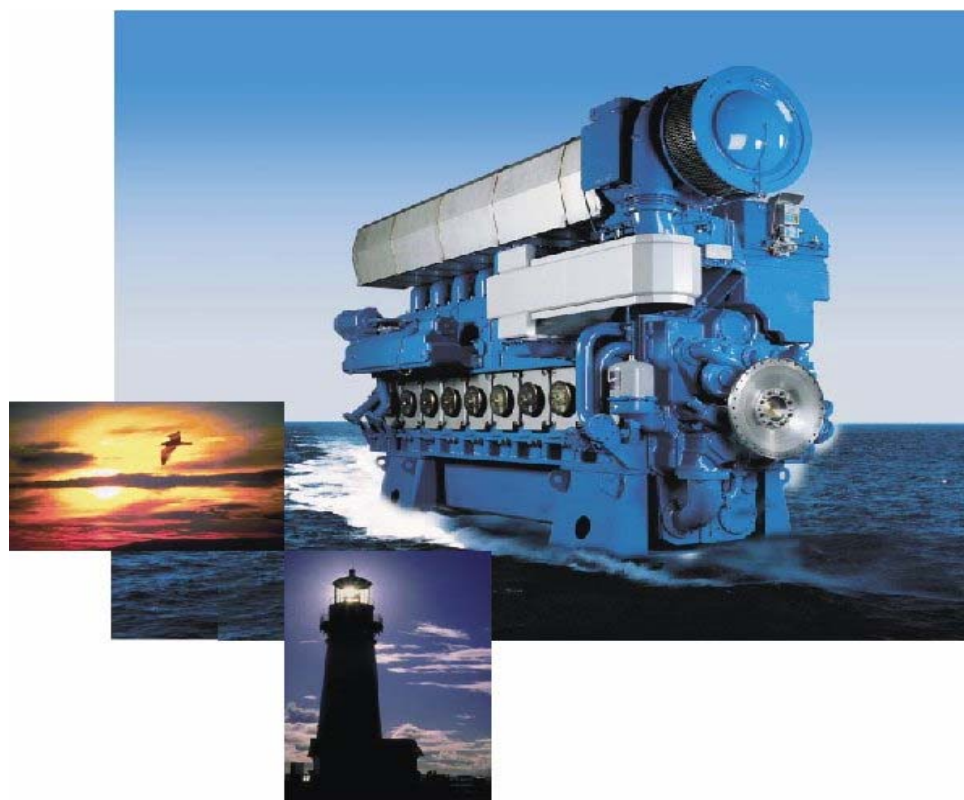




MULTIFUELFORBRENNING I STORE SKIPSMASKINER



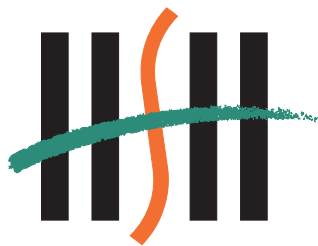
Hovedprosjekt utført ved Høgskolen Stord/Haugesund - Avd. for ingeniørfag

Studieretning: Maskin

Av : Runar Økland
Jan Eirik Tveit

Haugesund

2002



Høgskolen Stord/Haugesund
Avdeling for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel		Rapportnummer
Multifuelforbrenning i store skipsmaskiner		
Utført av Runar Økland Jan Eirik Tveit		
Linje Maskin		Studieretning Ingeniør
Gradering Åpen	Innlevert Dato 03.05.2002	Veileder ved HSH Zia Kazemi
Oppdragsgiver Knutsen OAS Shipping		Kontaktperson hos oppdragsgiver Per Lothe

Ekstrakt

Denne rapporten er utarbeidet for å gi vår oppdragsgiver, Knutsen OAS Shipping A/S, en redegjøring for gassmotorer. Oppgaven tar utgangspunkt i aktuelle motortyper, og legger spesielt vekt på de miljøfordeler gassdrift har. For å dokumentere miljøfordelene er det satt opp et avgassregnskap for tungolje- og gassmotorer.

Utslippene av nitrogenoksider, karbonmonoksid, uforbrente hydrokarboner og karbondioksid har ulik drivhuseffekt. Derfor er resultatene fra avgassberegningene gjort om til CO₂ ekvivalenter for å kunne vurdere total påvirkning av klimagassene fra hver motor. I tillegg blir utslipp av svovel, partikler og tungmetaller diskutert for å finne den motor som totalt gir lavest miljøbelastning.

Resultatene viser at gassmotorer gir betydelig lavere belastning på miljøet, både når det gjelder CO₂ ekvivalenter og utslipp av svovel, partikler og tungmetaller.

Da gassmotorer danner en nytenkning innen miljø og fremdrift av skip, vil oppgaven inneholde et eget kapittel som omfatter myndighetenes krav til utslipp og gassmotorinstallasjoner.



Forord

Denne oppgaven er en del av siste året på maskiningeniørstudiet ved Høgskolen Stord/Haugesund, studieretning for prosess og energiteknikk. Rapporten er laget for vår oppdragsgiver, Knutsen OAS Shipping A/S, og inneholder en redegjørelse for tekniske og miljømessige aspekt omkring gassmotorer om bord i skip. Utgangspunktet for oppgaven er et planlagt skip på 44000 dødvekttonn som skal transportere komprimert naturgass. Oppgaven ble valgt ut fra flere mulige prosjekter fordi den virket meget interessant, og danner en nytenkning innen miljø og fremdrift av skip.

Prosjektet bygger hovedsaklig på fagene Forbrenningsteknikk, Masse og energilikevekter, Kjemi og miljø og Teknisk varmelære. Oppgaven har vært krevende og interessant, fordi gassmotorer fortsatt er på prøvestadiet om bord i skip.

Vi vil rette en takk til vår eksterne veileder, Per Lothe, for hans faglige støtte og gode engasjement. Til sist, men ikke minst, vil vi også takke vår interne veileder, Zia Kazemi, som hele tiden har vært en dyktig pådriver og rettleder. Han har i stor grad vært med på å gi oss stort faglige utbytte av arbeidet.

Runar Økland

Jan Eirik Tveit

Haugesund April 2002



Sammendrag

Denne oppgaven er utarbeidet for vår oppdragsgiver Knutsen OAS Shipping A/S, som har planer om å bygge et skip som skal transportere komprimert naturgass. I denne forbindelse ønsker de en redegjørelse for mulige gassmotoralternativer og en dokumentasjon på de miljøfordeler slike motorer har.

I denne oppgaven blir det satt opp et avgassregnskap for de aktuelle motoralternativene basert på et gjennomsnittlig driftsår. Det er lagt spesiell vekt på å gi motorene samme sammenligningsgrunnlag. Resultatene fra avgassberegningene danner grunnlag for en diskusjon der beste motoralternativ blir fremhevet.

Siden myndighetene stiller stadig strengere krav til utslipp og sikkerhet, vil oppgaven inneholde et eget kapittel som tar for seg regelverk for avgasser og krav til gassmotorinstallasjoner.

Resultatene viser at dagens gassmotorer representerer en miljøvennlig drift av skip. Når klimagassene nitrogenoksid (NO_x), karbonmonoksid (CO), uforbrente hydrokarboner (THC) og karbondioksid CO_2 regnes om til CO_2 ekvivalenter, vil den mest miljøvennlige gassmotoren gi en reduksjon på ca 9300 tonn CO_2 ekvivalenter pr. år sammenlignet med tilsvarende tungoljemotor. I tillegg vil det være en betydelig reduksjon i utslipp av svoveldioksider, partikler og metaller.



Forord	1
Sammendrag	2
1 Innledning	5
2 Materialer og metoder	7
2.1 Teori.....	7
2.2 Miljø- og helseskader i avgass.....	7
2.3 Tungolje og gass.....	7
2.4 Avgassberegninger.....	8
2.5 Diskusjon.....	9
2.6 Regelverk for avgassutslipp.....	9
2.7 Klassifisering og sikkerhet.....	9
3 Teori	10
3.1 Dieselmotoren.....	10
3.2 Dual-fuelmotorer.....	12
3.3 Gass-dieselmotorer.....	14
4 Miljø og helseskader i avgass	16
5 Tungoljedrift	19
5.1 Tungoljeanalyse.....	19
5.2 Ostwalddiagram for tungolje.....	20
5.3 Beregninger på avgassen.....	21
5.3.1 Wärtsilä 8L 46 C.....	21
6 Gassdrift	24
6.1 Gassanalyse.....	24
6.2 Ostwalddiagram for naturgass.....	26
6.3 Beregninger på avgassen.....	26
6.3.1 Wartsila 18V 32 DF.....	27
6.3.2 Wartsila 8L 50 DF.....	28
6.3.3 MAN B&W 18V 32/40 DF.....	29
6.3.4 Wärtsilä 8L 46 GD.....	30



7	Diskusjon.....	31
7.1	Luft / brensel forhold.....	31
7.2	Sammenligning.....	32
7.2.1	NO _x -utslipp.....	32
7.2.2	CO-utslipp.....	33
7.2.3	THC-utslipp.....	35
7.2.4	SO ₂ -utslipp.....	36
7.2.5	CO ₂ -utslipp.....	37
7.2.6	Partikler.....	38
7.2.7	Total drivhuseffekt.....	38
7.2.8	Drivstofforbruk.....	39
7.3	Evaluering.....	40
8	Regelverk.....	41
8.1	Regelverk for avgassutslipp.....	41
8.2	Regler for klassifisering og sikkerhet.....	42
9	Konklusjon.....	45
	<u>Referanseliste.....</u>	<u>46</u>
	<u>Vedlegg.....</u>	<u>47</u>



1 Innledning

Bakgrunn

Av økonomiske årsaker drives dagens store skipsmaskiner på tungolje, noe som medfører store utslipp av svoveloksider, nitrogenoksider, aske, sot, partikler og en rekke tungmetaller.

Naturgass er et rent brensel som finnes i store mengder, dette har ført til økt interesse for bruk av dette produktet som brensel i forbrenningsmotorer. Ved denne form for forbrenning vil utslippene av nitrogenoksider, svoveloksider, aske og partikler kunne reduseres betydelig.

Norsk skipsfart har vært og vil fortsatt være pionerer på mange områder. Nå tar de miljøproblematikken på alvor og ser etter løsninger for en mer miljøvennlig drift av skipene. I 1999 ble gassfergen M/V Glutra satt i drift på Mørkysten. To nye supplyskip med fremdriftsmotorer som skal gå på flytende naturgass (LNG), skal være klar for drift i 2003.

Prosjekteringen av disse båtene har vært tidkrevende og har tvunget frem nye regelverk. Det Norske Veritas har utviklet et slikt regelverk for å kunne sertifisere skip med gass som drivstoff. Sjøfartsdirektoratet har pr mars 2002 ute til høring et utkast til forskrift om installasjoner med gassdrevne forbrenningsmotorer på lasteskip.

Den internasjonale sjøfartsorganisasjonen IMO har utviklet regelverk for avgasser fra motorer som er bygget etter januar 2000. Dette setter krav til en global utslippsgrense på 4,5 % svovel for alle marine brenslere. I enkelte kontrollområder vil grensen være på 1,5 % svovelinnhold.

Som en følge av flere store skipshavarier, med tilhørende miljøforurensing, stilles det også strenge krav til skipenes fremdrift og manøvreringsevne. Dette medfører at tekniske systemer om bord må konstrueres slik at de må kunne fungere selv om det oppstår menneskelig eller teknisk svikt.

Knutsen OAS Shipping har planer om å bygge et skip for transportering av naturgass under trykk. Konseptet kalles PNG (Pressurised Natural Gas). Systemet går ut på at gassen blir presset inn i et rørsystem plassert i kassetter om bord i lasterommet. Trykket ligger typisk på 250 bar. På grunn av at fartøyet transporterer naturgass vil det være naturlig å bruke fremdriftsmaskineri som benytter dette drivstoff, i kombinasjon med diesel. I denne forbindelse ønsker Knutsen OAS å få informasjon om denne motordriften og en redegjøring for hvilke fordeler og ulemper det er med gassdrift kontra konvensjonelle drivstoff.



Formål

Formålet med oppgaven er å dokumentere om gassmotorer har vesentlige miljøfordeler, og se på motoralternativer som kan benyttes i Knutsens PNG - skip. Siden skip i denne størrelse normalt blir drevet med tungoljemotorer, vil disse motorene være et naturlig sammenligningsgrunnlag. Da det stilles stadig strengere krav til avgassutslipp og sikker drift av skipene, vil oppgaven gjennomgå de regler som gjelder for gassmotorer.

Avgrensinger

Oppgaven er basert på et fremdriftsmaskineri bestående av gassmotorer som skal benyttes i et gass-elektrisk fremdriftssystem. Hver motor må ha en effekt på ca 8 MW. Oppgaven vil ikke vurdere kostnader på de ulike motoralternativ.

Historikk

Knutsen OAS Shipping har sine røtter helt tilbake til 1896, når selskapets grunnlegger kjøpte sitt første fartøy. Selskapet hadde en stabil utvikling, og på 30 tallet hadde de vokst til å bli det tredje største shippingsselskapet i Norge.

Selskapet var i de første årene engasjert i nordsjøfart og aktiviteter i forbindelse med fiskeri, men ekspanderte snart over til tank og linjefart.

Tidlig på 70-tallet investerte selskapet i tankmarkedet, og når krisen i tankmarkedet kom i slutten av 70-tallet, fikk selskapet økonomiske problemer.

I 1984 forlot Knutsen familien selskapet, og shippingaktivitetene ble reorganisert med nye eiere, som i dag består av Jens Ulltveit Moe og selskapets direktør Trygve Seglem.

Knutsen gruppen ønsker å stå frem med en høy miljøprofil og satser blant annet på å bli ISO 14000 sertifisert

Prosjektering av et skip for transport av naturgass er bare et av flere prosjekter som Knutsen-gruppen arbeider med i dag.



2 Materialer og metoder

Overgang til drift på gass fører til en reduksjon av miljøskadelige avgassutslipp. Med dagens fokusering på miljøvennlig motordrift vil gassmotorer være et av alternativene som motorfabrikanter og redere ønsker å arbeide mer med.

Oppgaven vil prøve å dokumentere miljøfordelene med gassdrift og se på om gassmotorer kan erstatte dagens tungolje- og dieselmotorer. Det vil videre bli fokusert på å finne beste motoralternativ.

2.1 Teori

Ulike motorfabrikanter ble kontaktet for å finne ut hvilken teknologi som benyttes og hvilke motorer som kan leveres. Kravene som stilles til motorene er at de må kunne gå på naturgass som tappes fra skipets last, og de må kunne skifte over til diesel i tilfelle svikt eller stopp i gasstilførselen.

