-----------|---------------------|----------------------|
| 13,22                           | 26,19                     | 1                            | 1180           | 221          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,465               | 2,152                |
| 13,21                           | 26,19                     | 1                            | 1180           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,492               | 2,119                |
| 13,22                           | 26,21                     | 1                            | 1180           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,492               | 2,119                |
| 13,23                           | 26,23                     | 1                            | 1180           | 209          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,475               | 2,041                |
| 13,25                           | 26,23                     | 1                            | 1180           | 209          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,442               | 2,022                |
| 13,27                           | 26,21                     | 1                            | 1180           | 209          | 373         | 7,99       | 6,89      | 3,441               | 2,021                |
| 13,27                           | 26,23                     | 1                            | 1180           | 209          | 373         | 7,99       | 6,89      | 3,462               | 2,033                |
| 13,28                           | 26,24                     | 1                            | 1160           | 209          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,424               | 2,045                |
| 13,26                           | 26,22                     | 1                            | 1160           | 212          | 372         | 7,99       | 6,9       | 3,413               | 2,068                |
| 13,24                           | 26,2                      | 1                            | 1160           | 212          | 372         | 7,99       | 6,9       | 3,397               | 2,059                |
| 13,26                           | 26,23                     | 1                            | 1160           | 213          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,393               | 2,066                |
| 13,28                           | 26,21                     | 1                            | 1180           | 213          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,484               | 2,085                |
| 13,3                            | 26,21                     | 1                            | 1180           | 213          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,469               | 2,076                |
| 13,3                            | 26,23                     | 1                            | 1180           | 213          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,469               | 2,076                |
| 13,3                            | 26,23                     | 1                            | 1180           | 213          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,442               | 2,060                |
| 13,29                           | 26,23                     | 1                            | 1180           | 216          | 372         | 7,99       | 6,91      | 3,450               | 2,094                |
| 13,29                           | 26,26                     | 1                            | 1180           | 216          | 372         | 7,99       | 6,91      | 3,450               | 2,094                |
| 13,29                           | 26,23                     | 1                            | 1180           | 216          | 372         | 7,99       | 6,9       | 3,477               | 2,111                |
| 13,29                           | 26,23                     | 1                            | 1170           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,434               | 2,102                |
| 13,3                            | 26,23                     | 1                            | 1170           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,409               | 2,087                |
| 13,29                           | 26,08                     | 1                            | 1170           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,405               | 2,084                |
| 13,29                           | 26,05                     | 1                            | 1170           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,422               | 2,095                |
| 13,29                           | 26,03                     | 1                            | 1170           | 216          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,444               | 2,108                |
| 13,29                           | 26,03                     | 1                            | 1180           | 218          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,469               | 2,125                |
| 13,3                            | 26,04                     | 1                            | 1180           | 218          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,441               | 2,108                |
| 13,3                            | 26,03                     | 1                            | 1180           | 219          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,432               | 2,112                |
| 13,28                           | 26,03                     | 1                            | 1180           | 219          | 373         | 7,99       | 6,9       | 3,453               | 2,125                |
| 13,24                           | 26,02                     | 1                            | 1180           | 219          | 373         | 7,99       | 6,91      | 3,484               | 2,144                |
| 13,22                           | 26,05                     | 1                            | 1180           | 219          | 373         | 7,99       | 6,91      | 3,484               | 2,144                |
| 13,271                          | 26,166                    | 1,000                        | 1175,517       | 214,724      | 372,828     | 7,990      | 6,901     | 3,449               | 2,089                |
| 0,029                           | 0,087                     | 0,000                        | 7,361          | 3,504        | 0,384       | 0,000      | 0,005     | 0,029               | 0,036                |

| Spes. CO<br>(g/kWt) | Spes. CO2<br>(g/kWt) | Spes. O2<br>(g/kWt) | Spes. HC<br>mg/nm3 @ 5% O2() | Spes. NOx<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2()) | Spes. CO<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Beregnet<br>lambda | Energiinnhold i<br>gass (MJ/m3) | Tetthet på gass<br>kg/m3) | Kjølevannss-<br>flow (l/h) |
|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1,910               | 643,000              | 403,7               | 956                          | 493                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 1,925               | 648,000              | 406,8               | 956                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1822                       |
| 1,925               | 648,000              | 406,8               | 956                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 1,916               | 645,000              | 404,9               | 956                          | 466                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,898               | 639,000              | 401                 | 956                          | 466                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,897               | 638,000              | 400,3               | 956                          | 465                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,908               | 642,000              | 402,7               | 956                          | 465                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,920               | 646,000              | 405,8               | 940                          | 466                               | 529                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1826                       |
| 1,909               | 644,000              | 404,5               | 940                          | 472                               | 528                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,900               | 641,000              | 402,6               | 940                          | 472                               | 528                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,903               | 640,000              | 402,1               | 940                          | 475                               | 529                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,921               | 646,000              | 405,9               | 956                          | 475                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1826                       |
| 1,912               | 644,000              | 404,1               | 956                          | 475                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,912               | 644,000              | 404,1               | 956                          | 475                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,898               | 639,000              | 401                 | 956                          | 475                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1827                       |
| 1,897               | 640,000              | 402,5               | 957                          | 482                               | 528                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1826                       |
| 1,897               | 640,000              | 402,5               | 957                          | 482                               | 528                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1828                       |
| 1,912               | 645,000              | 405,1               | 956                          | 481                               | 528                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,909               | 643,000              | 403,5               | 948                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,896               | 638,000              | 400,6               | 948                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,893               | 637,000              | 400,1               | 948                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1825                       |
| 1,902               | 640,000              | 402                 | 948                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,915               | 644,000              | 404,7               | 948                          | 481                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 1,912               | 644,000              | 404,2               | 956                          | 486                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 1,897               | 638,000              | 400,9               | 956                          | 486                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 1,892               | 637,000              | 399,9               | 956                          | 488                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 1,904               | 641,000              | 402,3               | 956                          | 488                               | 529                            | 1,412              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 1,921               | 646,000              | 406,5               | 957                          | 488                               | 529                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                       |
| 1,921               | 646,000              | 406,5               | 957                          | 488                               | 529                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1824                       |
| 1,908               | 642,276              | 403,366             | 952,552                      | 478,483                           | 528,828                        | 1,412              | 35,730                          | 0,720                     | 1824,069                   |
| 0,010               | 3,316                | 2,155               | 5,986                        | 7,877                             | 0,384                          | 0,000              | 0,000                           | 0,000                     | 1,751                      |

| Kjølev. temp.<br>inn (°C) | Kjølev. temp.<br>ut (°C) | Varmelager<br>(kJ) | Melding T1<br>0=åpen/1=lukket | Melding T2<br>0=åpen/1=lukket | Melding T3<br>0=åpen/1=lukket | Temp. i motor-<br>rom (°C) | Midlingstid<br>(s) |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 79,9                      | 92,2                     | 37373              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,73                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37373              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,72                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37374              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,72                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37375              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,73                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37377              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,72                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37379              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,73                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37380              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37381              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37382              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37382              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37383              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37385              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37386              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37387              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,2                     | 37387              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37389              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37390              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37391              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 79,9                      | 92,3                     | 37392              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37392              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37393              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37394              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37396              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37396              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37396              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37396              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37397              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37398              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37400              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,74                      | 30                 |
| 80                        | 92,3                     | 37401              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,75                      | 30                 |
| 79,934                    | 92,259                   | 37387,207          | 0,000                         | 1,000                         | 1,000                         | 23,739                     | 30,000             |
| 0,048                     | 0,050                    | 8,487              | 0,000                         | 0,000                         | 0,000                         | 0,009                      | 0,000              |

Motornavn: Toyota gass (3Y anm. JK)  
 Dato [dd/mm/åå]: 21.03.2007

| Avgasstemp. [j |               | 86,4         |               |                 |                 |                  |            |              |              |                 |  |
|----------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|--------------|--------------|-----------------|--|
| Tid            | Ønsket effekt | Varmeforbruk | Drivstoff-    | Drivstoff-      | Spes. dr.stoff- | Tilført med      | El. virkn. | Varme virkn. | Varme virkn. | Umidlet prod.   |  |
| hh:mm          | (kW)          | (kW)         | forbruk (g/s) | forbruk (nm3/h) | forbruk (g/kWh) | drivstoffet (kW) | grad (%)   | grad (%)     | grad (%)     | el. effekt (kW) |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,535           | 258,6           | 35,04            | 28,06      | 63,6         | 91,8         | 10,24           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,535           | 258,6           | 35,09            | 28,05      | 63,4         | 91,7         | 9,91            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,709         | 3,545           | 259,1           | 35,18            | 28         | 63,3         | 91,4         | 9,91            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,530           | 257,8           | 35,03            | 28,14      | 63,7         | 91,4         | 9,65            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,709         | 3,543           | 259,1           | 35,17            | 28         | 63,3         | 91,8         | 9,65            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,711         | 3,554           | 260,3           | 35,28            | 27,87      | 63,4         | 91,2         | 10,13           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,705         | 3,526           | 257,8           | 35               | 28,14      | 63           | 91,2         | 10,13           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,704         | 3,519           | 256,9           | 34,92            | 28,24      | 63,8         | 91,3         | 9,74            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,703         | 3,515           | 256,6           | 34,88            | 28,27      | 63,8         | 91,3         | 9,74            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,532           | 257,9           | 35,06            | 28,13      | 64,3         | 92,1         | 10,15           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,535           | 257,8           | 35,09            | 28,14      | 64,5         | 92,6         | 10,15           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,533           | 257,4           | 35,06            | 28,18      | 64,3         | 92,5         | 10,18           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,530           | 256,8           | 35,04            | 28,25      | 64,3         | 92,5         | 10,18           |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,537           | 256,8           | 35,11            | 28,25      | 64,3         | 92,6         | 9,87            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,536           | 256,8           | 35,09            | 28,25      | 64,4         | 92,6         | 9,87            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,535           | 256,8           | 35,09            | 28,25      | 64,3         | 92,6         | 9,98            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,708         | 3,539           | 256,8           | 35,09            | 28,25      | 64,3         | 92,6         | 9,98            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,531           | 256,9           | 35,13            | 28,24      | 64,2         | 92,5         | 9,76            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,704         | 3,522           | 256,1           | 35,05            | 28,32      | 64,1         | 92,4         | 9,76            |  |
| 16:15          | 10,5          | 25           | 0,708         | 3,538           | 256,4           | 35,11            | 28,29      | 63,9         | 92,2         | 10,23           |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,533           | 255,8           | 35,07            | 28,36      | 63,6         | 92           | 10,23           |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,532           | 255,4           | 35,06            | 28,41      | 63,6         | 92           | 9,82            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,532           | 255,4           | 35,06            | 28,4       | 63,7         | 92           | 9,82            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,535           | 255,6           | 35,09            | 28,38      | 64           | 92           | 10,11           |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,704         | 3,519           | 254,1           | 34,93            | 28,55      | 64           | 92,5         | 10,11           |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,708         | 3,540           | 255,2           | 35,13            | 28,42      | 64,3         | 92,5         | 9,21            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,706         | 3,529           | 254,9           | 35,02            | 28,46      | 64           | 92,4         | 9,21            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,707         | 3,534           | 255,8           | 35,08            | 28,35      | 64,1         | 92,6         | 9,82            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,708         | 3,542           | 255,8           | 35,08            | 28,35      | 64,1         | 92,6         | 9,82            |  |
| 16:16          | 10,5          | 25           | 0,71          | 3,549           | 257,6           | 35,23            | 28,16      | 63,7         | 92,3         | 10,19           |  |
| Gjennomsnitt   | 10,500        | 25,000       | 0,707         | 3,534           | 256,897         | 35,075           | 28,239     | 63,910       | 92,107       | 9,918           |  |
| Std.avvik      | 0,000         | 0,000        | 0,002         | 0,008           | 1,399           | 0,082            | 0,152      | 0,390        | 0,493        | 0,269           |  |



| Midlet prod.<br>el. effekt (kW) | Varme til<br>kjølev. (kW) | Avgassmåler<br>0=Boo/1=Testo | HCmet<br>(ppm) | NOx<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | CO2<br>(%) | O2<br>(%) | Spes. HC<br>(g/kWt) | Spes. NOx<br>(g/kWt) |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|-----------|---------------------|----------------------|
| 9,84                            | 22,26                     | 1                            | 1310           | 100          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,300               | 1,088                |
| 9,85                            | 22,26                     | 1                            | 1310           | 100          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,300               | 1,088                |
| 9,85                            | 22,26                     | 1                            | 1320           | 100          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,336               | 1,089                |
| 9,86                            | 22,3                      | 1                            | 1320           | 100          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,344               | 1,091                |
| 9,85                            | 22,28                     | 1                            | 1320           | 102          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,331               | 1,110                |
| 9,83                            | 22,28                     | 1                            | 1320           | 102          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,354               | 1,116                |
| 9,86                            | 22,24                     | 1                            | 1320           | 102          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,327               | 1,109                |
| 9,86                            | 22,27                     | 1                            | 1320           | 102          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,327               | 1,109                |
| 9,86                            | 22,26                     | 1                            | 1320           | 102          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,311               | 1,104                |
| 9,87                            | 22,53                     | 1                            | 1310           | 101          | 408         | 7,82       | 7,21      | 4,297               | 1,098                |
| 9,88                            | 22,62                     | 1                            | 1310           | 101          | 408         | 7,82       | 7,21      | 4,296               | 1,098                |
| 9,9                             | 22,57                     | 1                            | 1310           | 101          | 408         | 7,82       | 7,21      | 4,296               | 1,098                |
| 9,9                             | 22,57                     | 1                            | 1310           | 101          | 408         | 7,82       | 7,21      | 4,282               | 1,095                |
| 9,92                            | 22,59                     | 1                            | 1310           | 101          | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,277               | 1,093                |
| 9,92                            | 22,6                      | 1                            | 1320           | 100          | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,310               | 1,083                |
| 9,91                            | 22,58                     | 1                            | 1320           | 100          | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,308               | 1,082                |
| 9,92                            | 22,58                     | 1                            | 1320           | 99           | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,306               | 1,071                |
| 9,93                            | 22,51                     | 1                            | 1320           | 99           | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,308               | 1,071                |
| 9,93                            | 22,51                     | 1                            | 1320           | 99           | 408         | 7,82       | 7,2       | 4,296               | 1,068                |
| 9,95                            | 22,33                     | 1                            | 1300           | 98           | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,239               | 1,060                |
| 9,95                            | 22,34                     | 1                            | 1300           | 98           | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,239               | 1,060                |
| 9,96                            | 22,3                      | 1                            | 1300           | 101          | 407         | 7,82       | 7,19      | 4,227               | 1,089                |
| 9,96                            | 22,33                     | 1                            | 1300           | 101          | 407         | 7,82       | 7,19      | 4,220               | 1,087                |
| 9,96                            | 22,44                     | 1                            | 1300           | 101          | 407         | 7,83       | 7,19      | 4,219               | 1,087                |
| 9,99                            | 22,45                     | 1                            | 1300           | 104          | 407         | 7,83       | 7,19      | 4,216               | 1,118                |
| 9,99                            | 22,46                     | 1                            | 1300           | 104          | 407         | 7,83       | 7,19      | 4,191               | 1,112                |
| 9,97                            | 22,47                     | 1                            | 1320           | 103          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,291               | 1,110                |
| 9,95                            | 22,46                     | 1                            | 1320           | 103          | 407         | 7,82       | 7,2       | 4,286               | 1,109                |
| 9,93                            | 22,46                     | 1                            | 1320           | 103          | 407         | 7,82       | 7,21      | 4,301               | 1,113                |
| 9,92                            | 22,43                     | 1                            | 1320           | 100          | 407         | 7,82       | 7,21      | 4,325               | 1,086                |
| 9,909                           | 22,418                    | 1,000                        | 1313,000       | 100,933      | 407,333     | 7,821      | 7,200     | 4,289               | 1,093                |
| 0,047                           | 0,129                     | 0,000                        | 8,367          | 1,574        | 0,479       | 0,003      | 0,006     | 0,042               | 0,016                |

| Spes. CO<br>(g/kWt) | Spes. CO2<br>(g/kWt) | Spes. O2<br>(g/kWt) | Spes. HC<br>mg/nm3 @ 5% O2() | Spes. NOx<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2()) | Spes. CO<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Beregnet<br>lambda | Energiinnhold i<br>gass (MJ/m3) | Tetthet på gass<br>kg/m3) | Kjølevannss-<br>flow (l/h) |
|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 2,336               | 705                  | 472                 | 1085                         | 227,8                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,336               | 705                  | 472                 | 1085                         | 227,8                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,338               | 706                  | 472                 | 1093                         | 227,8                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,343               | 707                  | 473                 | 1093                         | 227,8                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1823                       |
| 2,336               | 705                  | 472                 | 1093                         | 232,3                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,348               | 709                  | 474                 | 1093                         | 232,3                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                       |
| 2,333               | 704                  | 471                 | 1093                         | 232,3                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                       |
| 2,333               | 704                  | 471                 | 1093                         | 232,3                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                       |
| 2,324               | 702                  | 470                 | 1093                         | 232,3                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                       |
| 2,340               | 705                  | 472                 | 1086                         | 230,2                             | 592                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                       |
| 2,340               | 705                  | 472                 | 1086                         | 230,2                             | 592                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,340               | 705                  | 472                 | 1086                         | 230,2                             | 592                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                       |
| 2,332               | 702                  | 471                 | 1086                         | 230,2                             | 592                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,329               | 701                  | 470                 | 1085                         | 230                               | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,330               | 702                  | 470                 | 1093                         | 227,8                             | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,329               | 701                  | 470                 | 1093                         | 227,8                             | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                       |
| 2,327               | 701                  | 469                 | 1093                         | 225,5                             | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                       |
| 2,329               | 701                  | 469                 | 1093                         | 225,5                             | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                       |
| 2,322               | 699                  | 468                 | 1093                         | 225,5                             | 591                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                       |
| 2,321               | 701                  | 469                 | 1077                         | 223,2                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                       |
| 2,321               | 701                  | 469                 | 1077                         | 223,2                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,314               | 699                  | 467                 | 1076                         | 229,9                             | 589                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                       |
| 2,310               | 697                  | 466                 | 1076                         | 229,9                             | 589                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,310               | 698                  | 466                 | 1076                         | 229,9                             | 589                            | 1,436              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,308               | 698                  | 466                 | 1076                         | 236,7                             | 589                            | 1,436              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,294               | 694                  | 463                 | 1076                         | 236,7                             | 589                            | 1,436              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,314               | 699                  | 468                 | 1093                         | 234,6                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1822                       |
| 2,311               | 698                  | 467                 | 1093                         | 234,6                             | 590                            | 1,437              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,319               | 700                  | 469                 | 1094                         | 234,8                             | 590                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                       |
| 2,332               | 704                  | 472                 | 1094                         | 227,9                             | 590                            | 1,438              | 35,73                           | 0,72                      | 1822                       |
| 2,327               | 701,933              | 469,733             | 1087,433                     | 229,900                           | 590,300                        | 1,437              | 35,730                          | 0,720                     | 1820,367                   |
| 0,012               | 3,373                | 2,532               | 6,991                        | 3,563                             | 0,915                          | 0,001              | 0,000                           | 0,000                     | 1,245                      |

| Kjølev. temp.<br>inn (°C) | Kjølev. temp.<br>ut (°C) | Varmelager<br>(kJ) | Melding T1<br>0=åpen/1=lukket | Melding T2<br>0=åpen/1=lukket | Melding T3<br>0=åpen/1=lukket | Temp. i motor-<br>rom (°C) | Midlingstid<br>(s) |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 80,1                      | 90,7                     | 37670              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,29                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37667              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,29                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37664              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,3                       | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37661              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,29                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37661              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,29                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37655              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37652              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37649              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,12                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37646              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,12                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37643              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,12                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37641              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,11                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37638              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,11                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37638              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,11                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37636              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,11                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37633              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,11                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37630              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37625              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37625              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37622              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37617              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,7                     | 37614              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,18                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,6                     | 37614              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,19                      | 30                 |
| 80,1                      | 90,6                     | 37608              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,19                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37608              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,19                      | 30                 |
| 80                        | 90,7                     | 37605              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,19                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37603              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,19                      | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37600              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,2                       | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37597              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,2                       | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37592              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,2                       | 30                 |
| 80                        | 90,6                     | 37589              | 0                             | 1                             | 1                             | 23,2                       | 30                 |
| 80,047                    | 90,663                   | 37630,100          | 0,000                         | 1,000                         | 1,000                         | 23,185                     | 30,000             |
| 0,051                     | 0,049                    | 23,829             | 0,000                         | 0,000                         | 0,000                         | 0,059                      | 0,000              |