2.2 Miljø- og helseskader i avgass

For å forstå miljøproblematikken som er knyttet til forbrenningsmotorer er det viktig å vite hvilke komponenter avgassen består av og hvilke skadevirkninger de gjør på naturen og menneskene. Komponentene er:

- Nitrogenoksider (NO_x)
- Karbonmonoksid (CO)
- Uforbrente hydrokarboner (THC)
- Svoveloksider (SO_x)
- Karbondioksid (CO_2)
- Partikler som aske og tungmetaller

Kapittel 4 vil inneholde en kort utredning om de enkelte komponentene og hvilke skadevirkninger de har.

2.3 Tungolje og gass

Det finnes flere typer tungoljer, eller fyringsoljer som de også kalles. Når det gjelder naturgass vil sammensetningen variere fra felt til felt. Oppgaven vil derfor ta utgangspunkt i to brenselanalyser, en for tungolje og en for naturgass. Disse brukes ved beregninger og anskaffelse av avgassanalyser fra motorfabrikantene.



Tungolje

Ved bunkring får skipet en godkjent brennstoffanalyse av leverandøren. Oppgaven vil ta utgangspunkt i en tilfeldig valgt brennstoffanalyse som vil danne grunnlaget for videre beregning.

Naturgass

For å få en typisk naturgassammensetning ble Gasnor kontaktet. Gasnor er en leverandør av naturgass i Norge.

2.4 Avgassberegninger

Avgassberegningene er gjort på grunnlag av avgassanalyser oppgitt av motorfabrikantene. Motorfabrikantene følger en standard målemetodikk for avgassutslipp. Denne standarden er ISO 8178. For brenselmålinger er ISO 3046 benyttet. [1]

For å få måledata som kan sammenlignes med andre motorer, omregner standarden måledataene til en referansekonsentrasjon av oksygen i avgassen. For ISO 8178 er denne konsentrasjonen på 5 vol %. Mengden av uforbrente hydrokarboner i avgassen blir angitt som en ekvivalent mengde metan, CH₄. Tilsvarende regnes mengden av nitrogenoksider, NO_x om til en ekvivalent mengde nitrogendioksid, NO₂ og svoveldioksider til en ekvivalent mengde svoveldioksid, SO₂. [1]

For å få en god oversikt over avgassmengdene fra de aktuelle motorene, vil det bli satt opp et avgassregnskap basert på et år. Det vil da bli antatt 200 seilingsdøgn i året med konstant belastning. Disse beregningene vil bli kontrollert mot et beregningsprogram utviklet av det danske selskapet DGC.

Siden de forskjellige motorene yter forskjellig effekter, må en del kriterier oppfylles for å få en mest mulig korrekt sammenligning:

- Avgassregnskapet vil ta utgangspunkt i en effekt som alle motorene kan yte.
- Opplysninger om avgasser må bli oppgitt ved den effekt som blir lagt som basis for beregningene.
- Avgassanalyser for gassmotorene må være basert på samme gass og uten avgasskatalysator.

For å kunne sammenligne de forbrenningstekniske egenskapene til de respektive motorene vil det bli gjort grunnlagsberegninger for både for tungolje og gass ved hjelp av Ostwaldiagram. Motorenes forbrenningstekniske egenskaper vil bli tegnet inn.



2.5 Diskusjon

På grunnlag av det tallmateriale som er fremkommet i avgassberegningene, vil oppgaven kommentere resultatene og prøve å finne svar på eventuelle forskjeller. Ved å regne om effekten til de enkelte klimagassene fra hver motor til en CO₂ ekvivalent, kan man fastlegge den totale miljøbelastning hver motor gir.

2.6 Regelverk for avgassutslipp

En gjennomgang av hvilke regler og forskrifter som gjelder for avgassutslipp fra skipsmaskiner er nødvendig for å iverksette nødvendige tiltak for å hindre at utslippene ikke overstiger kravene. Skip som skal kunne operere i internasjonale farvann, må tilfredsstille de internasjonale krav som den øverste sjøfartsmyndigheten, Internasjonal Maritime Organisation (IMO) fastsetter.

2.7 Klassifisering og sikkerhet

Gassmotorer er ikke utbredt i skip. Det er derfor få rederier som har erfaring på dette området. For at classeselskapene skal kunne godkjenne og sertifisere fremdriftsanlegg som er drevet på naturgass, tvinges det frem nye regelverk.

Klasseselskapet Det Norske Veritas, DNV har nylig utviklet et nytt regelverk for gassmotorer i skip. Dette vil bli gjennomgått for å finne ut hvilke tiltak som må settes i verk for å godkjent et fremdriftsanlegg beregnet på gassdrift.

3 Teori

Oppgavens tittel, multifuelforbrenning, er et begrep som er innført på motorer som kan operere på ulike typer brensler. I denne oppgaven dreier det seg om skipsmotorer som kan operere på både diesel og gass. Det er to hovedprinsipper for motorer som kan operere både på gass og diesel. Begge er en videreutvikling av dieselmotoren.

3.1 Dieselmotoren

Både tungolje - og dieselmotorer arbeider etter dieselprosessen. Motorens arbeidssyklus vil være avhengig av motorens antall arbeidstakter. Dieselmotorer kan enten være 4 – takts motorer, eller 2–taktsmotorer. 2–taktsdieselmotorer vil ikke bli omtalt i denne oppgaven

Figur 1 viser arbeidssyklusen til en 4–taktsdieselmotor. Den består av følgende takter:

Innsug

Innsugningsventilen åpnes og komprimert luft fra turboladeren presses inn i sylindern.

Kompresjon

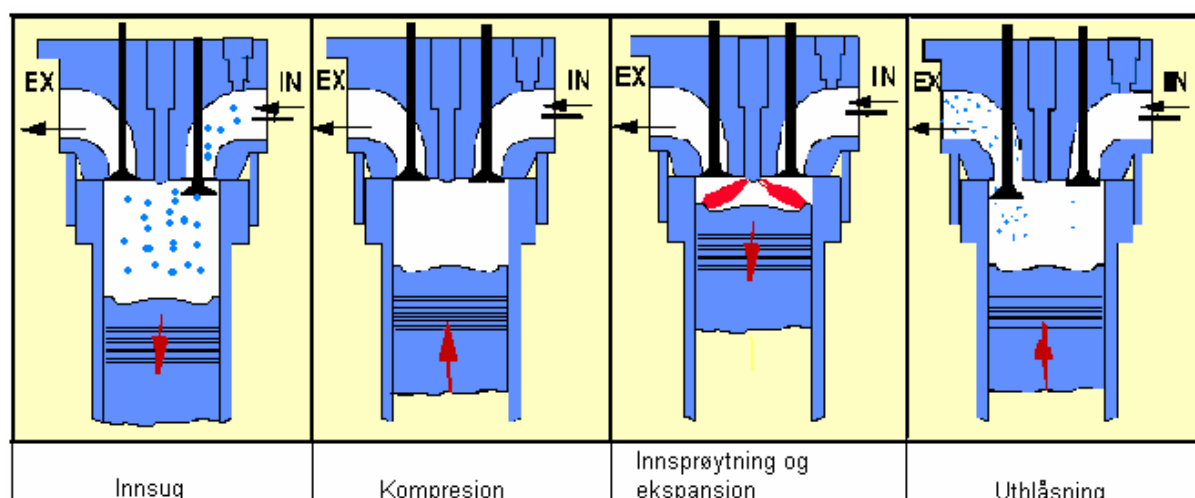
Innsugsventilen stenges og luften blir komprimert.

Innsprøytning/ekspansjon

Like før stampelet er på topp sprøytes tungolje inn gjennom innsprøytningsdysen. På grunn av høy kompresjonstemperatur og høyt trykk antennes luft/brensel blandingen. Trykket og temperatur stiger ytterligere og presser stampelet nedover.

Utblåsning

Eksosventilen åpnes og røykgassen presses ut av stampelet som beveger seg oppover.



Figur 1 Arbeidssyklus for en 4–takts dieselmotor



Tungoljemotorer leveres av en rekke motorfabrikanter. Det vil her bli valgt en 4-takts tungoljemotor fra Wärtsilä for å ha et sammenligningsgrunnlag for gassmotorene.

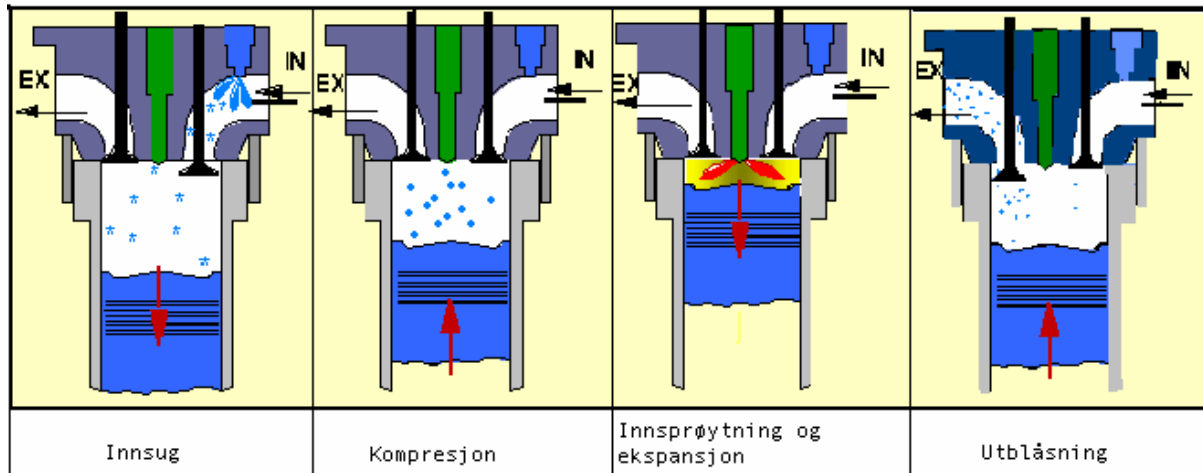
Wärtsilä 8L 46 C 8400 kW

Tekniske data: [1] [4] [11]

Sylinderboring	460 mm
Slaglengde	580 mm
Turtall	500 og 514 rpm
Effektivt middeltrykk	26,1 og 25,4 bar

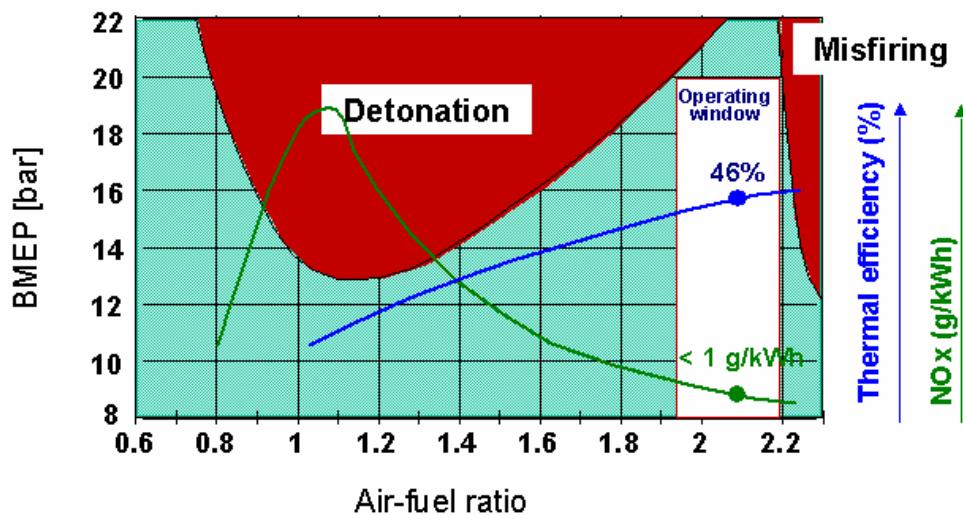
3.2 Dual-fuelmotorer

Dual-fuelmotorer arbeider etter samme prinsipp som en 4-takts dieselmotor. Forskjellen ligger i innsugstakten der gassen blir tilført sammen med innsugningsluften. Dette skjer via en gassventil som er plassert i luftinntaket til motoren. Luft/gassblandingen vil ikke selvantenne på samme måte som dieselolje, derfor må det sprøytes en liten mengde diesel, såkalt pilot-fuel, for å antenne blandingen. Figur 2 viser Dual-fuelmotorens arbeidsprinsipp.



Figur 2 Dual-fuelmotorens arbeidsprinsipp

Et av problemene med gassmotorer er at blandingsforholdet mellom luft og brensel må ligge mellom en øvre og en nedre grense for at den skal forbrenne kontrollert og mest mulig fullstendig. Figur 3 viser sammenhengen mellom effektivt middeltrykk, BMEP, og luft/brensel-forhold i en gassmotor.



Figur 3 Sammenhengen mellom effektivt middeltrykk, BMEP, og luft/brensel-forhold i gassmotorer.



Et lavt luft/brensel-forhold (fet blanding) vil føre til en hurtig forbrenning med tilhørende hurtig trykk stigning og høy varmebelastning, dette fenomenet kalles detonasjon. Detonasjon fører til høy mekanisk belastning på stempel, lagrer og stempelfjører. Den høye varmebelastningen kan føre til nedbrenning av stempelkrone og ventiler. Av figur 3 ser en også at høyt effektivt middeltrykk, BMEP, vil gi større fare for detonasjon. Gassmotorer vil av denne grunn ha lavere effektivt middeltrykk enn tilsvarende dieselmotorer.

Høyt luft/brensel-forhold (mager blanding) vil føre til ufullstendig forbrenning av luft/brensel-blandingen, noe som fører til høye utslippsverdier av karbonmonoksid, CO og uforbrente hydrokarboner, THC. I tillegg går brennstofforbruket opp for å kunne opprettholde samme effekt. Dette fenomenet kalles misfiring. Motorfabrikantene har løst dette reguleringsproblemet ved å regulere luft/gass-forholdet til hver sylinder individuelt. Reguleringen baserer seg på å måle avgassene fra hver sylinder, samt at det er plassert sensorer på hver sylinder som detekterer ukontrollert forbrenning. [1] [4] [16]

De fleste motorleverandører er i utviklingsfasen når det gjelder gassmotorer. Det er derfor pr februar 2002 bare Wärtsilä og MAN B&W som kan levere gassmotorer med effekt opp mot 8 MW.

Wärtsilä 18V 32 DF 6048 kW

Dette er en 18-sylindret V-motor. Motoren er en videreutvikling av den såkalte 32-motoren til Wärtsilä.

Tekniske data: [1] [11]

Sylinderboring	320 mm
Slaglengde	350 mm
Turtall	720 og 750 rpm
Effektivt middeltrykk	20 bar

Wärtsilä 8L 50 DF 7600 kW

Denne motoren har 8-sylindre i rekke. Motoren er spesiallaget for gassdrift.