Motornavn: Toyota gass (3Y anm. JK)  
 Dato [dd/mm/åå]: 21.03.2007

| Avgas-temp. [i] | 81,8          |              |               |                 |                 |                  |            |              |              |                 |  |
|-----------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|--------------|--------------|-----------------|--|
| Tid             | Ønsket effekt | Varmeforbruk | Drivstoff-    | Drivstoff-      | Spes. dr.stoff- | Tilført med      | El. virkn. | Varme virkn. | Varme virkn. | Umidlet prod.   |  |
| hh:mm           | (kW)          | (kW)         | forbruk (g/s) | forbruk (nm3/h) | forbruk (g/kWh) | drivstoffet (kW) | grad (%)   | grad (%)     | grad (%)     | el. effekt (kW) |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,828           | 281,9           | 28,07            | 25,73      | 68,4         | 94,2         | 7,4             |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,834           | 282,2           | 28,13            | 25,71      | 68,2         | 94           | 6,95            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,827           | 282,2           | 28,05            | 25,71      | 68,3         | 94           | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,835           | 282,5           | 28,14            | 25,68      | 68,4         | 94,2         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,836           | 282,7           | 28,15            | 25,66      | 68,1         | 94,1         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,837           | 283             | 28,16            | 25,63      | 68,2         | 93,8         | 7,07            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,832           | 282,8           | 28,11            | 25,65      | 68,1         | 93,8         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,831           | 282,7           | 28,1             | 25,66      | 68,1         | 93,8         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,834           | 283             | 28,13            | 25,63      | 68,1         | 93,9         | 7,15            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,833           | 283,2           | 28,12            | 25,62      | 68,1         | 93,9         | 7,15            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,831           | 283,2           | 28,1             | 25,61      | 68,1         | 93,7         | 7,41            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,825           | 283,2           | 28,1             | 25,61      | 68,1         | 93,8         | 7,41            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,827           | 282,7           | 28,06            | 25,66      | 68,4         | 94,1         | 7,41            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,825           | 282,5           | 28,04            | 25,68      | 68,3         | 94           | 7,25            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,825           | 282,5           | 28,04            | 25,68      | 68,3         | 94           | 7,25            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,825           | 282,6           | 28,03            | 25,67      | 68,3         | 94           | 7,02            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,829           | 282,6           | 28,03            | 25,67      | 68,3         | 94           | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,833           | 283,7           | 28,11            | 25,57      | 68,1         | 93,9         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,832           | 283,7           | 28,11            | 25,57      | 68,1         | 93,7         | 7,16            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,836           | 283,7           | 28,11            | 25,57      | 68,1         | 93,7         | 7,12            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,567         | 2,834           | 284,1           | 28,13            | 25,53      | 67,8         | 93,4         | 7,12            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,831           | 283,3           | 28,09            | 25,61      | 67,8         | 93,4         | 7,35            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,825           | 282             | 28,04            | 25,73      | 68,3         | 93,7         | 7,2             |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,828           | 282,2           | 28,07            | 25,71      | 68,2         | 94           | 7,2             |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,828           | 282             | 28,07            | 25,73      | 68,7         | 94,4         | 7,2             |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,565         | 2,826           | 281,7           | 28,05            | 25,75      | 68,7         | 94,4         | 7,1             |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,564         | 2,821           | 281,3           | 28               | 25,79      | 68,7         | 94,5         | 7,29            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,563         | 2,817           | 281             | 27,96            | 25,81      | 68,7         | 94,5         | 7,29            |  |
| 16:04           | 7,5           | 25           | 0,566         | 2,829           | 282,3           | 28,08            | 25,7       | 69,1         | 94,9         | 7,3             |  |
| Gjennomsnitt    | 7,500         | 25,000       | 0,566         | 2,829           | 282,638         | 28,082           | 25,667     | 68,279       | 93,993       | 7,204           |  |
| Std.avvik       | 0,000         | 0,000        | 0,001         | 0,005           | 0,724           | 0,047            | 0,066      | 0,282        | 0,327        | 0,116           |  |

| Midlet prod.<br>el. effekt (kW) | Varme til<br>kølev. (kW) | Avgassmåler<br>0=Boo/1=Testo | Hcmet<br>(ppm) | NOx<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | CO2<br>(%) | O2<br>(%) | Spes. HC<br>(g/kWh) | Spes. NOx<br>(g/kWh) |  |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|-----------|---------------------|----------------------|--|
| 7,22                            | 19,19                    | 1                            | 1350           | 85           | 444         | 7,96       | 6,95      | 4,76                | 0,993                |  |
| 7,23                            | 19,19                    | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,76                | 0,96                 |  |
| 7,23                            | 19,21                    | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,77                | 0,961                |  |
| 7,22                            | 19,2                     | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,76                | 0,959                |  |
| 7,22                            | 19,18                    | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,77                | 0,962                |  |
| 7,22                            | 19,19                    | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,78                | 0,963                |  |
| 7,21                            | 19,19                    | 1                            | 1350           | 82           | 445         | 7,96       | 6,95      | 4,79                | 0,964                |  |
| 7,21                            | 19,19                    | 1                            | 1350           | 82           | 445         | 7,96       | 6,95      | 4,78                | 0,962                |  |
| 7,21                            | 19,15                    | 1                            | 1350           | 82           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,78                | 0,962                |  |
| 7,2                             | 19,15                    | 1                            | 1350           | 83           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,78                | 0,976                |  |
| 7,2                             | 19,16                    | 1                            | 1350           | 83           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,79                | 0,976                |  |
| 7,2                             | 19,16                    | 1                            | 1330           | 83           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,79                | 0,946                |  |
| 7,2                             | 19,2                     | 1                            | 1330           | 83           | 444         | 7,96       | 6,96      | 4,72                | 0,974                |  |
| 7,2                             | 19,17                    | 1                            | 1330           | 83           | 444         | 7,96       | 6,95      | 4,7                 | 0,974                |  |
| 7,2                             | 19,17                    | 1                            | 1330           | 83           | 444         | 7,96       | 6,95      | 4,71                | 0,974                |  |
| 7,2                             | 19,16                    | 1                            | 1330           | 82           | 444         | 7,96       | 6,95      | 4,7                 | 0,962                |  |
| 7,19                            | 19,15                    | 1                            | 1350           | 80           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,78                | 0,939                |  |
| 7,19                            | 19,13                    | 1                            | 1350           | 81           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,79                | 0,954                |  |
| 7,19                            | 19,15                    | 1                            | 1350           | 81           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,79                | 0,954                |  |
| 7,19                            | 19,14                    | 1                            | 1350           | 81           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,79                | 0,954                |  |
| 7,18                            | 19,09                    | 1                            | 1350           | 81           | 443         | 7,96       | 6,96      | 4,8                 | 0,956                |  |
| 7,19                            | 19,09                    | 1                            | 1340           | 83           | 443         | 7,96       | 6,96      | 4,76                | 0,977                |  |
| 7,22                            | 19,16                    | 1                            | 1340           | 83           | 443         | 7,96       | 6,96      | 4,73                | 0,972                |  |
| 7,22                            | 19,14                    | 1                            | 1340           | 83           | 443         | 7,96       | 6,96      | 4,73                | 0,972                |  |
| 7,22                            | 19,27                    | 1                            | 1340           | 83           | 443         | 7,96       | 6,97      | 4,74                | 0,973                |  |
| 7,22                            | 19,27                    | 1                            | 1340           | 83           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,73                | 0,971                |  |
| 7,22                            | 19,27                    | 1                            | 1340           | 81           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,73                | 0,947                |  |
| 7,22                            | 19,27                    | 1                            | 1340           | 81           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,72                | 0,946                |  |
| 7,21                            | 19,33                    | 1                            | 1350           | 80           | 443         | 7,96       | 6,95      | 4,75                | 0,933                |  |
| 7,208                           | 19,183                   | 1,000                        | 1344,138       | 82,138       | 443,621     | 7,960      | 6,956     | 4,758               | 0,963                |  |
| 0,014                           | 0,055                    | 0,000                        | 7,800          | 1,093        | 0,622       | 0,000      | 0,006     | 0,031               | 0,013                |  |

| Spes. CO<br>(g/kWt) | Spes. CO2<br>(g/kWt) | Spes. O2<br>(g/kWt) | Spes. HC<br>mg/nm3 @ 5% O2() | Spes. NOx<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Spes. CO<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Beregnet<br>lambda | Energiinnhold i<br>gass (MJ/m3) | Tetthet på gass<br>kg/m3) | Kjølevanns-<br>flow (l/h) |
|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2,731               | 769                  | 488                 | 1098                         | 190,1                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,734               | 770                  | 490                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                      |
| 2,738               | 771                  | 490                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                      |
| 2,731               | 769                  | 489                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                      |
| 2,74                | 772                  | 491                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                      |
| 2,743               | 773                  | 491                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                      |
| 2,753               | 774                  | 491                 | 1098                         | 183,4                           | 633                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                      |
| 2,747               | 772                  | 490                 | 1098                         | 183,4                           | 633                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                      |
| 2,741               | 772                  | 491                 | 1099                         | 183,5                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                      |
| 2,747               | 774                  | 492                 | 1099                         | 185,8                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,749               | 774                  | 492                 | 1099                         | 185,8                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,746               | 774                  | 492                 | 1083                         | 185,8                           | 632                            | 1,414              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,74                | 772                  | 491                 | 1083                         | 185,8                           | 632                            | 1,414              | 35,73                           | 0,72                      | 1820                      |
| 2,741               | 772                  | 490                 | 1082                         | 185,6                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                      |
| 2,74                | 772                  | 490                 | 1082                         | 185,6                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,74                | 772                  | 490                 | 1082                         | 183,4                           | 632                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                      |
| 2,736               | 772                  | 490                 | 1098                         | 178,9                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,744               | 775                  | 492                 | 1098                         | 181,2                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                      |
| 2,744               | 775                  | 492                 | 1098                         | 181,2                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1819                      |
| 2,745               | 775                  | 492                 | 1098                         | 181,2                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,75                | 777                  | 494                 | 1099                         | 181,3                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                      |
| 2,745               | 775                  | 493                 | 1091                         | 185,8                           | 631                            | 1,414              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                      |
| 2,729               | 770                  | 490                 | 1091                         | 185,8                           | 631                            | 1,414              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,729               | 770                  | 490                 | 1091                         | 185,8                           | 631                            | 1,414              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,7432              | 770                  | 491                 | 1091                         | 185,9                           | 631                            | 1,415              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                      |
| 2,726               | 770                  | 489                 | 1090                         | 185,6                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                      |
| 2,725               | 769                  | 488                 | 1090                         | 181,2                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                      |
| 2,722               | 768                  | 488                 | 1090                         | 181,2                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                      |
| 2,719               | 768                  | 487                 | 1098                         | 178,9                           | 631                            | 1,413              | 35,73                           | 0,72                      | 1821                      |
| 2,739               | 771,931              | 490,483             | 1093,828                     | 183,783                         | 631,621                        | 1,413              | 35,730                          | 0,720                     | 1817,793                  |
| 0,009               | 2,374                | 1,595               | 6,297                        | 2,471                           | 0,622                          | 0,001              | 0,000                           | 0,000                     | 1,521                     |

| Kjølev. temp. inn (°C) | Kjølev. temp. ut (°C) | Varmelager (kJ)     | Melding T1<br>0=åpen/1=lukket | Melding T2<br>0=åpen/1=lukket | Melding T3<br>0=åpen/1=lukket | Temp. i motorrom (°C) | Midlingstid (s) |
|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|
| 80                     | 89,1                  | 40167               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,63                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40161               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,63                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40161               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,63                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40149               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,64                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40143               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,63                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40137               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,64                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40131               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,64                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40131               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,65                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40125               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,65                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40113               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,66                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40113               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,66                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40106               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,66                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40100               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,67                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40094               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,67                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40088               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40076               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40076               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40064               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40058               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40058               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,72                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40052               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40046               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40034               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80,1                   | 89,1                  | 40028               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80                     | 89,1                  | 40028               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,73                 | 30              |
| 80                     | 89,1                  | 40022               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,74                 | 30              |
| 80                     | 89,1                  | 40016               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,74                 | 30              |
| 80                     | 89,1                  | 40010               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,74                 | 30              |
| 80                     | 89,1                  | 39998               | 0                             | 1                             | 1                             | 22,74                 | 30              |
| 80,079<br>0,041        | 89,100<br>0,000       | 40085,690<br>50,806 | 0,000<br>0,000                | 1,000<br>0,000                | 1,000<br>0,000                | 22,691<br>0,045       | 30,000<br>0,000 |