Tekniske data: [1] [11]

Sylinderboring	500 mm
Slaglengde	580 mm
Turtall	500 og 514 rpm
Effektivt middeltrykk	20 bar

MAN B&W 18V 32/40 DF 7200 kW

Denne motoren er en videreutvikling av en tidligere velprøvd dieselmotor.

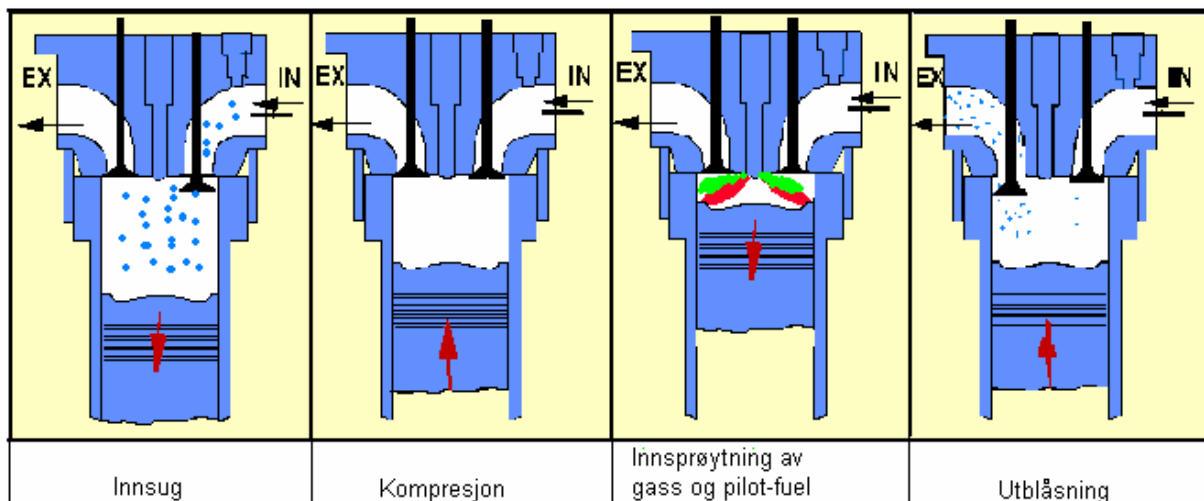
Tekniske data: [1] [12]

Sylinderboring	320 mm
Slaglengde	400 mm
Turtall	720 og 750 rpm
Effektivt middeltrykk	19,9 bar

Alle motorene kan automatisk skifte mellom gass og dieseldrift uten variasjon i effekt og turtall. De bruker også diesel som pilot-fuel for å antenne luft/gassblandingen.

3.3 Gass-dieselmotorer

Gass-dieselmotorer har en arbeidssyklus som er svært lik arbeidssyklusen til en 4-takts dieselmotor. Figur 4 viser arbeidssyklusen til en gass - diesel motor.



Figur 4 Gass - diesel motorens arbeidsprinsipp

Gassen blir her sprøytet inn like før stempelen er i øvre dødpunkt på samme måte som dieselmotoren sprøyter inn diesel. For å antenne luft/gassblandingen må det sprøytes inn en liten mengde diesel, såkalt pilot-fuel. Dette gjøres ved hjelp av en brennstoffdyse som har borer for gass og diesel. Energimengden av pilot-fuel er mindre enn 1% av innsprøytet gassmengde. [4]

For å sprøyte inn gassen må gasstrykket være høyere enn kompresjonstrykket. Gasstrykket ligger på omlag 350 bar. For motorer som må komprimere gassen fra lave trykk kreves det relativt store kompressorer. En komprimering fra 4 bar krever en energimengde som tilsvarer ca 6% av motorens effekt. [4]



Wärtsilä 8L46 GD 7800 kW

Denne motoren kan også automatisk skifte over fra gass til dieseldrift uten variasjoner i effekt.

Tekniske data: [4] [11]

Sylinderboring	460 mm
Turtall	500 og 514 rpm
Effektivt middeltrykk	24,3 og 23,6 bar



4 Miljø og helseskader i avgass

Forbrenningsmotorer slipper ut en rekke stoffer som er skadelige for helse og miljø. Dette kapittel er en oversikt over hvilke stoffer det gjelder og hvilke skadevirkninger de har på helse og miljø. [5] [9]

Nitrogenoksider, NO_x

Nitrogenoksider er kjemiske forbindelser mellom nitrogen og oksygen. NO_x er en fellesbetegnelse på NO og NO₂. Nitrogenoksider dannes ved at oksygen og nitrogen fra forbrenningsluften reagerer med hverandre (Termisk NO_x), eller ved at nitrogen i brenselet reagerer med oksygen i forbrenningsluften (fuel NO_x).

Helseskader:

Nitrogenoksider gir dårlig lungefunksjon, hyppigere luftveissykdommer og forverring av astmaplager.

Miljøskader:

Bidrar til forsuring av jord og vann. Danner sammen med Flyktige organiske komponenter, (VOC) fotokjemiske oksydanter, bla Ozon.

Karbonmonoksid, CO

CO er en giftig, luktfri gass som dannes ved forbrenning. CO oksiderer videre til CO₂ i atmosfæren, men denne reaksjonen er langsom.

Helseskader:

CO binder seg til de røde blodlegemene og hindrer opptak av oksygen i blodet. Lengre tids påvirkning av CO kan gi økt risiko for hjerteinfarkt og større dødelighet hos hjertekrampepasienter.

Uforbrente hydrokarboner, THC

Uforbrente hydrokarboner som metan, CH₄ slipper ut gjennom røykgassen.

Helseskader:

Kan føre til luftveislidelser og gir symptomer som hodepine, svimmelhet og kvalme. De flyktige bestanddelene er kreftfremkallende.

Miljøskader:

Hydrokarboner fører til skade på vegetasjon og øker drivhuseffekten.



Drivhuseffekten:

Solen sender ut kortbølget elektromagnetiske stråler. Noe av denne strålingen treffer skyer eller andre partikler i atmosfæren og blir reflekter tilbake til verdensrommet. En betydelig del av strålingen vil derimot slippe gjennom atmosfæren og bli absorbert av jordoverflaten og omdannes til varme. For å opprettholde varmebalansen må energi avgis. Dette skjer hovedsakelig ved avgivelse av stråling. Denne strålingen er relativt langbølget og blir lettere fanget opp av drivhusgassene. Dette er bla: karbondioksid (CO_2), klorfluorkarboner (KFK) og metan (CH_4). De omtalte gassene har altså evne til delvis å stoppe utgående energitransport, spre strålingen og varme opp den nedre delen av atmosfæren.

Svoveldioksid, SO_2

Svoveldioksider dannes når svovel fra brenselet binder seg til oksygenet i forbrenningsluften. SO_2 blir oksidert i atmosfæren til svovelsyre H_2SO_4 og sulfat SO_4^{2-} . Svovelsyre fører til kraftig korrosjon av materialer.

Helseskader:

SO_2 fører til irritasjon av slimhinnene i luftveiene og større risiko for luftveissykdommer og bronkitt.

Miljøskader:

SO_2 har ført til alvorlige skader på vegetasjon på grunn av sur nedbør.

Karbondioksid, CO_2

CO_2 er sluttproduktet ved forbrenning av fossile brensler.

Helseskader:

CO_2 er ikke giftig, men kan føre til kvelning dersom en oppholder seg i områder med mye CO_2 . Dette fordi CO_2 fortrenger oksygen.

Miljøskader:

CO_2 fører hovedsakelig til drivhuseffekten

Partikler og tungmetaller

Ved tungolje drift inneholder brenselet en rekke partikler som sot og aske i tillegg til tungmetaller.

Helseskader:

Tungmetaller avleirer seg i knoklene som et depot som øker hele livet uten at kroppen skiller de ut igjen. Partikler fører til luftveissykdommer, og det bærer ofte med seg kreftfremkallende stoffer.



Miljøskader:

Partikler og tungmetaller som slippes ut i naturen tas opp i planter som igjen er føde for dyr. Det fører til de samme skadevirkningene på dyr og fugler.

Total drivhuseffekt

For å kunne regne om skadeeffekten til de enkelte aktuelle klimagassene til en CO₂ ekvivalent kan man fastlegge den totale drivhuseffekten fra de enkelte avgasskomponentene.

Ved en slik beregning benyttes følgende sammenhenger (drivhusstyrke pr. kg gass): [2]

CO ₂	=	1
CO	=	4
NO _x	=	17
CH ₄	=	20

Faktorene vil ikke være eksakte, men gir en oversikt over forholdet mellom drivhusstyrken til avgassene.



5 Tungoljedrift

De fleste større skipsmotorer blir i dag drevet av tungolje. Det finnes flere typer tungoljer, da de skilles ut fra kokepunkt i raffineringstårnet. Kvalitet og sammensetning varierer således fra de lettere typene til de meget tyktflytende. Felles for de alle er at de, foruten karbon og hydrogen, inneholder relativt store mengder forurensende komponenter som svovel, aske, nitrogen og tungmetaller. Ved de omgivelsestemperaturer det er om bord i et skip er tungoljene så tyktflytende at det kreves oppvarming av lagertanker, setlings og dagtanker for å gjøre oljen flytende og pumpbar. Dette krever forvarming av oljen helt fra lagertank til motor. Tungolje er i dag (2002) avgiftsbelagt med en CO₂ avgift på 49 øre/l og en svovelavgift på 7 øre/l * 0.25%. [18]

5.1 Tungoljeanalyse

Vedlegg 1 viser en brennstoffanalyse for en typisk tungolje, beregnet på større skipsmaskiner. Denne viser blant annet:

Tetthet v/15°C	kg/m ³	966
Viskositet v/50°C	mm ² /s	359
Vanninnhold	% vol	0,1
<u>Partikler:</u>		
Karbonrest	% masse	11
Sedimenter	% masse	0,01
Aske	% masse	0,04
Totalt:	% masse	11,05
<u>Metaller:</u>		
Vanadium	mg/kg	140
Natrium	mg/kg	29
Aluminium	mg/kg	3
Silikoner	mg/kg	6
Jern	mg/kg	13
Nikkel	mg/kg	37
Kalsium	mg/kg	4
Magnesium	mg/kg	1
Zink	mg/kg	1
Totalt	mg/kg	234
Brennverdi	MJ/kg	40,63

Av de stoffer som deltar i forbrenningen er fordelingen: [15]

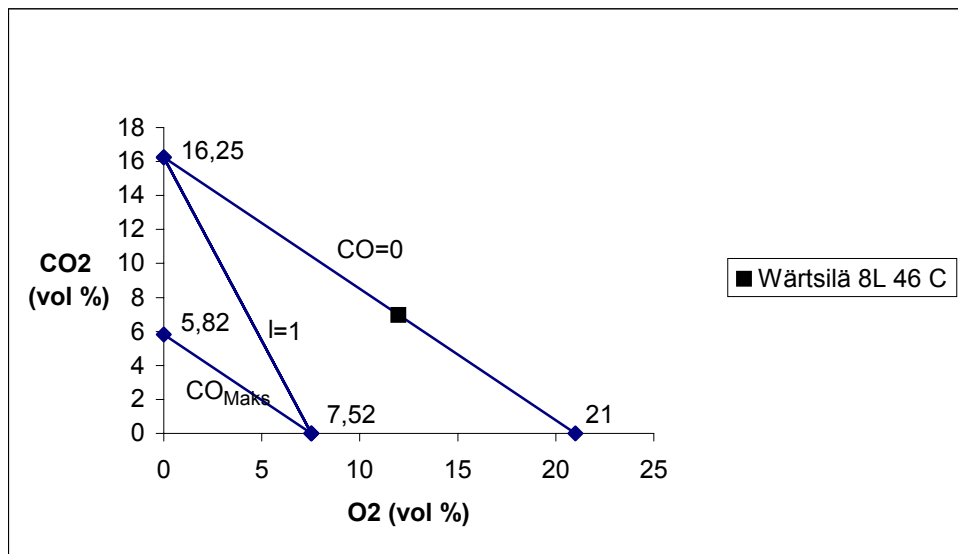
Karboninnhold	87,0 % masse
Hydrogeninnhold	10,3 % masse
Svovelinhold	2,50 % masse
Nitrogen	0,20 % masse

5.2 Ostwalddiagram for tungolje

Ut fra reaksjonsligningen for ufullstendig forbrenning, kan det tegnes opp røykgassdiagram, Ostwalddiagram, for et brensel. Når en har analysert røykgassen og kjenner minst to av de tre størrelsene O_2 , CO_2 eller CO (vol %), kan en få god oversikt over forbrenningsforløpet til en motor.

Figur 5 viser Ostwalddiagrammet som fremkommer på grunnlag av beregninger. [6]

Beregningene er angitt i vedlegg 2. Ostwalddiagrammet viser at CO innholdet i avgassen er lavt og luftoverskuddet høyt.



Figur 5 Ostwalddiagram for tungolje.



5.3 Beregninger på avgassen

5.3.1 Wärtsilä 8L 46 C

Wartsila sin 46 motor 8400 kW kjørt på tungolje med sammensetning:

Karbon	87	masse %
Hydrogen	10,3	masse %
Svovel	2,5	masse %
Nitrogen	0,2	masse %

Forenklet røykgassanalyse, ved 72% belastning (6048 kW), viser følgende: [14]

NO _x (NO ₂)	13	g/kWh
CO	0,4	g/kWh
THC (CH ₄)	0,4	g/kWh
SO ₂	9,5	g/kWh
CO ₂	610	g/kWh

I denne analysen er det bare tatt med stoffer som har blitt dannet under forbrenningen. I tillegg til disse stoffene inneholder tungolje en rekke stoffer og partikler som ikke direkte deltar i forbrenningen, men som allikevel er en del av røykgassen. For å få en fullstendig røykgassanalyse må en se på brenselet som benyttes.

Finner avgassene til motoren ved 72% last:

$$\text{NO}_2: \frac{13 \text{ g}_{\text{NO}_2}/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 377396 \text{ kg}_{\text{NO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO: } \frac{0,4 \text{ g}_{\text{CO}}/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 11612 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{år}$$

$$\text{THC (CH}_4\text{): } \frac{0,4 \text{ g}_{\text{THC}}/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 11612 \text{ kg}_{\text{THC}}/\text{år}$$

$$\text{SO}_2: \frac{9,5 \text{ g}_{\text{SO}_2}/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 275780 \text{ kg}_{\text{SO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO}_2: \frac{610 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{10^6 \text{ g/tonn}} = 17709 \text{ tonn}_{\text{CO}_2}/\text{år}$$



For å finne andre komponenter tilført med brenselet må en finne brennstofforbruket til motoren.

Motoren har et spesifikt brennstofforbruk på 178 g_B/kWh [14]

Brennstofforbruk:

$$\dot{m}_B = \frac{178 \text{ g}_B/\text{kWh} * 8400 \text{ kW} * 0,72}{1000 \text{ g/kg}} = 1076,54 \text{ kg}_B/\text{h} =$$

$$1076,54 \text{ kg}_B/\text{h} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år} = 5167420 \text{ kg}_B/\text{år} = 5167 \text{ tonn/år}$$

På volumbasis: $\frac{5167420 \text{ kg}_B/\text{år}}{966 \text{ kg/m}^3_B} = 5350 \text{ m}^3_B/\text{år}$

På bakgrunn av dette beregnes ikke-reagerende stoffer som vann, partikler og metaller som forlater motoren via røykgassen:

Tilført vann: $\frac{5350 \text{ m}^3_B/\text{år} * 0,1 \text{ vol.\% vann/m}^3_B}{100 \text{ vol.\%}} = 5,35 \text{ m}^3_v/\text{år}$

På massebasis $5,35 \text{ m}^3_v/\text{år} * 966 \text{ kg/m}^3 = 5168 \text{ kg}_v/\text{år}$

Tilført partikler: $\frac{5167420 \text{ kg}_B/\text{år} * 11,05 \text{ vekt \% part./kg}_B}{100 \text{ vekt \% part.}} = 571000 \text{ kg}_p/\text{år}$

Tilført metaller: $\frac{5167420 \text{ kg}_B/\text{d} * 234 \text{ mg/kg}_B}{10^6 \text{ mg}_m/\text{kg}_B} = 1210 \text{ kg}_m/\text{år}$

Total mengde ikke-reagerende stoffer: 577378 kg/år

Massen til karbon, hydrogen, svovel og nitrogen blir da:

Total brennstoffmengde	5167420	kg _B /år
- Ikke-reagerende stoffer	577378	kg/år
=	4590042	kg _B /år

Beregning av avgifter [18]

Tungoljen er avgiftsbelagt med en CO₂ avgift på 49 øre / l og en svovelavgift på 7 øre / l * 0.25 % Svovelinnhold.

Pr. år utgjør CO₂ avgiftene:

$$0,49 \text{ kr/l} \cdot 5350 \text{ m}^3 / \text{d} \cdot 1000 \text{ l/m} = 2621500 \text{ kr/år}$$

Svovel: Tungolje med svovelinnhold på 2,5 % blir avgiftsbelagt med:

$$\frac{2,5 \text{ \%S}}{0,07 \text{ kr/l} \cdot 0,25 \text{ \%S}} = 0,70 \text{ kr/l}$$



Pr. år utgjør svovelavgiftene:

$$0,70 \text{ kr/l} \cdot 5350 \text{ m}^3 / \text{år} \cdot 1000 \text{ l/m}^3 = 3745000 \text{ kr/år}$$

Beregning av CO₂ ekvivalenter

Beregner total drivhuseffekt ved å gjøre avgassene om til CO₂ ekvivalenter. Bruker CO₂ ekvivalentene fra kapittel 4.

NO ₂ Faktor 17	CO Faktor 4	THC Faktor 20	CO ₂ Faktor 1	Antall CO ₂ ekvivalenter
377,4 tonn _{NO₂} /år x 17 tonn _{CO₂} /tonn _{NO₂}	11,6 tonn _{CO} /år x 4 tonn _{CO₂} /tonn _{CO}	11,6 tonn _{THC} /år x 20 tonn _{CO₂} /tonn _{THC}	17709 tonn _{CO₂} /år x 1 tonn _{CO₂} /tonn _{CO₂}	24403 tonn _{CO₂} /år



6 Gassdrift

Naturgass regnes som et rent brensel. Med det menes det at innholdet av forurensende komponenter som svovel og tungmetaller er svært lavt. Naturgass består hovedsakelig av metan, dette er en fargeløs brennbar gass. Den er betydelig lettere enn luft. Blandet med luft er metan svært eksplosiv. Naturgass forbrenner mykere enn diesel, dette medfører at en får lavere maksimaltrykk og temperaturer i sylindere. Det dannes nærmest ikke partikler ved forbrenning av naturgass. De partiklene som er registrert fra gassmotorer relateres til pilot-fuel og smøreolje. Naturgass er i dag (2002) ikke avgiftsbelagt. [18]

6.1 Gassanalyse

Vedlegg 2 viser sammensetningen til en typisk naturgass.

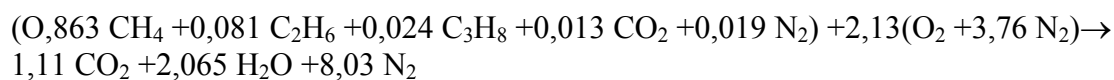
Gassen inneholder:

Metan	CH ₄	= 0,863 vol %
Etan	C ₂ H ₆	= 0,081 vol %
Propan	C ₃ H ₈	= 0,024 vol %
Nitrogen	N ₂	= 0,019 vol %
Karbondioksid	CO ₂	= 0,013 vol %

På bakgrunn av denne sammensetningen kan nedre brennverdi beregnes. [6] Dette gjøres ved å finne differansen mellom entalpien til reaktanter og produkter ved støkiometrisk forbrenning:

Bruker da normaltstand 25°C, 1 atm:

Støkiometrisk ligning fra vedlegg 3.



Beregner nedre brennverdi:

$$\sum_R n_i (h_{fi} + \Delta h_i) - \sum_P n_e (h_{fe} + \Delta h_e) = H_N$$

$$\sum_R n_i (h_{fi} + \Delta h_i) = 0,863 \text{ kmol/kmol}_B * (-74873 + 0) \text{ kJ/kmol} + 0,081 \text{ kmol/kmol}_B * (-84740 + 0) \text{ kJ/kmol} + 0,024 \text{ kmol/kmol}_B * (-103900 + 0) \text{ kJ/kmol} + 0,013 \text{ kmol/kmol}_B * (-373522 + 0) \text{ kJ/kmol} = -78828,73 \text{ kJ/kmol}_B$$



$$\sum_P n_e (h_{fe} + \Delta h_e) = 1,11 \text{ kmol/kmol}_B * (-373522 + 0) \text{ kJ/kmol} + 2,065 \text{ kmol/kmol}_B * (-241826 + 0) \text{ kJ/kmol} = -913980,11 \text{ kJ/kmol}_B$$

$$H_N = -78828,73 \text{ kJ/kmol}_B - (-913980,11 \text{ kJ/kmol}_B) = 835151,38 \text{ kJ/kmol}_B$$

Brennverdi pr. Nm³ (1 kmol_B = 22,69 Nm³):

$$H_N = \frac{835151,38 \text{ kJ / kmol}_B}{22,69 \text{ Nm}^3 / \text{kmol}_B} = 36807,03 \text{ kJ / Nm}^3$$

Beregner molvekt til brenselet:

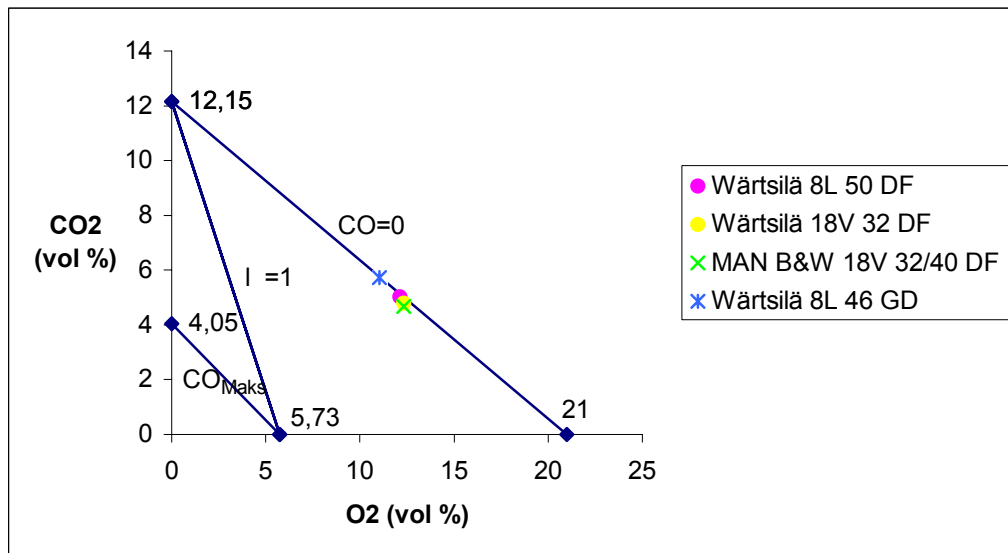
$$MW = 0,863 \text{ kmol/kmol}_B * 16 \text{ kg/kmol} + 0,081 \text{ kmol/kmol}_B * 30,1 \text{ kg/kmol} + 0,024 \text{ kmol/kmol}_B * 44,1 \text{ kg/kmol} + 0,013 \text{ kmol/kmol}_B * 44,0 \text{ kg/kmol} + 0,019 \text{ kmol/kmol}_B * 28 \text{ kg/kmol} = 18,41 \text{ kg/kmol}_B$$

Brennverdi pr. kg brennstoff:

$$H_N = \frac{835151,38 \text{ kJ / kmol}_B}{18,41 \text{ kg / kmol}_B} = 45364,0 \text{ kJ / kg}_B$$

6.2 Ostwalddiagram for naturgass

På samme måte som for tungolje er det beregnet røykgassdiagram, Ostwalddiagram, for naturgass.[6] For beregninger se vedlegg 2. Ostwalddiagrammet viser at gassmotorene arbeider med høy omsetningsgrad og høyt luftoverskudd.



Figur 6 Ostwalddiagram for naturgass

6.3 Beregninger på avgassen

Innenfor prosjektets tidsramme er det bare motorfabrikantene Wartsila og MAN B&W som kan levere gassmotorer som yter en effekt på ca. 8 MW. Opplysninger om avgasser blir beregnet ved hjelp av empiriske formler av motorfabrikantene. De empiriske formlene er laget vha. prøvekjøringer på forskjellige gassammensetninger. Beregningene er gjort på en effekt på 6048 kW.

Oppgavens beregninger er basert på gassammensetningen i vedlegg 2:

Metan	86,3 vol %
Etan	8,1 vol %
Propan	2,4 vol %
Nitrogen	1,9 vol %
Karbondioksid	1,3 vol %



6.3.1 Wartsila 18V 32 DF

Motorfabrikanten oppgir følgende røykgassammensetning: [14]

NO ₂	1,3	g/kWh
CO	1,9	g/kWh
THC (CH ₄)	7,0	g/kWh
SO ₂	0	g/kWh
CO ₂	450	g/kWh

Utslipp pr. år ved antatt 200 reisedøgn ved basiseffekten 6048 KW:

NO ₂ :	$\frac{1,3 \text{ g/kWh} * 6048 \text{ kW} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}}$	37740 kg/år
CO:	$\frac{1,9 \text{ g/kWh} * 6048 \text{ kW} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}}$	55158 kg/år
THC (CH ₄):	$\frac{7,0 \text{ g/kWh} * 6048 \text{ kW} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}}$	203212 kg/år
SO ₂ :	Kun meget små mengder	
CO ₂ :	$\frac{450 \text{ g/kWh} * 6048 \text{ kW} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{10^6 \text{ g/tonn}}$	13064 tonn/år

Gassforbruk: 7800 kJ/kWh [14]

Pr. år:	$\frac{7800 \text{ kJ/kWh} * 6048 \text{ kW} * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{45364,0 \text{ kJ/kg} * 1000 \text{ kg/tonn}}$	4992 tonn/år
---------	--	--------------

Beregning av CO₂ ekvivalenter

Beregner total drivhuseffekt ved å gjøre avgassene om til CO₂ ekvivalenter. Bruker CO₂ ekvivalentene fra kapittel 4.

NO ₂ Faktor 17	CO Faktor 4	THC Faktor 20	CO ₂ Faktor 1	Antall CO ₂ ekvivalenter
37,7 tonn _{NO2} /år x 17 tonn _{CO2} /tonn _{NO2}	55,2 tonn _{CO} /år x 4 tonn _{CO2} /tonn _{CO}	203,2 tonn _{THC} /år x 20 tonn _{CO2} /tonn _{THC}	13064 tonn _{CO2} /år x 1 tonn _{CO2} /tonn _{CO2}	17990 tonn _{CO2} /år



6.3.2 Wartsila 8L 50 DF

Motoren Wärtsilä 8L 50 DF på 7600 kW med en belastning på 79%.

Røykgassutslipp: [14]

NO ₂	1,4	g/kWh
CO	1,1	g/kWh
THC (CH ₄)	3,3	g/kWh
SO ₂	0	g/kWh
CO ₂	430	g/kWh

Utslipp pr. år ved samme effekt som Wartsila 46 motoren, dvs ved 79% belastning:

$$\text{NO}_2: \frac{1,4 \text{ g/kWh} * 7600 \text{ kW} * 0,79 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 40346 \text{ kg/år}$$

$$\text{CO:} \frac{1,1 \text{ g/kWh} * 7600 \text{ kW} * 0,79 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 31702 \text{ kg/år}$$

$$\text{THC (CH}_4\text{):} \frac{3,3 \text{ g/kWh} * 7600 \text{ kW} * 0,79 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 95104 \text{ kg/år}$$

SO₂: Kun meget små mengder

$$\text{CO}_2: \frac{430 \text{ g/kWh} * 7600 \text{ kW} * 0,79 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{10^6 \text{ g/tonn}} = 12392 \text{ tonn/år}$$

Gassforbruk: 7500 kJ/kWh [14]

$$\text{Pr. år:} \frac{7500 \text{ kJ/kWh} * 7600 \text{ kW} * 0,79 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{45364,0 \text{ kJ/kg} * 1000 \text{ kg/tonn}} = 4765 \text{ tonn/år}$$

Beregning av CO₂ ekvivalenter

Beregner total drivhuseffekt ved å gjøre avgassene om til CO₂ ekvivalenter. Bruker CO₂ ekvivalentene fra kapittel 4.