Motornavn: Toyota gass (3Y anm. JK)  
 Dato [dd/mm/åå]: 21.03.2007

| Avgas-temp. (j) | 83,3               |                   |                         |                           |                                |                              |                     |                       |                       |                               |  |
|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|--|
| Tid hh:mm       | Ønsket effekt (kW) | Varmeforbruk (kW) | Drivstoff-forbruk (g/s) | Drivstoff-forbruk (nm3/h) | Spes. dr.stoff-forbruk (g/kWh) | Tilført med drivstoffet (kW) | El. virkn. grad (%) | Varme virkn. grad (%) | Varme virkn. grad (%) | Umidlet prod. el. effekt (kW) |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4062                  | 2,031                     | 346,6                          | 20,16                        | 20,93               | 75,3                  | 96                    | 4,169                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4063                  | 2,032                     | 346,6                          | 20,16                        | 20,93               | 75,3                  | 96,2                  | 4,169                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4055                  | 2,027                     | 347                            | 20,16                        | 20,91               | 75,6                  | 96,5                  | 4,769                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4055                  | 2,028                     | 346,6                          | 20,21                        | 20,94               | 75,8                  | 96,5                  | 4,21                          |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4091                  | 2,046                     | 349,7                          | 20,3                         | 20,74               | 77                    | 96,7                  | 4,21                          |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4071                  | 2,036                     | 348                            | 20,2                         | 20,85               | 76,4                  | 97,1                  | 4,192                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4053                  | 2,026                     | 346,4                          | 20,11                        | 20,94               | 76,8                  | 97,2                  | 4,097                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4069                  | 2,035                     | 348                            | 20,19                        | 20,84               | 76,8                  | 97,6                  | 4,097                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4073                  | 2,037                     | 348,5                          | 20,21                        | 20,82               | 76,9                  | 97,6                  | 4,097                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4075                  | 2,037                     | 348,5                          | 20,21                        | 20,82               | 76,9                  | 97,6                  | 4,222                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4065                  | 2,033                     | 348,6                          | 20,22                        | 20,81               | 77                    | 97,8                  | 4,222                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4054                  | 2,027                     | 346,9                          | 20,12                        | 20,91               | 77                    | 97,8                  | 4,224                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4082                  | 2,041                     | 349,4                          | 20,26                        | 20,76               | 76,7                  | 97,5                  | 4,267                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4072                  | 2,036                     | 348,5                          | 20,21                        | 20,82               | 76,7                  | 97,5                  | 4,267                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4049                  | 2,024                     | 346,5                          | 20,09                        | 20,94               | 76,7                  | 97,5                  | 4,267                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4036                  | 2,018                     | 345,3                          | 20,03                        | 21,01               | 77,4                  | 98,3                  | 4,221                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4056                  | 2,028                     | 347                            | 20,13                        | 20,91               | 77,4                  | 98,4                  | 4,221                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4074                  | 2,037                     | 348,6                          | 20,22                        | 20,81               | 77,3                  | 98,2                  | 4,193                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4063                  | 2,031                     | 347,7                          | 20,16                        | 20,86               | 76,5                  | 97,8                  | 4,193                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4054                  | 2,027                     | 347                            | 20,12                        | 20,91               | 76,6                  | 97,4                  | 4,348                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4074                  | 2,037                     | 347                            | 20,12                        | 20,91               | 76,5                  | 97,4                  | 4,348                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4065                  | 3,033                     | 347,1                          | 20,17                        | 20,9                | 76,1                  | 97,3                  | 4,135                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4057                  | 2,029                     | 346,6                          | 20,13                        | 20,93               | 76,4                  | 97,4                  | 4,135                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,406                   | 2,03                      | 347                            | 20,15                        | 20,91               | 76,3                  | 97,2                  | 4,232                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4071                  | 2,036                     | 347                            | 20,15                        | 20,91               | 76,3                  | 97,2                  | 4,232                         |  |
| 15:47           | 4,5                | 15                | 0,4061                  | 2,031                     | 347,3                          | 20,15                        | 20,89               | 76                    | 96,9                  | 4,077                         |  |
| 15:48           | 4,5                | 15                | 0,4052                  | 2,026                     | 346,8                          | 20,11                        | 20,92               | 76,1                  | 96,9                  | 4,077                         |  |
| 15:48           | 4,5                | 15                | 0,4064                  | 2,032                     | 348,2                          | 20,17                        | 20,83               | 76                    | 96,9                  | 4,274                         |  |
| 15:48           | 4,5                | 15                | 0,4073                  | 2,036                     | 348,8                          | 20,21                        | 20,8                | 76,2                  | 96,9                  | 4,274                         |  |
| Gjennomsnitt    | 4,500              | 15,000            | 0,406                   | 2,066                     | 347,490                        | 20,167                       | 20,878              | 76,483                | 127,762               | 4,222                         |  |
| Std.avvik       | 0,000              | 0,000             | 0,001                   | 0,186                     | 1,025                          | 0,055                        | 0,063               | 0,561                 | 164,294               | 0,128                         |  |



| Midlet prod.<br>el. effekt (kW) | Varme til<br>kølev. (kW) | Avgassmåler<br>0=Boo/1=Testo | HCmet<br>(ppm) | NOx<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | CO2<br>(%) | O2<br>(%) | Spes. HC<br>(g/kWh) | Spes. NOx<br>(g/kWh) |  |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|-----------|---------------------|----------------------|--|
| 4,219                           | 15,24                    | 1                            | 1130           | 153          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,478               | 2,010                |  |
| 4,216                           | 15,24                    | 1                            | 1130           | 153          | 492         | 8,88       | 5,33      | 4,484               | 2,013                |  |
| 4,212                           | 15,25                    | 1                            | 1140           | 153          | 492         | 8,88       | 5,33      | 4,516               | 2,010                |  |
| 4,212                           | 15,49                    | 1                            | 1140           | 153          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,560               | 2,028                |  |
| 4,212                           | 15,51                    | 1                            | 1140           | 153          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,560               | 2,028                |  |
| 4,209                           | 15,51                    | 1                            | 1140           | 153          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,530               | 2,018                |  |
| 4,209                           | 15,51                    | 1                            | 1140           | 153          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,517               | 2,010                |  |
| 4,208                           | 15,54                    | 1                            | 1140           | 152          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,530               | 2,005                |  |
| 4,208                           | 15,54                    | 1                            | 1140           | 152          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,540               | 2,008                |  |
| 4,207                           | 15,56                    | 1                            | 1130           | 152          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,503               | 2,009                |  |
| 4,207                           | 15,54                    | 1                            | 1130           | 152          | 492         | 8,88       | 5,33      | 4,483               | 2,000                |  |
| 4,206                           | 15,54                    | 1                            | 1130           | 152          | 492         | 8,88       | 5,33      | 4,483               | 2,000                |  |
| 4,207                           | 15,53                    | 1                            | 1130           | 152          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,501               | 2,008                |  |
| 4,207                           | 15,53                    | 1                            | 1130           | 152          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,501               | 2,008                |  |
| 4,208                           | 15,55                    | 1                            | 1140           | 153          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,514               | 2,009                |  |
| 4,208                           | 15,55                    | 1                            | 1140           | 153          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,499               | 2,002                |  |
| 4,207                           | 15,56                    | 1                            | 1140           | 155          | 493         | 8,89       | 5,32      | 4,520               | 2,038                |  |
| 4,206                           | 15,42                    | 1                            | 1140           | 155          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,530               | 2,043                |  |
| 4,206                           | 15,41                    | 1                            | 1140           | 155          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,530               | 2,043                |  |
| 4,211                           | 15,39                    | 1                            | 1130           | 156          | 492         | 8,88       | 5,32      | 4,477               | 2,049                |  |
| 4,216                           | 15,39                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,484               | 2,066                |  |
| 4,214                           | 15,39                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,32      | 4,484               | 2,066                |  |
| 4,212                           | 15,37                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,484               | 2,066                |  |
| 4,208                           | 15,37                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,484               | 2,066                |  |
| 4,210                           | 15,35                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,501               | 2,074                |  |
| 4,206                           | 15,35                    | 1                            | 1130           | 157          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,492               | 2,070                |  |
| 4,203                           | 15,34                    | 1                            | 1130           | 155          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,500               | 2,047                |  |
| 4,205                           | 15,37                    | 1                            | 1130           | 155          | 493         | 8,88       | 5,33      | 4,508               | 2,050                |  |
| 4,209                           | 15,434                   | 1,000                        | 1134,138       | 154,034      | 492,552     | 8,880      | 5,323     | 4,507               | 2,030                |  |
| 0,004                           | 0,109                    | 0,000                        | 5,012          | 1,899        | 0,506       | 0,002      | 0,005     | 0,023               | 0,025                |  |

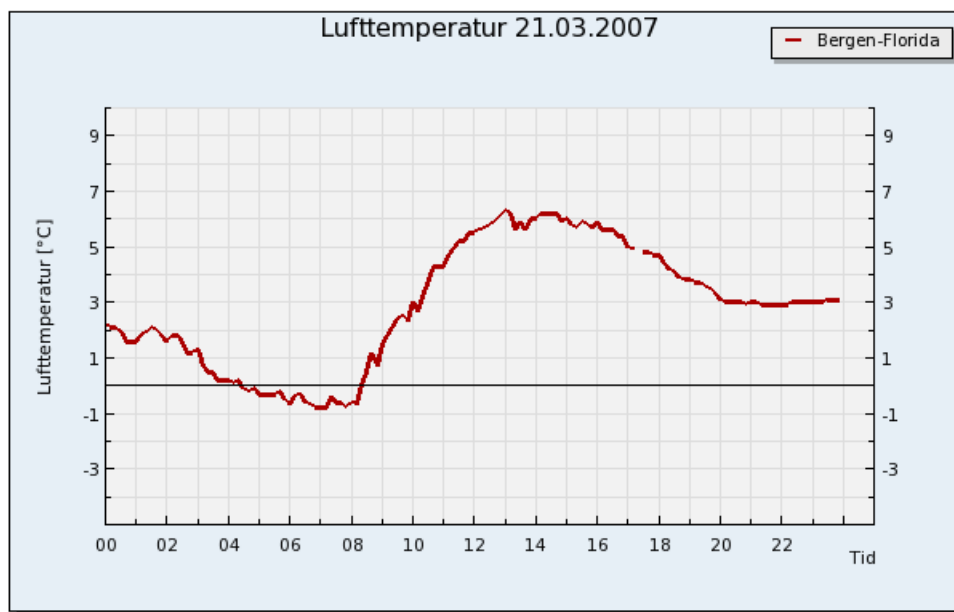
| Spes. CO<br>(g/kWt) | Spes. CO2<br>(g/kWt) | Spes. O2<br>(g/kWt) | Spes. HC<br>mg/nm3 @ 5% O2() | Spes. NOx<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Spes. CO<br>O2(mg/nm3 @ 5% O2) | Beregnet<br>lambda | Energiinnhold i<br>gass (MJ/m3) | Tetthet på gass<br>kg/m3) | Kjølevannss-<br>flow (l/h) |
|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 3,365               | 954                  | 415,7               | 823                          | 306,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1813                       |
| 3,350               | 950                  | 413,9               | 823                          | 306,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1814                       |
| 3,355               | 951                  | 415,2               | 823                          | 306,6                           | 627                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1813                       |
| 3,349               | 950                  | 414,5               | 831                          | 306,6                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1813                       |
| 3,387               | 958                  | 417,5               | 830                          | 306,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1814                       |
| 3,387               | 958                  | 417,5               | 830                          | 306,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1814                       |
| 3,370               | 954                  | 415,4               | 830                          | 306,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,350               | 950                  | 413,8               | 830                          | 306,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,364               | 954                  | 415,5               | 830                          | 304,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,368               | 955                  | 416,1               | 830                          | 304,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                       |
| 3,370               | 956                  | 416,3               | 823                          | 304,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,355               | 951                  | 415,2               | 823                          | 304,6                           | 627                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                       |
| 3,355               | 951                  | 415,2               | 823                          | 304,6                           | 627                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                       |
| 3,368               | 955                  | 416                 | 823                          | 304,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1816                       |
| 3,368               | 955                  | 416                 | 823                          | 304,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1818                       |
| 3,355               | 950                  | 413,6               | 830                          | 306,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                       |
| 3,344               | 946                  | 412,2               | 830                          | 306,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1817                       |
| 3,360               | 952                  | 414,2               | 830                          | 310,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,368               | 953                  | 415,1               | 830                          | 310,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,368               | 953                  | 415,1               | 830                          | 310,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,350               | 950                  | 413,8               | 823                          | 312,4                           | 627                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,362               | 952                  | 414,5               | 823                          | 314,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,362               | 952                  | 414,5               | 823                          | 314,4                           | 628                            | 1,282              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,362               | 951                  | 415,2               | 823                          | 314,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1814                       |
| 3,362               | 951                  | 415,2               | 823                          | 314,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,375               | 955                  | 416,8               | 823                          | 314,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1815                       |
| 3,368               | 953                  | 416                 | 823                          | 314,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1813                       |
| 3,374               | 955                  | 416,7               | 823                          | 310,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1812                       |
| 3,380               | 956                  | 417,4               | 823                          | 310,6                           | 629                            | 1,283              | 35,73                           | 0,72                      | 1813                       |
| 3,364               | 952,793              | 415,314             | 825,931                      | 308,538                         | 627,759                        | 1,282              | 35,730                          | 0,720                     | 1814,828                   |
| 0,011               | 2,717                | 1,251               | 3,555                        | 3,828                           | 0,786                          | 0,000              | 0,000                           | 0,000                     | 1,416                      |