NO ₂ Faktor 17	CO Faktor 4	THC Faktor 20	CO ₂ Faktor 1	Antall CO ₂ ekvivalenter
40,3 tonn _{NO2} /år x 17 tonn _{CO2} /tonn _{NO2}	31,7 tonn _{CO} /år x 4 tonn _{CO2} /tonn _{CO}	95,1 tonn _{THC} /år x 20 tonn _{CO2} /tonn _{THC}	12392 tonn _{CO2} /år x 1 tonn _{CO2} /tonn _{CO2}	15106 tonn _{CO2} /år



6.3.3 MAN B&W 18V 32/40 DF

MAN B&W 18V 32/40 DF på 7200 kW med en belastning på 84% :

Røykgassutslipp: [17]

NO _x (NO ₂)	1,3	g/kWh
CO	4,2	g/kWh
HC	13,1	g/kWh
SO ₂	0,01	g/kWh
CO ₂	443,6	g/kWh ref. vedlegg 3

Utslipp pr. år ved basiseffekten, dvs ved 0,84 % belastning:

$$\text{NO}_2: \frac{1,3 \text{ g/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 37740 \text{ kg}_{\text{NO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO}: \frac{4,2 \text{ g/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 121928 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{år}$$

$$\text{THC (CH}_4\text{)}: \frac{13,1 \text{ g/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 380300 \text{ kg}_{\text{HC}}/\text{år}$$

$$\text{SO}_2: \frac{0,01 \text{ g/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 290 \text{ kg}_{\text{SO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO}_2: \frac{443,62 \text{ g/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{10^6 \text{ g/tonn}} = 12879 \text{ tonn}_{\text{CO}_2}/\text{år}$$

Gassforbruk: 8460 kJ/kWh [1]

$$\text{pr. år: } \frac{8460 \text{ kJ/kWh} * 7200 \text{ kW} * 0,84 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{45364,0 \text{ kJ/kg} * 1000 \text{ kg/tonn}} = 5414 \text{ tonn/d}$$

Beregning av CO₂ ekvivalenter

Beregner total drivhuseffekt ved å gjøre avgassene om til CO₂ ekvivalenter. Bruker CO₂ ekvivalentene fra kapittel 4.

NO ₂ Faktor 17	CO Faktor 4	THC Faktor 20	CO ₂ Faktor 1	Antall CO ₂ ekvivalenter
37,7 tonn _{NO2} /år x 17 tonn _{CO2} /tonn _{NO2}	121,9 tonn _{CO} /år x 4 tonn _{CO2} /tonn _{CO}	380,3 tonn _{THC} /år x 20 tonn _{CO2} /tonn _{THC}	12879 tonn _{CO2} /år x 1 tonn _{CO2} /tonn _{CO2}	21614 tonn _{CO2} /år



6.3.4 Wärtsilä 8L 46 GD

Wärtsilä 8L 46 på 7800 kW med en belastning på 78 % :

Røykgassutslipp: [14]

NO _x (NO ₂)	9,0	g/kWh
CO	0,9	g/kWh
HC	0,4	g/kWh
SO ₂	0,05	g/kWh
CO ₂	470	g/kWh

Utslipp pr. år ved basiseffekten, dvs ved 77,5 % belastning:

$$\text{NO}_2: \frac{9,0 \text{ g/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 261280 \text{ kg}_{\text{NO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO: } \frac{0,9 \text{ g/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 26120 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{år}$$

$$\text{THC (CH}_4\text{): } \frac{0,4 \text{ g/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 11620 \text{ kg}_{\text{HC}}/\text{år}$$

$$\text{SO}_2: \frac{0,05 \text{ g/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{1000 \text{ g/kg}} = 1460 \text{ kg}_{\text{SO}_2}/\text{år}$$

$$\text{CO}_2: \frac{470 \text{ g/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{10^6 \text{ g/tonn}} = 13644 \text{ tonn}_{\text{CO}_2}/\text{år}$$

Gassforbruk: 7800 kJ/kWh. [14]

$$\text{pr. år: } \frac{7800 \text{ kJ/kWh} * 7800 \text{ kW} * 0,775 * 24 \text{ h/d} * 200 \text{ d/år}}{45264,0 \text{ kJ/kg} * 1000 \text{ kg/tonn}} = 5000 \text{ tonn}/\text{år}$$

Beregning av CO₂ ekvivalenter

Beregner total drivhuseffekt ved å gjøre avgassene om til CO₂ ekvivalenter. Bruker CO₂ ekvivalentene fra kapittel 4.

NO ₂ Faktor 17	CO Faktor 4	THC Faktor 20	CO ₂ Faktor 1	Antall CO ₂ ekvivalenter
261,3 tonn _{NO2} /år x 17 tonn _{CO2} /tonn _{NO2}	26,1 tonn _{CO} /år x 4 tonn _{CO2} /tonn _{CO}	11,6 tonn _{THC} /år x 20 tonn _{CO2} /tonn _{THC}	13644 tonn _{CO2} /år x 1 tonn _{CO2} /tonn _{CO2}	18423 tonn _{CO2} /år

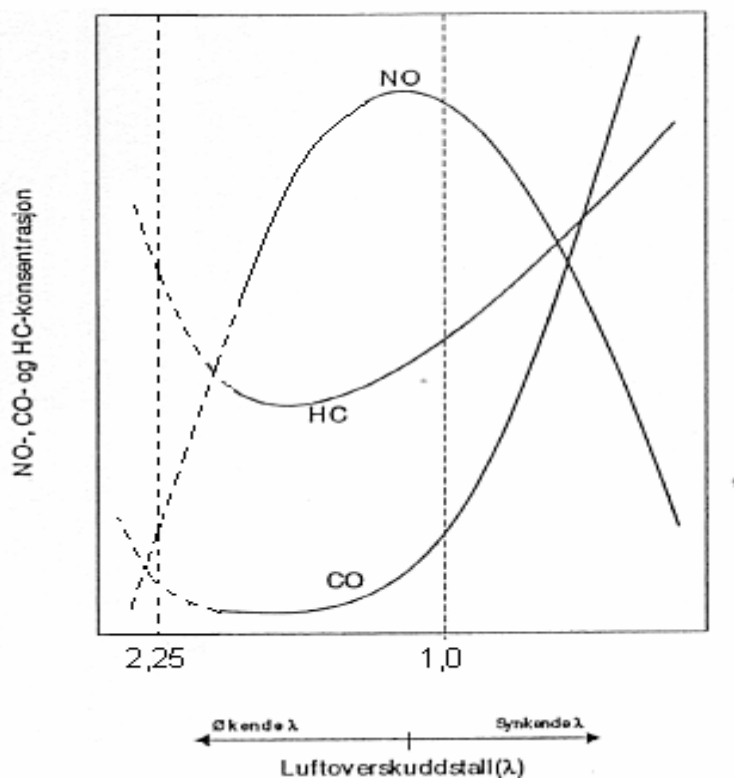
7 Diskusjon

7.1 Luft / brensel forhold

En stor del av de forbrenningstekniske egenskapene til gassmotorene har sammenheng med luft/brenselforholdet under forbrenningen. Dette vil derfor vektlegges spesielt. [1]

Luft/brenselforholdet, λ , for de beregnede gassmotorene ligger mellom 2,2 og 2,25. Med de trykk og temperaturer disse motorene arbeider med har prøvekjøringer vist at dette er mest gunstig for å kunne opprettholde kontrollert forbrenning ved varierte belastninger og turtall.

Figur 7 viser skjematisk sammenhengen mellom konsentrasjonen av NO_x , CO og HC i avgassen ved varierende luftoverskudd. [6]



Figur 7 Sammenheng mellom NO_x -, CO- og HC- konsentrasjonen i avgassen og luftoverskuddet.

7.2 Sammenligning

Dette kapittelet inneholder en grafisk sammenligning med diskusjon av de beregnede data i kapittel 5.3 og 6.3.

7.2.1 NO_x-utslipp

Figur 8 viser en grafisk sammenligning av NO_x-utslippene beregnet i kapittel 5.3 og 6.3. Figuren viser at tungolje motoren gir de høyeste utslippene av nitrogenoksider. Årsakene til dette er: [5] [6]

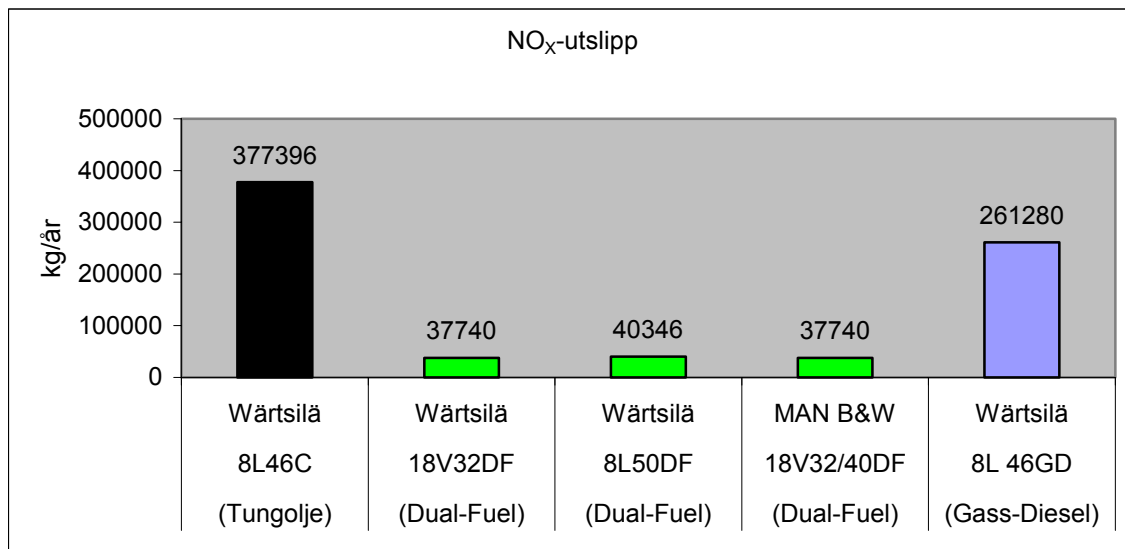
Mer brensel NO_x:

Brensel NO_x dannes ved at nitrogenet i brenselet binder seg med oksygenet i forbrenningsluften. Tungolje inneholder mer nitrogen enn naturgass og vil derfor gi et høyere bidrag av nitrogenoksider i røykgassen.

Mer termisk NO_x:

Termisk NO_x dannes ved at nitrogenet og oksygenet i forbrenningsluften reagerer med hverandre. Reaksjonen avhenger av følgende faktorer:

- Høye forbrenningstemperaturer fører til økt dannelse av nitrogenoksider
- Økt kontakttid mellom nitrogen og oksygen gir økt dannelse av nitrogenoksider
- Økt konsentrasjon av oksygen i sylindreladningen gir økt dannelse av nitrogenoksider.



Figur 8 Sammenligning av NO_x-utslipp



Dual-fuelmotorene arbeider med et relativt høyt luft/brenselforhold uten å få ufullstendig forbrenning. Mer luft fører til at spisstemperaturene i forbrenningen blir lavere fordi det går mer energi til å varme opp luften. Lavere forbrenningstemperatur fører til mindre dannelse av termisk NO_x . Figur 6 i kap. 7.1 viser sammenhengen mellom NO_x -konsentrasjonen i avgassen og luftoverskuddet. Da gassmotorene operer med noe lavere kompresjonstrykk og maksimaltrykk enn diesel og tungoljemotorer, vil dette også bidra til lavere forbrenningstemperaturer, men også noe lavere virkningsgrad.

Gass-dieselmotoren opererer svært likt dieselmotoren, da høykomprimert gass tilføres i slutten av kompresjonstakten. Motoren arbeider med høyere kompresjons- og maksimaltrykk enn Dual-fuelmotorer og gir derfor mer termisk NO_x .

Gassmotorer har svært lavt utslipp av nitrogenoksider, og utslippet fra disse motorene er i dag akseptert da de ligger godt under de krav som myndighetene har fastsatt. Tungoljemotorer avgir derimot relativt høye verdier av nitrogenoksider i avgassen og bør derfor reduseres. De metodene som kan tenkes benyttet, og som til en viss grad er utprøvd er:

- Reduksjon av lufttemperaturen (ladelufttemperaturen) før motoren for å redusere forbrenningstemperaturen.
- Resirkulasjon av deler av røykgassen til luftsiden for å redusere konsentrasjonen av oksygen og for å redusere flammtemperaturen.
- Injeksjon av vann. Vannet opptar varme til fordampning slik at forbrenningstemperaturen senkes.

7.2.2 CO-utslipp

Karbonmonoksid, CO, er et mellomprodukt under forbrenningen. Ved ufullstendig forbrenning får vi høye verdier av CO i avgassen.

Det er tre faktorer som må tilfredsstilles for at en skal kunne oppnå fullstendig forbrenning. I forbrenningsteknikken snakker en da om de tre T`ene:

Tid

Kontakttiden mellom oksygenet og brenselet må være lang nok til at alt brenselet får reagere.

Temperatur

Temperaturen på reaktantene må være høy nok for at reaksjonen skal kunne skje.

Turbulens

Tilstrekkelig turbulens gir god blanding av reaktantene og dermed god forbrenning

CO er en brennbar komponent, og det er derfor utfra et energiøkonomisk synspunkt, viktig å redusere dette utslippet mest mulig. Sammenligningen av CO-utslippene i figur 9 viser at Dual-fuelmotorene gir høyere utslipp av CO enn tungoljemotoren. Årsakene til dette er:

Mager blanding

I Dual-Fuelmotorene oppstår det områder med svært mager blanding av brensel/luft langs veggene i forbrenningsrommet. Når brensel/luftblandingen blir for mager, forbrenner den ufullstendig og CO-innholdet i avgassen øker.

Lav forbrenningstemperatur

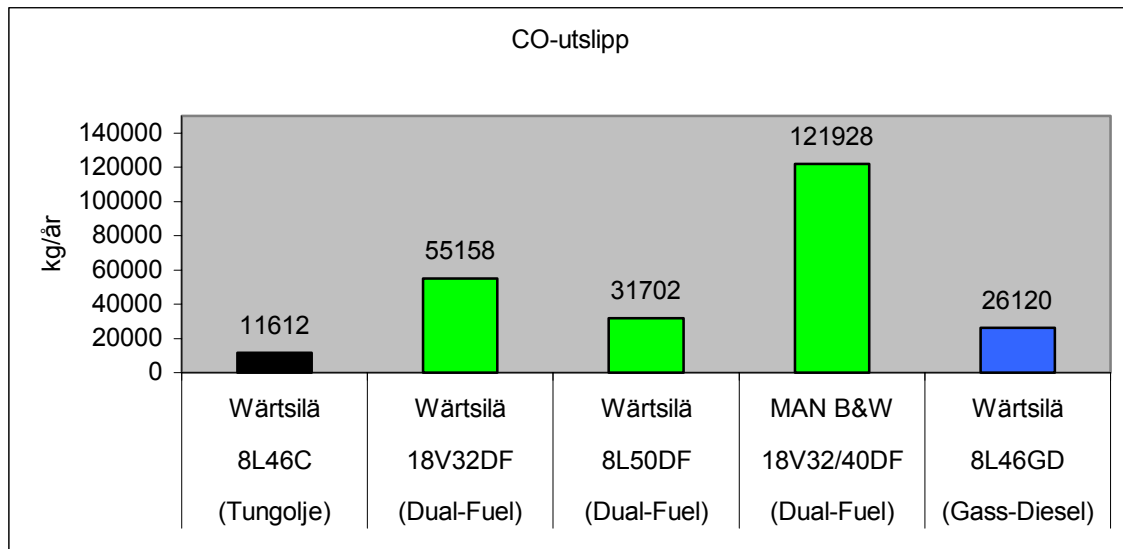
Dual-fuelmotorer arbeider med høyt luftoverskudd, noe som medfører lave forbrenningstemperaturer. Dersom forbrenningstemperaturene blir for lave, vil ikke reaktantene reagere fullstendig med hverandre.