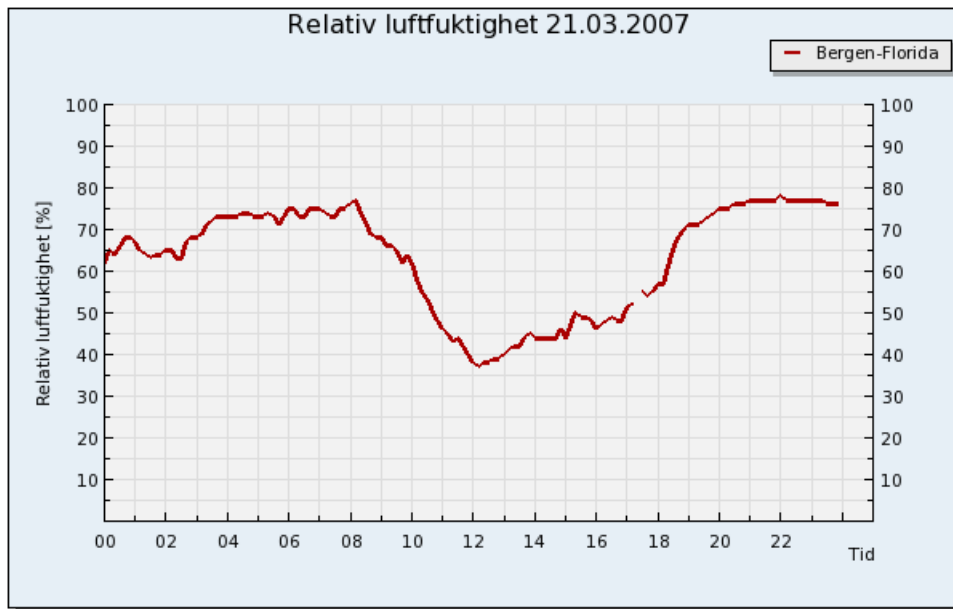
| Kjølev. temp. inn (°C) | Kjølev. temp. ut (°C) | Varmelager (kJ) | Melding T1<br>0=åpen/1=lukket | Melding T2<br>0=åpen/1=lukket | Melding T3<br>0=åpen/1=lukket | Temp. i motorrom (°C) | Midlingstid (s) |        |
|------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--------|
| 80                     | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,93           | 30     |
| 80                     | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 80                     | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,93           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,93           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,93           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39468           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39469           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39469           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39469           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39469           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39470           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,91           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39470           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39471           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,92           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39471           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 21,91           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39471           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,01           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39472           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39472           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,02           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39473           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39474           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39474           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39474           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,03           | 30     |
| 79,9                   | 87,2                  | 39474           | 0                             | 0                             | 1                             | 1                     | 22,04           | 30     |
| 79,914                 | 87,200                | 39470,897       | 0,000                         | 0,000                         | 1,000                         | 1,000                 | 21,972          | 30,000 |
| 0,035                  | 0,000                 | 2,289           | 0,000                         | 0,000                         | 0,000                         | 0,000                 | 0,053           | 0,000  |

# Tillegg I

## Omgivelser 21.03.2007

Hentet fra Geofysisk Institutts nettsider [65].





## **Tillegg J**

### **VBA-kode stempelmotormodell**

Module2 - 1

```
Sub Knapp2_Klikk()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
'=====
'Inndata Motor
'=====
'Henter omdreiningshastighet fra inputboks (1/min)
Dim RPM As Double
RPM = Worksheets("Front").Range("B5")
'Henter slaglengde fra inputboks (m)
Dim S As Double
S = Worksheets("Front").Range("B6")
'Henter boring fra inputboks (m)
Dim B As Double
B = Worksheets("Front").Range("B7")
'Beregner veivstanglengde ut fra slaglengde (m)
Dim L As Double
L = 2 * S
'Henter antall sylindere fra inputboks (-)
Dim N_cyl As Double
N_cyl = Worksheets("Front").Range("B8")
'Antall omdreininger per kraftslag(2 for 4-takt og 1 for 2-takt)
Dim N_r As Double
N_r = 2
'N_r = 1
'Henter kompresjonsforhold fra inputboks (-)
Dim R_komp As Double
R_komp = Worksheets("Front").Range("B9")
'Beregner slagvolum fra slaglengde og boring (m^3)
Dim V_s As Double
V_s = S * 3.14 * 0.25 * B ^ 2
'=====
'Inndata Forbrenning
'=====
'Henter tenningstidspunkt i veivvinkeler før TDC fra inputboks og
'regner om til veivvinkler etter BDC i kraftslaget (°VV etter BDC)
Dim theta_0(0, 3) As Double
theta_0(0, 0) = 180 - Worksheets("Front").Range("C11")
theta_0(0, 1) = 180 - Worksheets("Front").Range("D11")
theta_0(0, 2) = 180 - Worksheets("Front").Range("E11")
theta_0(0, 3) = 180 - Worksheets("Front").Range("F11")
'Henter forbrenningsperiode fra inputboks (°VV etter BDC)
Dim theta_d(0, 3) As Double
theta_d(0, 0) = Worksheets("Front").Range("C12")
theta_d(0, 1) = Worksheets("Front").Range("D12")
theta_d(0, 2) = Worksheets("Front").Range("E12")
theta_d(0, 3) = Worksheets("Front").Range("F12")
'Regner ut tidspunkt for forbrenningsslutt (°VV etter BDC)
Dim theta_f(0, 3) As Double
For j = 0 To 3
    theta_f(0, j) = theta_0(0, j) + theta_d(0, j)
Next j
'Parameter i Wiebe-funksjonen. Velges får å tilpasse S-kurven til
'forbrenningsperioden theta_d (-)
Dim awie As Double
awie = 5
'Parameter i Wiebe-funksjonen. Som oftest lik 2 for SI-motorer (-)
Dim wexp As Double
wexp = 2
'Forbrenningseffektiviteten. Beregnet ut fra uforbrukt kjemisk energi i
'eksosgassene. (-)
Dim eta_comb As Double
eta_comb = Worksheets("Front").Range("B32")
'=====
'Inndata Ventiler
'=====
'Stensing av innsugsventilen (°VV etter BDC)
Dim IVC(0, 3) As Double
IVC(0, 0) = Worksheets("Front").Range("C14")
IVC(0, 1) = Worksheets("Front").Range("D14")
IVC(0, 2) = Worksheets("Front").Range("E14")
IVC(0, 3) = Worksheets("Front").Range("F14")
'Åpning av eksosventilen (°VV etter BDC)
Dim EVO(0, 3) As Double
EVO(0, 0) = Worksheets("Front").Range("C15")
EVO(0, 1) = Worksheets("Front").Range("D15")
EVO(0, 2) = Worksheets("Front").Range("E15")
```

```

EVO(0, 3) = Worksheets("Front").Range("F15")
'=====
'inndata brennstoff
'=====
'Definerer støkiometrisk luft-brenstofforhold (kg/kg)
Dim AF_ratio_stoch As Double
AF_ratio_stoch = Worksheets("Naturgass").Range("B34")
'Definerer støkiometrisk luft-brenstofforhold (kmol/kmol)
Dim AF_ratio_mol_stoch As Double
AF_ratio_mol_stoch = Worksheets("Naturgass").Range("B33")
'Definerer lavere brennverdi for brennstoff (J/kg)
Dim LHV As Double
LHV = Worksheets("Naturgass").Range("B21") * 10 ^ 6
Dim lambda(0, 3) As Double
lambda(0, 0) = Worksheets("Måleresultater").Range("AB41")
lambda(0, 1) = Worksheets("Måleresultater").Range("AB79")
lambda(0, 2) = Worksheets("Måleresultater").Range("AB115")
lambda(0, 3) = Worksheets("Måleresultater").Range("AB152")
'Beregner faktisk luft-brennstofforhold (kg/kg)
Dim AF_ratio_faktisk(0, 3) As Double
For j = 0 To 3
    AF_ratio_faktisk(0, j) = lambda(0, j) * AF_ratio_stoch
Next j
'=====
'Atmosfæriske inndata
'=====
'Henter atmosfæretrykk fra inputboks (Pa)
Dim P_atm As Double
P_atm = Worksheets("Front").Range("B18")
'Henter atmosfæretemperatur fra inputboks Celsius og omregner til
'Kelvin(K)
Dim T_atm(0, 3) As Double
T_atm(0, 0) = Worksheets("Måleresultater").Range("AL41") + 273.15
T_atm(0, 1) = Worksheets("Måleresultater").Range("AL79") + 273.15
T_atm(0, 2) = Worksheets("Måleresultater").Range("AL115") + 273.15
T_atm(0, 3) = Worksheets("Måleresultater").Range("AL152") + 273.15
'Definere innsugstrykk ved BDC (Pa)
Dim P_BDC As Double
P_BDC = P_atm
'Definerer gasskonstantet for luft (J/kgK)
Dim R_air As Double
R_air = 287

'Henter sylinderveggtemperatur fra inputboks i Celsius og omregner til
'Kelvin (K)
Dim T_w(0, 3) As Double
T_w(0, 0) = Worksheets("Front").Range("C13") + 273.15
T_w(0, 1) = Worksheets("Front").Range("D13") + 273.15
T_w(0, 2) = Worksheets("Front").Range("E13") + 273.15
T_w(0, 3) = Worksheets("Front").Range("F13") + 273.15
'=====
'Måledata
'=====
'Henter målt brennstofforbruk fra inpuboks (kg/s)
Dim m_g(0, 3) As Double
m_g(0, 0) = Worksheets("Måleresultater").Range("D41") / 1000
m_g(0, 1) = Worksheets("Måleresultater").Range("D79") / 1000
m_g(0, 2) = Worksheets("Måleresultater").Range("D115") / 1000
m_g(0, 3) = Worksheets("Måleresultater").Range("D152") / 1000

'Henter målt elektrisk effekt fra inputboks (kW)
Dim W_dot_el_m(0, 3) As Double
W_dot_el_m(0, 0) = Worksheets("Måleresultater").Range("L41")
W_dot_el_m(0, 1) = Worksheets("Måleresultater").Range("L79")
W_dot_el_m(0, 2) = Worksheets("Måleresultater").Range("L115")
W_dot_el_m(0, 3) = Worksheets("Måleresultater").Range("L152")
'Henter målt eksosgastemperatur fra inputboks (eksosrør ut fra kraft-
'enheten) i Celsius og omregner til Kelvin (K)
Dim T_e_5_m(0, 0 To 3) As Double
T_e_5_m(0, 0) = Worksheets("Måleresultater").Range("B9") + 273.15
T_e_5_m(0, 1) = Worksheets("Måleresultater").Range("B46") + 273.15
T_e_5_m(0, 2) = Worksheets("Måleresultater").Range("B83") + 273.15
T_e_5_m(0, 3) = Worksheets("Måleresultater").Range("B120") + 273.15
'Henter spesifikk varmekapasitet for luft fra inputboks (kJ/kgK)
Dim cp_l As Double
cp_l = Worksheets("Luft").Range("F26")
'Henter spesifikk varmekapasitet for eksos fra inputboks (kJ/kgK)

```



```

Dim cp_e(0, 3) As Double
cp_e(0, 0) = Worksheets("Eksosgass").Range("E21")
cp_e(0, 1) = Worksheets("Eksosgass").Range("E43")
cp_e(0, 2) = Worksheets("Eksosgass").Range("E65")
cp_e(0, 3) = Worksheets("Eksosgass").Range("E87")
'=====
'Beregninger motorgeometri
'=====
'Beregner klaringsvolum (m^3)
Dim V_min As Double
V_min = V_s / (R_komp - 1)
'Beregner totalt sylindervolum (m^3)
Dim V_max As Double
V_max = V_min + V_s
'Beregner motorens vinkelhastighet (rad/s)
'omega = RPM*2*3.14/60;
'Omregner motorens omdreiningshastighet fra (rev/min) til (rev/s)
Dim N As Double
N = RPM / 60
'Beregner gjennomsnittlig stempelhastighet (m/s)
Dim S_bar_p As Double
S_bar_p = 2 * S * N
'=====
'initiell pre-fordeling av matriser for å slippe 're-sizing' av matrise
'etter hver loop.
'=====
'Polynom brukt til å beregne varmekapasitetsforholdet 'gamma' som funksjon
'av omdreiningshastigheten 'RPM'
'=====
Dim A_1 As Double
A_1 = 0.692
Dim A_2 As Double
A_2 = 0.00003917
Dim a_3 As Double
a_3 = 0.0000000529
Dim a_4 As Double
a_4 = -0.00000000022862
Dim a_5 As Double
a_5 = 2.7758E-15
Dim b_0 As Double
b_0 = 3049.33
Dim b_i As Double
b_1 = -0.057
Dim b_2 As Double
b_2 = -0.000095
Dim b_3 As Double
b_3 = 0.00000002153
Dim b_4 As Double
b_4 = -2.0026E-12
Dim c_u As Double
c_u = 2.32584
Dim c_r As Double
c_r = 0.004186
Dim d_0 As Double
d_0 = 10.41066
Dim d_1 As Double
d_1 = 7.85125
Dim d_3 As Double
d_3 = -3.71257
Dim e_0 As Double
e_0 = -15001
Dim e_1 As Double
e_1 = -15838
Dim e_3 As Double
e_3 = 9613
Dim f_0 As Double
f_0 = -0.10329
Dim f_1 As Double
f_1 = -0.38656
Dim f_3 As Double
f_3 = 0.154226
Dim f_4 As Double
f_4 = -14.763
Dim f_5 As Double
f_5 = 118.27
Dim f_6 As Double

```

```
f_6 = 14.503
Dim r_0 As Double
r_0 = -0.2977
Dim r_1 As Double
r_1 = 11.98
Dim r_2 As Double
r_2 = -25442
Dim r_3 As Double
r_3 = -0.4354
```

```
'=====
'Omregning av gasskonstanten fra (J/kgK) til (KJ/kgK)
Dim R As Double
R = R_air / 1000
'Definerer innløpstemperaturen som atmosfæretemperaturen (K)
Dim T_BDC(0, 3) As Double
T_BDC(0, 0) = T_atm(0, 0)
T_BDC(0, 1) = T_atm(0, 1)
T_BDC(0, 2) = T_atm(0, 2)
T_BDC(0, 3) = T_atm(0, 3)
'Beregner brennstoffmassen i sylindere under kraftslaget (kg)
Dim m_f(0, 3) As Double
For j = 0 To 3
    m_f(0, j) = m_g(0, j) / (2 * N)
Next j
'Beregner luftmassen i sylindere under kraftslaget (kg)
Dim m_a(0, 3) As Double
For j = 0 To 3
    m_a(0, j) = m_f(0, j) * AF_ratio_faktisk(0, j)
Next j
'Beregner den totale massen i sylindere under kraftslaget (kg)
Dim m_c(0, 3) As Double
For j = 0 To 3
    m_c(0, j) = m_a(0, j) + m_f(0, j)
Next j
'=====
'Spesifiserer initialbetingelser for 'loop'ene
'DV,DX,etc. er relative til forandring i Theta (dvs DV/Dtheta)
'=====
'Definerer veivinkelen theta
Dim theta(360) As Double
theta(0) = 1
'Pre-fordelt volum 'array'
Dim V(360) As Double
'Initialvolum ved BDC (m^3)
V(0) = V_max
'Pre-fordelt forandring i volum 'array'
Dim DV(360) As Double
'Spesifiserer initial forandring i volum ved BDC (m^3)
DV(0) = 0
'Pre-fordeler trykk 'array'
Dim P(360, 3) As Double
For i = 0 To 360
    For j = 0 To 3
        P(i, j) = P_BDC
    Next j
Next i
'Spesifiserer initial forandring i trykk
Dim DP(360, 3) As Double
'Pre-fordeling av 'motoring'-trykk 'array'
Dim P_M(360, 3) As Double
For i = 0 To 360
    For j = 0 To 3
        P_M(i, j) = P_BDC
    Next j
Next i
'spesifiserer initial forandring i 'motoring'-trykk
Dim DP_M(360, 3) As Double
'Prefordeler temperatur uforbrent sone som array
Dim T_u(360, 3) As Double
T_u(0, 0) = T_BDC(0, 0)
T_u(0, 1) = T_BDC(0, 1)
T_u(0, 2) = T_BDC(0, 2)
T_u(0, 3) = T_BDC(0, 3)
'Pre-fordeling temperatur 'array'
Dim T(360, 3) As Double
'Spesifiserer initial temperatur i sylindere (K)
```

```

T(0, 0) = T_BDC(0, 0)
T(0, 1) = T_BDC(0, 1)
T(0, 2) = T_BDC(0, 2)
T(0, 3) = T_BDC(0, 3)
'Pre-fordeler initial forandring i temperatur
Dim DT(360, 3) As Double
'Prefordeler temperaturforandring uforbrent sone som array
Dim DT_u(360, 3) As Double
'prefordeler gamma uforbrent som array
Dim gamma(360, 3) As Double
Dim gamma_u(360, 3) As Double
gamma(0, 0) = 1.4
gamma(0, 1) = 1.4
gamma(0, 2) = 1.4
gamma(0, 3) = 1.4
gamma_u(0, 0) = 1.4
gamma_u(0, 1) = 1.4
gamma_u(0, 2) = 1.4
gamma_u(0, 3) = 1.4
'Pre-fordeler massefraksjon forbrent 'array'
Dim X(360, 3) As Double
'Pre-fordeler forandring i massefraksjon forbrent
Dim DX(360, 3) As Double
'Pre-fordeler varmegfrigivelse
Dim DQ(360, 3) As Double
'Pre-fordeler varme 'array'
Dim Q(360, 3) As Double
'Pre-fordeler masse i forbrenningsrom 'array'
Dim m_x(360, 3) As Double
'Prefordeler idealgass tetthet 'array'
Dim rho(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for tetthet (kg/m^3)
rho(0, 0) = P(0, 0) / (R_air * T(0, 0))
rho(0, 1) = P(0, 1) / (R_air * T(0, 1))
rho(0, 2) = P(0, 2) / (R_air * T(0, 2))
rho(0, 3) = P(0, 3) / (R_air * T(0, 3))
'Pre-fordeler viskositet 'array'
Dim mu(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for viskositet
mu(0, 0) = 7.457 * 10 ^ (-6) + 4.1547 * 10 ^ (-8) * T_BDC(0, 0) ^ (2)
mu(0, 1) = 7.457 * 10 ^ (-6) + 4.1547 * 10 ^ (-8) * T_BDC(0, 1) ^ (2)
mu(0, 2) = 7.457 * 10 ^ (-6) + 4.1547 * 10 ^ (-8) * T_BDC(0, 2) ^ (2)
mu(0, 3) = 7.457 * 10 ^ (-6) + 4.1547 * 10 ^ (-8) * T_BDC(0, 3) ^ (2)

'Pre-fordeler termisk ledningsevne 'array'
Dim C_k(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for termisk ledningsevne
C_k(0, 0) = 0.0061944 + 0.000073814 * T_BDC(0, 0) -
- 0.000000012491 * T_BDC(0, 0) ^ (2)
C_k(0, 1) = 0.0061944 + 0.000073814 * T_BDC(0, 1) -
- 0.000000012491 * T_BDC(0, 1) ^ (2)
C_k(0, 2) = 0.0061944 + 0.000073814 * T_BDC(0, 2) -
- 0.000000012491 * T_BDC(0, 2) ^ (2)
C_k(0, 3) = 0.0061944 + 0.000073814 * T_BDC(0, 3) -
- 0.000000012491 * T_BDC(0, 3) ^ (2)
'Pre-fordeler strålingskoeffisient 'array'
Dim C_s(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for strålingskoeffisient
C_s(0, 0) = 0.00000000425 * ((T_BDC(0, 0) ^ 4 -
- T_w(0, 0) ^ 4) / (T_BDC(0, 0) - T_w(0, 0)))
C_s(0, 1) = 0.00000000425 * ((T_BDC(0, 1) ^ 4 -
- T_w(0, 1) ^ 4) / (T_BDC(0, 1) - T_w(0, 1)))
C_s(0, 2) = 0.00000000425 * ((T_BDC(0, 2) ^ 4 -
- T_w(0, 2) ^ 4) / (T_BDC(0, 2) - T_w(0, 2)))
C_s(0, 3) = 0.00000000425 * ((T_BDC(0, 3) ^ 4 -
- T_w(0, 3) ^ 4) / (T_BDC(0, 3) - T_w(0, 3)))
'Pre-fordeler Reynoldstall 'array'
Dim Re(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialerdi for Re
Re(0, 0) = rho(0, 0) * S_bar_p * B / mu(0, 0)
Re(0, 1) = rho(0, 1) * S_bar_p * B / mu(0, 1)
Re(0, 2) = rho(0, 2) * S_bar_p * B / mu(0, 2)
Re(0, 3) = rho(0, 3) * S_bar_p * B / mu(0, 3)