Primære tiltak for reduksjon av CO

CO kan reduseres enten ved å skape mer turbulens i forbrenningsrommet slik at en får bedre blanding av luften og brenselet i brennkammeret, eller ved at forbrenningstemperaturen økes noe. Forbrenningstemperaturen kan økes ved å øke temperaturen på forbrenningsluften. En økning i forbrenningstemperatur vil imidlertid føre til høyere utslipp av nitrogenoksider.

Sekundære tiltak for reduksjon av CO

For å redusere CO innholdet benyttes det avgasskatalysatorer for å forbrenne CO til CO₂. Energien som blir dannet ved denne prosessen fører til temperaturøkning på avgassen. Denne energien går tapt dersom motoren ikke benytter noen form for energigjenvinning i avgasssystemet. Motorer med avgasskatalysator avgir svært lite CO.



Figur 9 Sammenligning av CO-utslipp

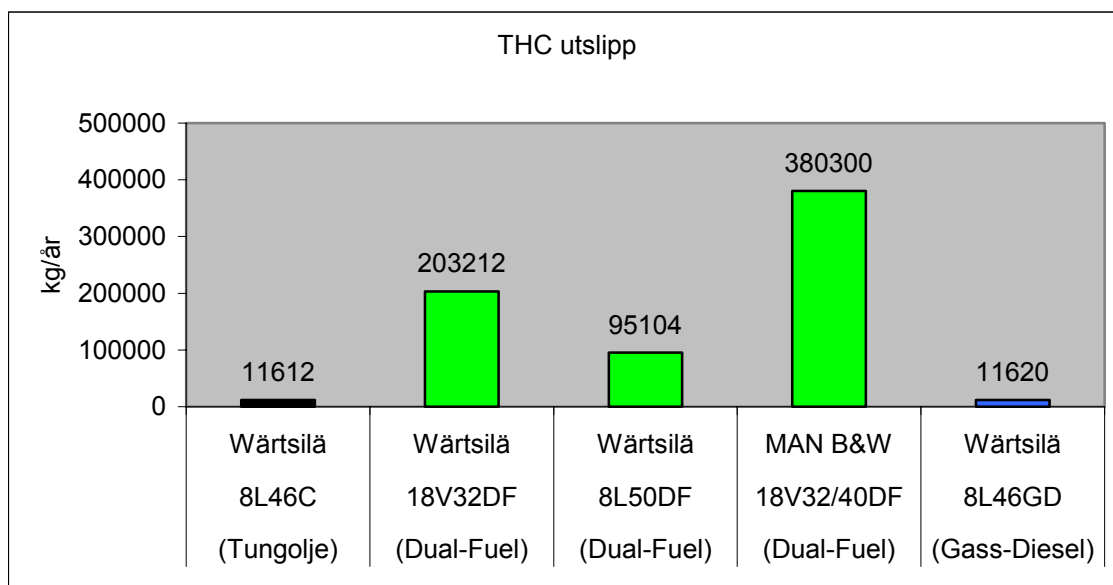
MAN B&W 18V 32/40 DF skiller seg ut fra de andre gassmotorene med et mye høyere CO innhold i avgassen. Da motorens turtall, sylindervolum og middeltrykk er svært lik Wärtsilä 18V 32 DF, kan en kombinasjon av høyere effekt og et mulig mindre optimalisert innsprøytningsystem være årsaken.

Gass–dieselmotoren skiller seg fra Dual–fuelmotorer ved at den gir lavere CO–utslipp. Dette skyldes at motoren ikke arbeider med mager blanding av luft/gass. Disse motorene får derfor mindre problemer med svært magre områder i forbrenningskammerets overflater med tilhørende CO - utslipp. [5] [6]

7.2.3 THC-utslipp

THC, eller HC , er mengden av uforbrent brennstoff i avgassen. Denne er oppgitt som en ekvivalent mengde metan, CH₄. figur 10 viser sammenhengen mellom THC–utslippene fra de ulike motorene.

Fra figur 7 i kap. 7.1 ser en at THC i avgassen har samme forløp som CO. Når luftoverskuddet overskrider en gitt grense vil mengden av uforbrente hydrokarboner i avgassen øke. Dette skyldes blant annet lavere forbrenningstemperatur. I tillegg vil liten turbulens øke faren for ufullstendig forbrenning. Det brennstoffet som ikke forbrenner, forsvinner ut med røykgassen og fører dermed til forurensing og tap av energi.



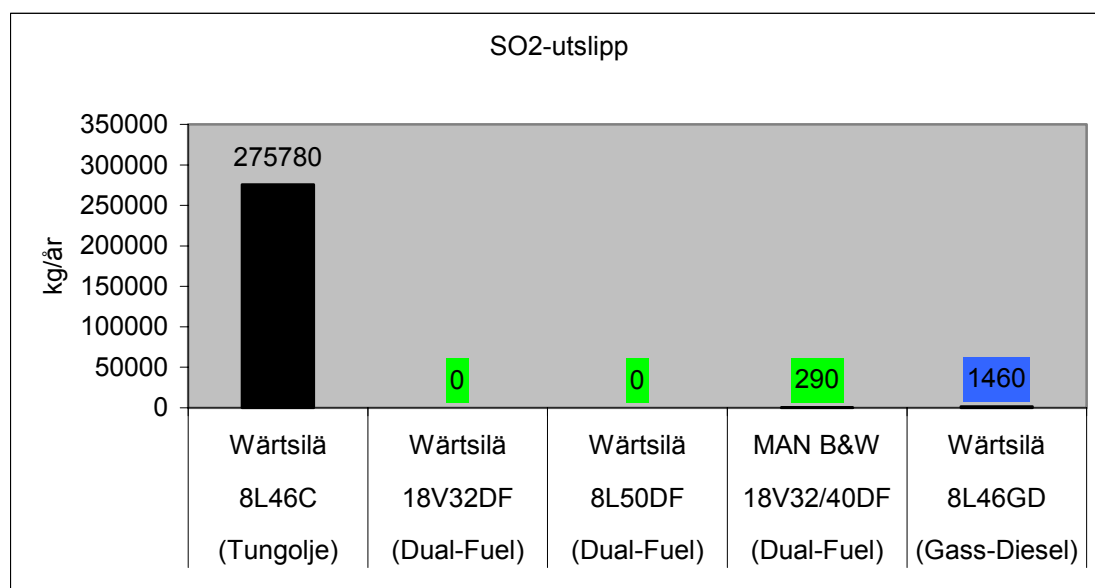
Figur 10 Sammenligning av utslippene av uforbrente hydrokarboner, THC

Dual–fuelmotorer har magre områder som ikke forbrenner fullstendig. Det uforbrente brenselet forsvinner ut med avgassen og gir relativt høye verdier av uforbrente hydrokarboner THC.

CO og THC har de samme årsakssammenhengene og nødvendige tiltak for å redusere THC-utslippene vil være de samme som for CO, beskrevet i kapittel 7.2.2. [5] [6]

7.2.4 SO₂-utslipp

Oksidasjonen av svovel under forbrenningen kan ikke unngås, noe som innebærer at utslippet av svoveloksid vil være direkte proporsjonalt med svovelinholdet i brennoljen. Figur 11 viser at tungoljemotoren avgir mye svoveldioksid. Dette skyldes at tungolje inneholder langt større mengder svoveldioksid enn naturgass.



Figur 11 Sammenligning av SO₂-utslippene.

Da naturgass inneholder svært lite svoveldioksid vil SO₂-utslippene fra gass motorene være svært lavt og være knyttet til svovelinholdet i dieseloljen som benyttes som pilot-fuelen. Fra avgassanalysene for Wärtsilä 18V32DF og 8L50DF er det kun oppgitt at røykgassen inneholder små mengder SO₂. [5] [6]

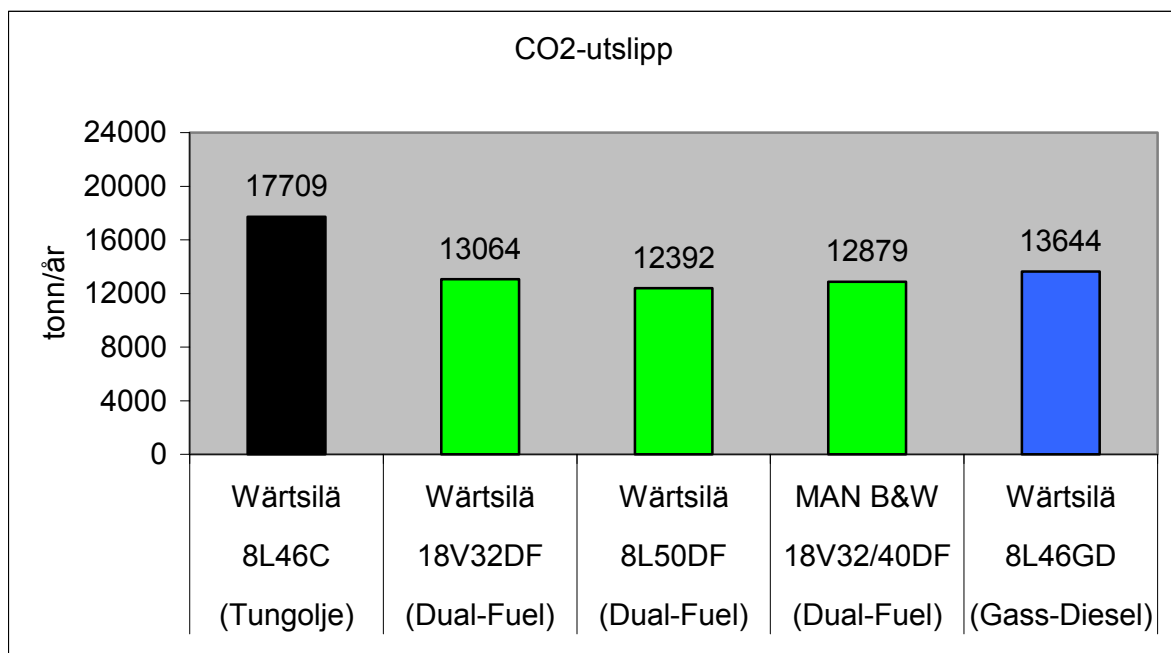
Av figur 11 ser en at en overgang fra tungolje til gass vil redusere utslippene av svoveldioksid med ca 275 tonn pr. år.

7.2.5 CO₂-utslipp

CO₂ er det endelige produktet når karbon reagerer med oksygen ved fullstendig forbrenning.

Naturgass har et lavere karbon/hydrogenforhold enn tungolje og vil derfor gi lavere verdier av CO₂ pr. masseenhet som forbrennes.

Sammenligningen av CO₂-utslippene i figur 12 viser at Dual-fuelmotorene har en gjennomsnittlig reduksjon i CO₂-utslippene på ca 28% i forhold til tungoljemotoren. Dette må imidlertid veies opp mot at Dual-fuelmotorene avgir betydelig høyere utslipp av CO og uforbrente hydrokarboner THC.



Figur 12 Sammenligning av CO₂-utslippene

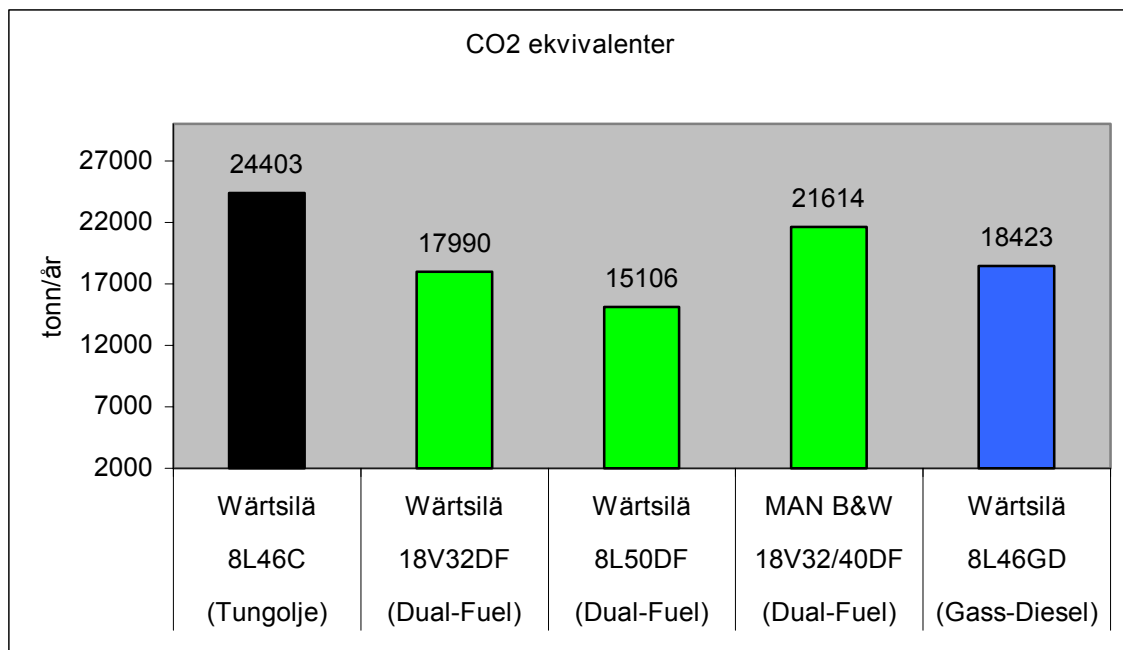
Gassmotorer som benytter avgasskatalysator vil redusere utslippene av CO og THC. Disse komponentene reagerer da med oksygen og danner CO₂. Dette vil føre til at CO₂-utslippene for gassmotorene øker noe. CO₂ innholdet i avgassen vil likevel bli lavere enn tilsvarende motor med tungolje drift, fordi naturgass har lavere karboninnhold og høyere brennverdi enn tungolje. [5] [6]

7.2.6 Partikler

Naturgass inneholder svært lite partikler og avgir følgelig bare små mengder partikler i avgassen. Fra beregningene i kapittel 5.3.1 avgir tungoljemoren ca 572 tonn partikler og metaller pr. år. Det må da tas i betraktning at mesteparten av denne mengden fjernes ved separering av brennoljen. Denne mengden vil allikevel føre til et deponeringsproblem.