```

```

'Pre-fordeler Nusselt tall 'array'
Dim Nus(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for Nu
Nus(0, 0) = 0.49 * Re(0, 0) ^ (0.7)
Nus(0, 1) = 0.49 * Re(0, 1) ^ (0.7)
Nus(0, 2) = 0.49 * Re(0, 2) ^ (0.7)
Nus(0, 3) = 0.49 * Re(0, 3) ^ (0.7)
'Pre-fordeler varmeovergangskoeffisient 'array'
Dim h_g(360, 3) As Double
'Spesifiserer initialverdi for varmeoverg.koeff.
h_g(0, 0) = C_k(0, 0) * Nus(0, 0) / B
h_g(0, 1) = C_k(0, 0) * Nus(0, 1) / B
h_g(0, 2) = C_k(0, 0) * Nus(0, 2) / B
h_g(0, 3) = C_k(0, 0) * Nus(0, 3) / B
'Spesifiserer initialverdi for avstad TDC-stempel
Dim y(360) As Double
y(0) = S / 2 - L + (S / 2) * Cos(theta(0) * 3.14 / 180) _
+ ((L ^ 2 - ((S / 2) ^ 2) _
* Sin(theta(0) * 3.14 / 180) ^ 2)) ^ 0.5
'Pre-fordeler arbeid 'array'
Dim W(360, 3) As Double
'Pre-fordeler kraft 'array'
Dim W_dot(360, 3) As Double
'Pre-fordeler varmeovergang 'array'
Dim Q_dot(360, 3) As Double
'Pre-fordeler varmeovergang til sylindervegg 'array'
Dim Q_dot_w(360, 3) As Double
'Pre-fordeler indre energi 'array'
Dim u(360, 3) As Double
'Pre-fordeler forandring i indre energi 'array'
Dim du(360, 3) As Double
'Pre-fordeler spesifikk varmekapasitet 'array'
Dim cv(360, 3) As Double
'Pre-fordeler konvektivt varmetap 'array'
Dim DQ_w(360, 3) As Double
Dim Q_w(360, 3) As Double
'DQ_w2(1:360)=zeros; 'Pre-fordeler konvektivt varmetap to-sone 'array'
'Preallocate mass burned 'array'
Dim m_b(360, 3) As Double
'prefordeler uforbrent masse som array
Dim m_u(360, 3) As Double
For i = 0 To 360
  For j = 0 To 3
    m_u(i, j) = m_c(0, j)
  Next j
Next i
'Prefordeler uforbrent volume som array
Dim V_u(360, 3) As Double
V_u(0, 0) = V(0)
V_u(0, 1) = V(0)
V_u(0, 2) = V(0)
V_u(0, 3) = V(0)
Dim V_b(360, 3) As Double
Dim T_b(360, 3) As Double
Dim A_b(360, 3) As Double
Dim A_u(360, 3) As Double
Dim a(360) As Double
a(0) = (3.14 * B ^ 2) / 2 + 3.14 * B * y(0)

'=====
'=====
For j = 0 To 3
For i = 1 To 360
'=====
'Spesifiserer definerer veivvinkel.
theta(i) = i + 1
'Spesifiserer stempelets avstand til TDC (m)
y(i) = S / 2 - L + (S / 2) * Cos(theta(i) * 3.14 / 180) + ((L ^ 2 - _
((S / 2) ^ 2) * Sin(theta(i) * 3.14 / 180) ^ 2)) ^ 0.5
'Spesifiserer volum som funksjon av veivvinkel (m^3)
V(i) = V_min + ((3.14 / 4) * B ^ 2) * y(i)
'Spesifiserer forandring i volum som funksjon av veivvinkel

```

```

DV(i) = V(i) - V(i - 1)
'=====
'Beregner tetthet som funksjon av veivinkel (kg/m^3)
rho(i, j) = P(i - 1, j) / (R_air * T(i - 1, j))
'Beregner viskositet som funksjon av sylindertemperatur
mu(i, j) = 0.000007457 + 0.000000041547 * T(i - 1, j) - 7.4793E-12 _
* T(i - 1, j) ^ (2)
'Beregner momentant varmeledningsevne i sylinder
C_k(i, j) = 0.0061944 + 0.000073814 * T(i - 1, j) - 0.000000012491 _
* T(i - 1, j) ^ (2)
'Beregner momentan strålecoeffisient i sylinder
C_s(i, j) = 0.00000000425 * ((T(i - 1, j) ^ 4 - T_w(0, j) ^ 4) _
/ (T(i - 1, j) - T_w(0, j)))
'Beregner momentant varmeledningsareal.
a(i) = (3.14 * B ^ 2) / 2 + 3.14 * B * y(i)
If i <= 2 Then
    A_u(i, j) = a(i)
End If

'=====
'WIEBE FUNKSJONEN
'Spesifiserer massefraksojn forbrent som en funksjon av veivinkel
'Spesifiserer også masse brennstoff i forbrenningskammeret som funksjon
'av theta:
'=====
If theta(i) < theta_0(0, j) Then
    X(i, j) = 0
Else
    X(i, j) = 1 - Exp(-awie * ((theta(i) - theta_0(0, j)) _
/ theta_d(0, j)) ^ (wexp + 1))
    If theta(i) < theta_f(0, j) Then
        m_x(i, j) = (m_g(0, j)) / (2 * N)
    End If
End If
'Spesifiserer forandring i massefraksjon forbrent som funksjon av
'veivinkel
DX(i, j) = X(i, j) - X(i - 1, j)
'=====
'ANNANDS METODE FOR BEREGNING AV VARMEOVERGANG I SYLINDER
'Spesifiserer varmeovergang mellom sylindergassen og sylindervegg
'=====
'Beregner Reynoldstall som funksjon av veivinkel
Re(i, j) = rho(i, j) * S_bar_p * B / mu(i, j)
'Beregner Nusstellttall som funksjon av vivinkel
'(Konstant=.26 for 2-takt, .49 for 4-takt)
Nus(i, j) = 0.49 * Re(i, j) ^ (0.7)
'Beregner varmeovergangskoeffisient ved Annands metode
h_g(i, j) = C_k(i, j) * Nus(i, j) / B
'Beregner konvektive varmetap i sylinder som funksjon av veivinkel
DQ_w(i, j) = (h_g(i, j) + C_s(i, j)) * a(i) * (T(i - 1, j) - T_w(0, j)) _
* (60 / (360 * RPM))
'=====
'VARMEUTVIKLING I SYLINDER
'=====
Q_w(i, j) = Q_w(i - 1, j) + DQ_w(i, j)
'Beregner forandring i varme totalt som funksjon av veivinkel
DQ(i, j) = eta_comb * LHV * m_x(i, j) * DX(i, j) - DQ_w(i, j)
'Beregner netto varmetilførsel
Q(i, j) = Q(i - 1, j) + DQ(i, j)
'=====
'BEREGNING AV TRYKK- OG TEMPERATURØKNING MELLOM IVO OG EVC
'=====
If theta(i) > IVC(0, j) Then
    DT(i, j) = T(i - 1, j) * (gamma(i - 1, j) - 1) * ((1 / (P(i - 1, j) _
* V(i - 1))) _
* DQ(i, j) - (1 / V(i - 1)) * DV(i))
    DP(i, j) = (-P(i - 1, j) / V(i - 1)) * DV(i) + (P(i - 1, j) _
/ T(i - 1, j)) * DT(i, j)
    P(i, j) = P(i - 1, j) + DP(i, j)
End If
If theta(i) > EVO(0, j) Then
    P(i, j) = P_atm
End If
If theta(i) > 200 Then
    If P(i, j) <= P_atm Then
        P(i, j) = P_atm
    End If

```

```

End If
'=====
'Spesifiserer 'motoring'-trykk som funksjon av Veivvinkel
'=====
m_b(i, j) = m_b(i - 1, j) + DX(i, j) * m_c(0, j)
m_u(i, j) = m_u(i - 1, j) - DX(i, j) * m_c(0, j)
If IVC(0, j) < theta(i) Then
    DP_M(i, j) = (-P_M(i - 1, j)) * gamma(i - 1, j) * DV(i) / V(i - 1)
    P_M(i, j) = P_M(i - 1, j) + DP_M(i, j)
End If
If EVO(0, j) < theta(i) Then
    P_M(i, j) = P_atm
End If
If 200 < theta(i) Then
    If P_M(i, j) <= P_atm Then
        P_M(i, j) = P_atm
    End If
End If
'=====
'Beregner forbrent/uforbrent massefraksjoner
m_b(i, j) = m_b(i - 1, j) + DX(i, j) * m_c(0, j)
m_u(i, j) = m_u(i - 1, j) - DX(i, j) * m_c(0, j)
'Beregner forbrent/uforbrent volum
If theta(i) <= theta_0(0, j) Then
    V_u(i, j) = N_cyl * V(i)
End If
If theta(i) > theta_0(0, j) Then
    V_u(i, j) = ((m_u(i, j) * V_u(i - 1, j)) / m_u(i - 1, j)) * (P(i, j) _
    / P(i - 1, j)) ^ (-1 / gamma_u(i - 1, j))
End If
V_b(i, j) = N_cyl * V(i) - V_u(i, j)
If V_b(i, j) < 0 Then
    V_b(i, j) = 0
End If
'Beregner forbrent/uforbrent temperatur
T_u(i, j) = P(i, j) * V_u(i, j) / (m_u(i, j) * R * 1000)
If theta(i) <= theta_0(0, j) + 4 Then
    T_b(i, j) = 0
End If
If theta(i) > theta_0(0, j) + 4 Then
    T_b(i, j) = P(i, j) * V_b(i, j) / (m_b(i, j) * R * 1000)
End If
'Beregner forbrent/uforbrent areal
A_u(i, j) = a(i) * (1 - (X(i, j)) ^ 0.5)
If theta(i) > theta_0(0, j) + 1 Then
    A_b(i, j) = a(i) * (X(i, j) / (X(i, j) ^ 0.5))
Else
    A_b(i, j) = 0
End If
DT_u(i, j) = T_u(i, j) - T_u(i - 1, j)
'=====
'Beregner sylindertemperatur som funksjon av veivvinkel
T(i, j) = T(i - 1, j) + DT(i, j)
'Beregner sylindert arbeid som funksjon av veivvinkel
'Behandler atmosfæretrykk som referansetrykk (J)
W(i, j) = W(i - 1, j) + (P(i, j) - P_atm) * DV(i)
'Beregner mekanisk effekt som funksjon av veivvinkel (kW)
W_dot(i, j) = (N_cyl * W(i, j) * N / N_r) / 1000
'Beregner varmeovergang som funksjon av veivvinkel (kW)
Q_dot_w(i, j) = (N_cyl * Q_w(i, j) * N / N_r) / 1000
'=====
'Oppdaterer gamma ved POLYNOMETODEN utviklet av KRIEGER-BORMAN.
'OBS: nøyaktigheten til denne metoden faller når blandingen blir rikere
'=====
If theta(i) > IVC(0, j) Then
If theta(i) < EVO(0, j) Then
'Beregner faktor "A","B" som funksjon av temperatur
Dim A_t As Double
A_t = A_1 * T(i, j) + A_2 * T(i, j) ^ 2 + a_3 * T(i, j) ^ 3 + a_4 _
* T(i, j) ^ 4 + a_5 * T(i, j) ^ 5
Dim A_tu As Double
A_tu = A_1 * T_u(i, j) + A_2 * T_u(i, j) ^ 2 + a_3 * T_u(i, j) ^ 3 _
+ a_4 * T_u(i, j) ^ 4 + a_5 * T_u(i, j) ^ 5
Dim B_t As Double
B_t = b_0 + b_1 * T(i, j) + b_2 * T(i, j) ^ 2 + b_3 * T(i, j) ^ 3 _
+ b_4 * T(i, j) ^ 4
Dim B_tu As Double

```

```

B_tu = b_0 + b_1 * T_u(i, j) + b_2 * T_u(i, j) ^ 2 + b_3 _
* T_u(i, j) ^ 3 + b_4 * T_u(i, j) ^ 4
'Beregner faktor "D" som funksjon av lambda
Dim D_lambda As Double
D_lambda = d_0 + d_1 * lambda(0, j) ^ (-1) + d_3 * lambda(0, j) ^ (-3)
'Beregner faktor "F" som funksjon av temperatur og lambda
Dim E_TLambda As Double
E_TLambda = (e_0 + e_1 * lambda(0, j) ^ (-1) + e_3 _
* lambda(0, j) ^ (-3)) / T(i, j)
Dim E_TLambdau As Double
E_TLambdau = (e_0 + e_1 * lambda(0, j) ^ (-1) + e_3 _
* lambda(0, j) ^ (-3)) / T_u(i, j)
Dim F_TPLambda As Double
F_TPLambda = (f_0 + f_1 * lambda(0, j) ^ (-1) + f_3 _
* lambda(0, j) ^ (-3) _
+ ((f_4 + f_5 * lambda(0, j) ^ (-1)) / T(i, j))) _
* Log(f_6 * P(i, j))
Dim F_TPLambdau As Double
F_TPLambdau = (f_0 + f_1 * lambda(0, j) ^ (-1) + f_3 _
* lambda(0, j) ^ (-3) _
+ ((f_4 + f_5 * lambda(0, j) ^ (-1)) / T_u(i, j))) _
* Log(f_6 * P(i, j))
'Beregner korreksjonsfaktor for indre energi
Dim u_corr As Double
u_corr = c_u * Exp(D_lambda + E_TLambda + F_TPLambda)
Dim u_corr_u As Double
u_corr_u = c_u * Exp(D_lambda + E_TLambdau + F_TPLambdau)
'Beregner indre energi som funksjon av veivinkel
u(i, j) = A_t - B_t / lambda(0, j) + u_corr
Dim u_u(360, 3) As Double
u_u(i, j) = A_tu - B_tu / lambda(0, j) + u_corr_u
'Beregner forandring i indre energi
du(i, j) = u(i, j) - u(i - 1, j)
Dim du_u(360, 3) As Double
du_u(i, j) = u_u(i, j) - u_u(i - 1, j)
'Beregner spesifikk varmekapasitet som funksjon av veivinkel
cv(i, j) = du(i, j) / DT(i, j)
Dim cv_u(360, 3) As Double
cv_u(i, j) = du_u(i, j) / DT_u(i, j)
'Beregner korreksjonsfaktor for "R"-verdien som funksjon av veivinkel
Dim R_corr As Double
R_corr = c_r * Exp(r_0 * Log(lambda(0, j)) + (r_1 + r_2 / T(i, j) + r_3 _
* Log(f_6 * P(i, j))) / lambda(0, j))
Dim R_corr_u As Double
R_corr_u = c_r * Exp(r_0 * Log(lambda(0, j)) + (r_1 + r_2 / T_u(i - 1, j) _
+ r_3 * Log(f_6 * P(i, j))) / lambda(0, j))
'Beregner faktisk "R"-verdi
R = 0.287 + 0.02 / lambda(0, j) + R_corr
Dim R_u As Double
R_u = 0.287 + 0.02 / lambda(0, j) + R_corr_u
'Beregner faktisk gamma-verdi og returnerer til begynnelsen av koden

gamma_u(i, j) = 1 + R_u / cv_u(i, j)
gamma(i, j) = 1 + R / cv(i, j)
End If
End If
If gamma(i, j) < 1.2 Then
    gamma(i, j) = 1.4
    gamma_u(i, j) = 1.4
End If
If theta(i) >= EVO(0, j) Then
    gamma(i, j) = 1.4
    gamma_u(i, j) = 1.4
End If
'=====
'Beregner eksostemperatur baser på polytropiske relasjoner
'=====
If EVO(0, j) < theta(i) Then
    T(i, j) = T(EVO(0, j), j) * (P_BDC / P(EVO(0, j), j)) _
^ ((gamma(i, j) - 1) / gamma(i, j))
    T_b(i, j) = T_b(EVO(0, j), j) * (P_BDC / P(EVO(0, j), j)) _
^ ((gamma(i, j) - 1) / gamma(i, j))
End If
'=====
'Skriver verdier til regneark
'=====
Worksheets("Motormodell").Range("A1") = "Veivinkel"

```

```

Worksheets("Motormodell").Range("B1") = "Trykk - 13,5"
Worksheets("Motormodell").Range("C1") = "Trykk - 10,5"
Worksheets("Motormodell").Range("D1") = "Trykk - 7,5"
Worksheets("Motormodell").Range("E1") = "Trykk - 4,5"
Worksheets("Motormodell").Range("F1") = "Trykk u/ forbr"
Worksheets("Motormodell").Range("A2") = theta(0)
Worksheets("Motormodell").Range("B2:E2") = P(0, j) * 10 ^ (-5)
Worksheets("Motormodell").Range("F2") = P_M(0, 0) * 10 ^ (-5)
Worksheets("Motormodell").Cells(i + 2, 1).Value = theta(i)
Worksheets("Motormodell").Cells(i + 2, j + 2).Value = P(i, j) * 10 ^ (-5)
Worksheets("Motormodell").Cells(i + 2, 6).Value = P_M(i, 1) * 10 ^ (-5)
Worksheets("Motormodell").Cells(i + 2, j + 7).Value = T(i, j) - 273.15
Worksheets("Motormodell").Range("G2:J2") = T(0, j) - 273.15
Worksheets("Motormodell").Range("G1") = "Temperatur - 13,5"
Worksheets("Motormodell").Range("H1") = "Temperatur - 10,5"
Worksheets("Motormodell").Range("I1") = "Temperatur - 7,5"
Worksheets("Motormodell").Range("J1") = "Temperatur - 4,5"

```

Next i

```

'=====
'MIDDELTRYKK OG VIRKNINGSGRAD
'=====
'Beregner indikert middeltrykk (bar)
Dim imep(0, 3) As Double
imep(0, j) = W_dot(360, j) * 1200 / (V_s * N_cyl * 1000 * RPM)
Worksheets("Front").Range("J4:M4") = imep
'Beregner bremse-spesifikt middeltrykk fra målt effekt (bar)
Dim bmep(0, 3) As Double
bmep(0, j) = (W_dot_el_m(0, j)) * 1200 / (0.9028 * V_s * N_cyl * 1000 * RPM)
Worksheets("Front").Range("J5:M5") = bmep
'Beregner friksjonstap i motor (bar)
Dim fmep(0, 3) As Double
fmep(0, j) = imep(0, j) - bmep(0, j)
Worksheets("Front").Range("J6:M6") = fmep
'Beregner mekanisk virkningsgrad (-)
Dim eta_m(0, 3) As Double
eta_m(0, j) = bmep(0, j) / imep(0, j)
Worksheets("Front").Range("J7:M7") = eta_m
'=====
Dim T_E(0, 3) As Double
T_E(0, j) = T(360, j) - 273.15
Worksheets("Front").Range("J8:M8") = T_E
'=====
'ENERGIBALANSE
'=====
'Massestrøm brennstoff (kg/s)
Dim m_dot_f(0, 3) As Double
m_dot_f(0, j) = m_g(0, j)
'Massestrøm luft (kg/s)
Dim m_dot_a(0, 3) As Double
m_dot_a(0, j) = AF_ratio_faktisk(0, j) * m_g(0, j)
Worksheets("Front").Range("J9:M9") = m_dot_a
'Massestrøm eksos (kg/s)
Dim m_dot_e(0, 3) As Double
m_dot_e(0, j) = m_g(0, j) + m_dot_a(0, j)
'Indikert effekt (kW)
Dim W_dot_indicated(0, 3) As Double
W_dot_indicated(0, j) = W_dot(360, j)
Worksheets("Front").Range("J10:M10") = W_dot_indicated
'Effekt ut på akslingen (kW)
Dim W_dot_m(0, 3) As Double
W_dot_m(0, j) = (W_dot_el_m(0, j)) / 0.9028
Worksheets("Front").Range("J11:M11") = W_dot_m
Worksheets("Front").Range("J12:M12") = W_dot_el_m
'Varmeovergang til motorblokk (kW)
Dim Q_dot_m(0, 3) As Double
Q_dot_m(0, j) = Q_dot_w(360, j)
Worksheets("Front").Range("J15:M15") = Q_dot_m
'Varmeovergang til motoroljen (kW)
Dim Q_dot_o(0, 3) As Double
Q_dot_o(0, j) = W_dot_indicated(0, j) - W_dot_m(0, j)
Worksheets("Front").Range("J14:M14") = Q_dot_o
'Varmeovergang til kjølevann fra generator (kW)
Dim Q_dot_gen(0, 3) As Double
Q_dot_gen(0, j) = ((W_dot_el_m(0, j)) / 0.9028) * (1 - 0.9028)
Worksheets("Front").Range("J13:M13") = Q_dot_gen
'Entalpi medfølgende eksos (ut fra sylinder) (kW)

```



```
Dim H_dot_e(0, 3) As Double
H_dot_e(0, j) = m_g(0, j) * LHV / 1000 - W_dot_m(0, j) _
- Q_dot_m(0, j) - Q_dot_o(0, j)
'Varmetap fra kraftenhet ved konveksjon og stråling (kW)
Dim Q_dot_tap(0, 3) As Double
Q_dot_tap(0, j) = 0.02 * m_g(0, j) * LHV / 1000
Worksheets("Front").Range("J16:M16") = Q_dot_tap
Next j
End Sub
```