7.2.7 Total drivhuseffekt

For å kunne vurdere hvilken motor som er mest miljøvennlig er det hensiktsmessig å sammenligne de beregnede CO₂ ekvivalentene fra de enkelte motorene. Denne sammenligningen omfatter kun klimagassene NO₂, CO, CH₄, og CO₂. Figur 13 viser en sammenligning av de beregnede CO₂ ekvivalentene. Tallene vil ikke være eksakte i størrelsesorden, da de er basert på midlere faktorer for drivhusstyrke.

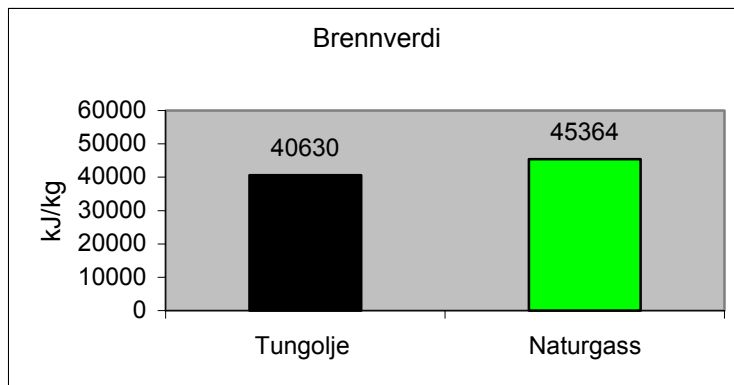


Figur 13 Sammenligning av beregnede CO₂ ekvivalenter fra motorene.

7.2.8 Drivstofforbruk

Da alle motorberegninger er beregnet ut fra en basiseffekt vil brennstofforbruket fra de ulike motorene kunne sammenlignes. Brennstofforbruk er målt i henhold til ISO 3046.

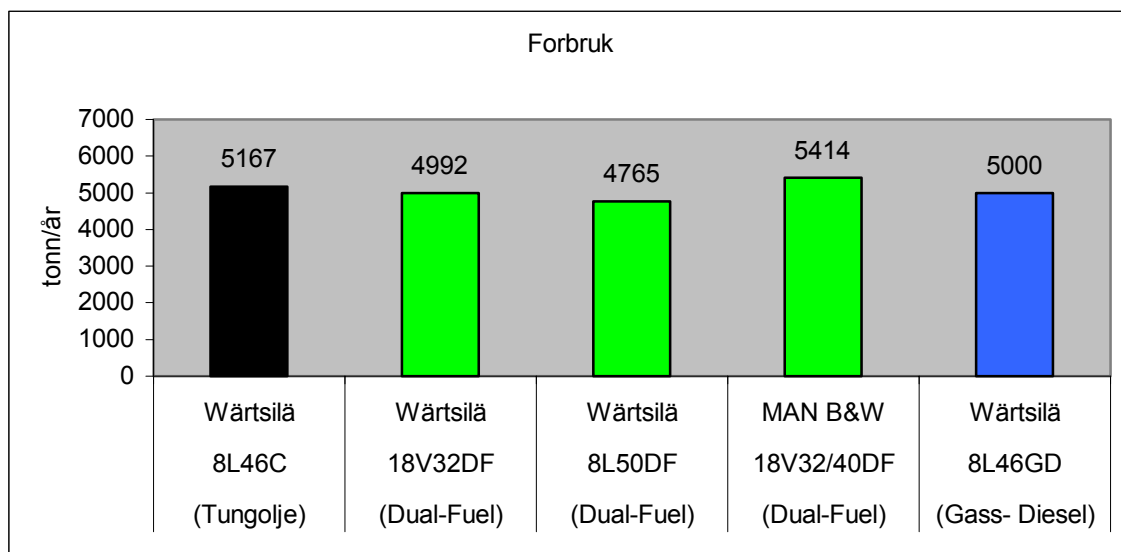
Brennstofforbruket til motorene vil være proporsjonalt med brennverdien til det brensel som motoren benytter. Brennverdien for tungolje og gassen som danner grunnlaget for beregningen i kapittel 5.3 og 6.3 er vist grafisk i figur 14.



Figur 14 Brennverdi for tungolje og naturgass

Figuren viser at brennverdien er ca 12 % høyere for naturgass. Ut fra dette kan det ventes at brennstofforbruket til gassmotorene vil være noe lavere enn for tungoljemotoren.

Figur 15 viser en oversikt over brennstofforbruket til motorene som er omtalt i denne oppgaven.



Figur 14 Oversikt over brennstofforbruk



Som forventet har tungoljemotoren et høyere drivstofforbruk en gassmotorene. MAN B&W 18V 32/40 DF har imidlertid høyest brennstofforbruk. Dette har sammenheng med at denne motor har en dårligere forbrenning enn de andre gassmotorene. Ufullstendig forbrenning fører til at brennbare komponenter som CO og THC forlater motoren gjennom avgassene. Dette gjør at motorens brennstofforbruk øker for å opprettholde samme effekt.

7.3 Evaluering

For å kunne få en totalvurdering av de enkelte motorene med hensyn til miljøbelastning, er det satt opp en tabell som evaluerer de enkelte motorene med hensyn til utslipp, total drivhuseffekt og brennstofforbruk. Tabell A evaluerer hver motor med en faktor fra 1 til 5 der 5 er best og 1 er dårligst. Tallmaterialet er hentet fra kapittel 7.

	Wärtsilä 8L46C	Faktor	Wärtsilä 18V32DF	Faktor	Wärtsilä 8L50DF	Faktor	MAN B&W 18V32/40DF	Faktor	Wärtsilä 8L46GD	Faktor
Utslipp										
NO _x [kg/år]	377396	1	37740	4	40346	3	37740	4	261280	2
CO [kg/år]	11612	5	55158	2	31702	3	121928	1	26120	4
THC [kg/år]	11612	5	203212	2	95104	3	380300	1	11620	4
SO ₂ [kg/år]	275780	1	0	4	0	4	290	3	1460	2
CO ₂ [tonn/år]	17709	1	13064	3	12392	5	12879	4	13644	2
Gjennomsnitt		2,6		3		3,6		2,6		2,8
Total drivhuseffekt										
[tonn CO ₂ ekvivalent er pr år]	24403	1	17990	4	15106	5	21614	2	18423	3
Drivstofforbruk										
[tonn/år]	5167	2	4992	4	4765	5	5414	1	5000	3
Totalt Gjennomsnitt		2,3		3,3		4		2,3		2,9

Tabell A Evaluering av motorene med hensyn på utslipp, total drivhuseffekt og drivstofforbruk.



8 Regelverk

8.1 Regelverk for avgassutslipp

Den 26. september 1997 ble det vedtatt et nytt annekse VI til Marpol sin internasjonale konvensjon, Internasjonale Convention for the Prevention of Pollution from Ships, av 1973, modifisert i 1978. Dette annekse setter krav til utslipp fra motorer i skip, faste og flytende installasjoner.

Dette kapittelet vil være et utdrag av de krav som settes til skipsmotorer. Sjøfartslovgivningen er bygget opp slik at den Internasjonale maritime organisasjon, også kalt The Organisation, utvikler og vedtar lover og regler. Håndhevelse og kontroll utføres av sjøfartsmyndighetene, The Administration, i de respektive land. I Norge vil dette være Sjøfartsdirektoratet. [7]

Virkeområde

Protokollen av 1997 sier at et hvert skip på 400Brt og over, samt faste og flytende borerigger og andre plattformer, skal gjennomgå følgende inspeksjoner:

1. En første inspeksjon før skipet settes i drift, eller før sertifikatet som er påkrevd i regulering 6 blir utstedet for første gang. Dette skal gjøres for å sikre at utstyr, system, arrangement og materialer fullstendig tilfredsstillende kravene i dette annekse.
2. Periodiske inspeksjoner ved intervall spesifisert av Administrasjonen, ikke lengre enn hvert 5. år, for å konstatere at utstyr, system, arrangement og materialer fullstendig tilfredsstillende kravene i dette annekse. og
3. Minimum en inspeksjon i løpet av sertifikatets gyldighet.

Begrensninger av NO_x-utslipp

Begrensninger av NO_x omfatter:

1. dieselmotorer med en effekt på mer enn 130 kW, og som er installert om bord i skip konstruert etter 1 januar 2000. Eller:
2. hver dieselmotor med en effekt på mer enn 130 kW som gjennomgår en større ombygging etter 1 januar 2000

Med større ombygging menes det:

1. at motoren er byttet ut med en ny motor bygget etter 1. januar 2000, eller
2. motoren har gjennomgått modifikasjoner som gjør at motorens utslippsnivå øker.



Begrensningene er:

Turtall n rpm	Grense g_{NO_2}/kWh
$n < 130$	17,0
$130 < n < 2000$	$45.0 * n^{(-0,2)}$
$n > 2000$	9,8

For å standardisere målingene skal tester og målinger gjennomføres i henhold til prosedyrer beskrevet i en egen resolusjon: NO_x Technical Code, eller ved en annen ekvivalent metode, godkjent av Administrasjonen.

Begrensninger av SO_x-utslipp

Generelle krav

De generelle kravene for å begrense utslipp av svoveloksider er satt til en grense på 4,5 vekt% svovelinnhold i bunkersolje.

Kontroll områder

IMO setter strengere krav ved såkalte kontroll områder. Disse områdene er definert av IMO. Når et skip er i et slik område, må minst et av kriteriene under være oppfylt:

1. Svovelinnholdet i bunkersoljen må ikke være høyere enn 1,5 vekt %.
2. Et eksosgass - rensesystem, godkjent av Organisasjonen, skal være montert om bord, for å redusere utslipp av svoveloksider fra hoved-og hjelpemotorer, til 6,0 g/kWh.
Eller:
3. en annen teknisk metode som er i stand til å redusere utslippet av nitrogenoksider til 6,0 g/kWh. Systemet skal være godkjent av Administrasjonen, i henhold til retningslinjer fastsatt av Organisasjonen

Svovelinnholdet må i begge de foregående tilfeller være dokumentert av leverandør, ved brenseloljeprøver godkjent etter bestemte regler. Disse reglene er fastsatt i en egen regulering. Skip som opererer med separate brennoljer for å tilfredsstille disse kravene, må sørge for at brennoljesystemet blir tilstrekkelig flushet for brennolje med 4,5 % svovelinnhold før skipet går inn i et kontrollområde. Når dette gjøres skal volumet av brennolje, med mindre enn 1,5 % svovel, tid og posisjon loggføres.

8.2 Regler for klassifisering og sikkerhet

Det finnes ikke internasjonale konvensjoner som regulerer gassmotordrift. Regelverk blir derfor utarbeidet av de enkelte sjøfartsnasjonene. Det finnes flere classeselskap for skip. Hvert classeselskap har sine regler for klassifisering, disse reglene vil allikevel være svært like da classeselskapene er knyttet til den samme organisasjonen. Dette kapittel tar utgangspunkt i Det Norske Veritas (DNV) sitt regelverk: GAS FUELLED ENGINE INSTALLATIONS. Dette regelverket trådte i kraft 1. juli 2001. [8]



Virkeområde

Reglene gjelder for forbrenningsmotorer i skip som benytter gass, flytende eller gassformig, som brensel.

Sertifisering

I tillegg til kravene i dette regelverk må gassmotorene tilfredstille de krav som gjelder for dieselmotorer.

Ventiler, pumper og kompressorer i gassystemet må være sertifisert av DNV.

Arrangement og system design

Kompressor rom, viss nødvendig, må være plassert over værdekk, eller i rom spesielt godkjent av DNV.

Maskinromskonfigurasjon

To alternative maskinroms arrangement kan benyttes:

1. Gassikre maskinrom

Arrangement i maskinrommet er slik at det blir regnet som gassikkert under alle forhold, normale så vel som ved unormale forhold. Dette medfører at alle gassrør må være dobbeltvegget eller innesluttet i et gasstett rom. I tilfelle en gass lekkasje i gassrørene skal dette føre til avstengning av gasstilførselen, et sekundært uavhengig brennstoffsystem må være tilgjengelig. Alternativt, ved flermotor anlegg, et uavhengig og separat gasstilførsel system for hver motor eller motorgruppe.

2. Emergency Shut Down, ESD beskyttet maskinrom:

Arrangement i maskinrom er slik at det blir betraktet som gassikkert under normale forhold, men under visse unormale forhold kan maskinrommet bli gassfarlig. Ved slike unormale forhold som medfører gassfare, må det settes i verk nødavstenging av ikke sikkert utstyr (tennkilder). Utstyr som ikke kan stoppes må være eksplosjonssikret.

Motorer som genererer kraft til fremdrift og elektrisitet må være atskilt i to eller flere maskinrom, og må ikke ha noe felles tilknytning uten de kan tåle en eksplosjon i et maskinrom.

Dersom et maskinrom må stenges av må det være minimum 40% fremdriftskraft og normal elektrisitetsforsyning.

Trykket i gassrørene må ikke være over 10bar.

Gassdeteksjonsanlegget må være arrangert slik at det automatisk stenger av gasstilførselen (også brennstoff tilførselen ved dual-fuel motorer) og stopper alt utstyr som ikke er eksplosjonssikret.



Rørføring

Generelt:

Gassrør må plasseres minst 760mm fra skutesiden.

1. Gassikre maskinrom:

I disse typer maskinrom må gassrørene være doble og må tilfredstille et av følgende krav:

- a. Gassrørene må være dobbelt veggede med gass i det indre røret. Området mellom de konsentriske rørene skal være fylt med inertgass som har et høyere trykk en brenselgassen. Et passende alarm system må være tilknyttet for å kunne gi alarm ved tap av inertgass.
- b. Gassrørene må være installert inne i et ventilert rør eller kanal. I luftrommet mellom gassrøret og veggen til det ytre røret eller kanalen, må være utstyrt med mekanisk undertrykks.

2. ESD beskyttede maskinrom:

Trykkene i gassrørene må ikke overstige 10 bar og må ikke være dimensjonert for trykk lavere en dette.

Ventilasjonssystem:

Ventilasjonssystemet i maskinrommet skal være uavhengig av andre ventilasjonssystem.

Brannsikkerhet

Et overrisslings anlegg skal være arrangert for kjøling og brannbeskyttelse, og for å kjøle tilstøtende rom. Systemet må være dimensjonert for 10 liter pr. minutt pr. kvadratmeter for horisontale overflater og 4 liter pr. minutt pr. kvadratmeter for vertikale overflater.

I tillegg skal ventilasjonen stoppes og brannspjeld stenges.

Gassmotorer

Eksosgass receiver skal være utstyrt med eksplosjonsluker tilstrekkelig dimensjonert for å unngå høye trykk dersom det oppstår en antennelsesfeil i en sylinder etterfulgt av en antennelse av gass i receiveren. Ventilasjonen fra ventilene må ledes til et sikkert sted utenfor maskinrommet.

For dual-fuelmotorer gjelder:

Ved start, normal stopp og ved lave effekter skal motorene bare gå på olje. Omskifting til og fra gassdrift kan bare gjøres ved effekt nivå som er akseptable gjennom ført ved testing.

Ved normal shutdown så vel som emergency shutdown skal gasstilførselen ikke stenges av senere en olje tilførselen. Shut off av gasstilførsel er ikke avhengig shut off av oljetilførsel. Pilot-fuel må ikke kunne stenges av uten at gasstilførselen stenges av samtidig.



9 Konklusjon

Med dagens motorteknologi vil det være fullt mulig å benytte gassmotorer om bord i skip. Ved at motorene har uavhengige brennstoffsystemer for gass og diesel, vil motorene representere sikker drift av skipene. Med bruk av doble gassrør i maskinrom vil en kunne ha såkalte gassikre maskinrom som er en enkelt maskinromsløsning. Et 2- eller 4-motorsanlegg der motorene er fordelt på to atskilte maskinrom vil tilfredsstillende kravet om minst 40% fremdriftskraft dersom et av maskinrommene må stenges av.

Av hensyn til miljøet vil det også være hensiktsmessig med overgang fra tungolje til gass som brensel. Tabell A i kapittel 7.3 viser at alle gassmotorene til Wärtsilä vil ut fra en totalvurdering være en bedre løsning enn tungoljemotoren. Wärtsilä 8L50 DF, som er en spesiallaget motor for gassdrift, gir best resultat med hensyn på total miljøpåvirkning. Wärtsilä 8L50 DF vil redusere antall beregnede CO₂ ekvivalenter med ca 9300 tonn pr.år i forhold til tungoljemotoren. I tillegg vil motoren ha en reduksjon på 275 tonn svoveldioksider og ca 572 tonn partikler og metaller pr. år sammenlignet med tungoljemotoren.

En overgang fra tungolje til naturgass vil også gi en økonomisk gevinst med hensyn på reduserte avgifter på brennstoff. CO₂- og svovelavgiftene utgjør med dagens avgifter ca 6,37 millioner kr. pr. år. Alle beregninger er på bakgrunn av 200 seilingsdøgn pr. år.

Motoren Wärtsilä 8L50 DF vil også være den mest gunstige med hensyn til vedlikehold og delelager-beholdning, da den har et lavt sylindertall.



Referanseliste

Litteratur

- [1] Wärtsilä, manual. 2002.
MAN B&W, manual, 2002.
- [2] Fiskaa, G., ”Operasjon og drift av maskinerisystemer” (Fueltech bøker 1997)
- [4] Wartsila, presentasjon GD – DF motorer. CD – Rom. 2002
- [5] Longva, S., Schei,
P.J. & Rensvik, H., ”Naturmiljøet” (Universitetsforlaget A/S 1994).
- [6] Høgskolen Stord / Haugesund, ”Kompendium i forbrenningsteknikk”, (HSH 2000).
- [7] IMO, ”Marpol Annex IV”. 2001
- [8] DNV, ”Gas Fuelled Engine Installations”. (GCS A/S 2000).
- [9] Skipsrevyen, Februar 2002

Internett

- [10] Hjemmeside – Knutsen OAS Shipping A/S
<http://www.knutsenoas.no>
- [11] Hjemmeside – Wärtsilä Norway A/S
<http://www.wartsila.com>
- [12] Hjemmeside MAN B&W Norge A/S
<http://www.manbw.dk>
- [13] Hjemmeside DGC
<http://www.dgc.dk>

Kontaktpersoner

- [14] Tunstad Tord – Wärtsilä, Drøbak. Mars 2002
- [15] Lothe Per – Knutsen OAS Shipping A/S
- [16] Valland Harald – NTNU
- [17] Eriksen Ole Gustav – MAN B&W Norge A/S
- [18] Gjerald Eilev – Statens forurensningstilsyn



Vedlegg

VEDLEGG 1	Brennstoffanalyse for tungolje	48
VEDLEGG 2	Analyse for naturgass	49
VEDLEGG 3	Grunnlagsberegninger for Ostwalddiagram tungolje	50
VEDLEGG 4	Grunnlagsberegninger for Ostwalddiagram naturgass	54
VEDLEGG 5	Beregning av CO ₂ -utslipp for MAN B&W 18V 32 DF	60
VEDLEGG 6	Resultater fra grønt regnskap DGC	61



HØRSKOLEN STORD/HAUGESUND



Vedlegg 1

Analyse for tungolje

Knutsen OAS Shipping

From: DNVPS Oslo - FAR [GT500@dnv.com]
Sent: 24. juli 2001 14:48
To: 'fleet-operations@nl.jotankers.com'; 'firmapost@knutsenoas.com'; 'maria.knutsen@knutsenoas.com'
Subject: MARIA KNUITSEN

TO: JO TANKERS B.V.
ATTN: Mr B. Polak

CC: KNUITSEN O.A.S. SHIPPING A/S
ATTN: Mr Arne E Ostenstad

CC: The Master Of 'MARIA KNUITSEN'
ATTN: Chief Engineer

Det Norske Veritas Petroleum Services - Fuel Qual
 24/JUL/01

Vessel : MARIA KNUITSEN

Sample No	F101005812
Sample Type	(HFO)
Bunker Port	GIJON
Bunker Date	19/JUL/01
Sent From	OVIDO
Date Sent	20/JUL/01
Arrived at lab	23/JUL/01
Supplier	RYTTSA
Quantity per C.Eng	156

Seal Data	SELFLOCK
	...
	INTACT

Receipt Data	B.D.R
Density @ 15C	kg/m3 973.8
Viscosity @ 50C	mm2/s 380

Tested Results	Units	
Density @ 15C	kg/m3	966.1
Viscosity @ 50C	mm2/s	359
Water	%v/v	LT 0.1
Micro Carbon Residue	%m/m	11
Sulphur	%m/m	2.8
Total Sediment Potent	%m/m	LT 0.01
Ash	%m/m	0.04
Vanadium	mg/kg	140
Sodium	mg/kg	29
Aluminium	mg/kg	3
Silicon	mg/kg	6
Iron	mg/kg	13
Nickel	mg/kg	37
Calcium	mg/kg	4
Magnesium	mg/kg	LT 1
Lead	mg/kg	LT 1
Zinc	mg/kg	LT 1
Flash Point	Deg.C	GT 70

Calculated Values		
Net Specific Energy	MJ/kg	40.63
CCAI (Ignition Quality)	-	828
Aluminium + Silicon	mg/kg	9



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Vedlegg 2

Analyse for naturgass

NATURGASSENS SAMMENSETNING %

vol %

Metan	86,2
Etan	8,0
Propan	2,3
Nitrogen	1,8
Karbondioksid	1,2
Andre	0,5

(Iso-butan, Normal-butan,
Iso-pentan, Normal-pentan,
Heksan, heptan plus)

GASNOR



Vedlegg 3

Beregninger for Ostwalddiagram tungolje

Tung oljens innhold:

Karboninnhold	87,0 % masse
Hydrogeninnhold	10,3 % masse
Svovelinhold	2,50 % masse
Nitrogen	0,20 % masse

Gjør om til molbasis: (antar 1 kg brennstoff)

$$\text{Karbon: } \frac{0,87 \text{ kg}_C/\text{kg}_B}{12 \text{ kg}_C/\text{kmol}_C} = 0,0725 \text{ kmol}_C/\text{kg}_B$$

$$\text{Hydrogen: } \frac{0,103 \text{ kg}_H/\text{kg}_B}{1 \text{ kg}_H/\text{kmol}_H} = 0,103 \text{ kmol}_H/\text{kg}_B$$

$$\text{Svovel: } \frac{0,025 \text{ kg}_S/\text{kg}_B}{32 \text{ kg}_S/\text{kmol}_S} = 7,81 \cdot 10^{-4} \text{ kmol}_S/\text{kg}_B$$

$$\text{Nitrogen: } \frac{0,002 \text{ kg}_N/\text{kg}_B}{28 \text{ kg}_N/\text{kmol}_N} = 7,14 \cdot 10^{-4} \text{ kmol}_N/\text{kg}_B$$

$$\text{Totalt: } 0,1764 \text{ kmol}_B/\text{kg}_B$$

Finner verdiene som skal til for å beregne likevektskonstanten:

$$\text{Carbon} = m = \frac{0,0725 \text{ kmol}_C}{0,1764 \text{ kmol}_B} = 0,411 \text{ kmol}_C / \text{kmol}_B$$

$$\text{Hydrogen} = n = \frac{0,103 \text{ kmol}_H}{0,1764 \text{ kmol}_B} = 0,584 \text{ kmol}_H / \text{kmol}_B$$

$$\text{Svovel} = q = \frac{0,000781 \text{ kmol}_S}{0,1764 \text{ kmol}_B} = 0,00443 \text{ kmol}_S / \text{kmol}_B$$

$$\text{Nitrogen} = \frac{0,0000714 \text{ kmol}_N}{0,1764 \text{ kmol}_B} = 0,000405 \text{ kmol}_N / \text{kmol}_B$$



Beregner støkiometrisk likevektskonstant:

$$\left(m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + q\right) = \left(0,411 + \frac{0,584}{4} + 0,00443\right) = 0,5614$$

Viser generell balanserings ligning:

$$(mC + nH + pS + qN) + \lambda \left(m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + q\right) * (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow$$

$$m\gamma CO_2 + m(1-\gamma)CO + \frac{n}{2}H_2O + pSO_2 + aO_2 + \lambda \left(m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + q\right) * (3,76N_2)$$

Setter opp støkiometrisk balanse for tungolje:

$$(0,411C + 0,584H + 0,00443S + 0,000405N_2) + \lambda(0,5614) * (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow$$

$$0,411\gamma CO_2 + 0,411(1-\gamma)CO + 0,00443SO_2 + \frac{0,584}{2}H_2O + aO_2 + [\lambda(0,5614) * 3,76 + 0,000405]N_2$$

Setter opp O₂ balanse for å finne uttrykk for *a*:

$$0,5614\lambda = 0,411\gamma + \frac{1}{2} * 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 0,146 + a$$

$$a = 0,5614\lambda - 0,2056\gamma - 0,356$$

Alle beregninger som blir vist her, tar utgangspunkt i den støkiometriske balansen.

Finner linjen for CO = 0 vol %:

Beregner CO₂ maksimum → λ = 1 og γ = 1:

$$CO_2 = \left(\frac{0,411\gamma}{0,411\gamma + 0,00443 + 2,111\lambda}\right) \cdot 100\% = 16,25 \text{ vol\%}$$

Mengden av O₂ er 21 vol %

Finner linjen for CO maksimum:

Regner ut CO maksimum, regnes ut når λ = 1 og γ = 0:

$$CO_{maks} = \left(\frac{0,411(1-\gamma)}{0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 0,5614\lambda - 0,356 + 2,111\lambda}\right) \cdot 100\% = 15,03 \text{ vol\%}$$

Finner skjæringen med O₂ aksene, regnes ut når λ = 1 og γ = 0:



$$O_2 = \left(\frac{0,5614\lambda - 0,356}{0,5614\lambda - 0,356 + 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 2,111\lambda} \right) \cdot 100\% = 7,52 \text{ vol\%}$$

Finner skjæringen med CO₂ aksen, gjøres ved å sette opp to ligninger med to ukjente.

Bruker ligning for CO maksimum for å finne ligning nr.1:

$$0,1503 = \left(\frac{0,411(1-\gamma)}{0,411(1-\gamma) + 0,411\gamma + 0,00443 + 2,111\lambda} \right)$$

$$\text{Ligning nr.1: } \lambda = 1,1 - 1,297\gamma$$

Bruker O₂ balansen til å finne ligning nr.2:

$$0,5614\lambda = 0,411\gamma + \frac{1}{2} * 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 0,146$$

$$\text{Ligning nr.2: } \lambda = 0,634 + 0,366\gamma$$

Setter ligning nr.1 og nr.2 mot hverandre og finner omsetningsgraden γ

$$1,1 - 1,297\gamma = 0,634 + 0,366\gamma$$
$$\gamma = 0,28$$

Bruker ligning nr.2 for å beregne luftoverskuddstallet λ :

$$\lambda = 0,634 + 0,366\gamma$$
$$\lambda = 0,74$$

Finner skjæringen med CO₂ aksen når $\lambda = 0,74$ og $\gamma = 0,26$

$$CO_2 = \left(\frac{0,411\gamma}{0,411\gamma + 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 2,111\lambda} \right) \cdot 100\% = 5,82 \text{ vol\%}$$

**Wärtsilä 8L 46 C**

Luftoverskuddstall = 2,25 [14]

Omsetningsgrad beregnes ut fra røykgassanalysen i kapittel 5.3.1

Omsetningsgrad, $\gamma = \frac{\text{antall mol karbon reagert til CO}_2}{\text{Antall mol karbon tilført i brensel}}$

Ut fra røykgassanalysen i kapittel 5.3.1 kan en finne antall mol karbon som tilføres med brenselet pr. kWh:

$$n_C = \frac{1,4 \text{ g}_{CO} / kWh}{28 \text{ g}_{CO} / mol_{CO}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO} + \frac{0,4 \text{ g}_{CH_4} / kWh}{16 \text{ g}_{CH_4} / mol_{CH_4}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CH_4} + \frac{610 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 13,90 \text{ mol}_C / kWh$$

Antall mol C reagert til CO₂:

$$n_{CO_2} = \frac{610 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 13,86 \text{ mol}_C / kWh$$

$$\gamma = \frac{13,86 \text{ mol}_C / kWh}{13,90 \text{ mol}_C / kWh} = 0,996$$

Setter in verdiene for luftoverskuddstallet λ og omsetningsgraden γ for tungoljemotoren, i den balanserte støkiometriske ligningen og finner skjæringen med CO₂ akse:

$$CO_2 = \left(\frac{0,411\gamma}{0,411\gamma + 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 2,111\lambda} \right) \cdot 100\% = 6,979 \text{ vol}\%$$

Finner skjæringen med O₂:

$$O_2 = \left(\frac{0,5614\lambda - 0,2056\gamma + 0,356}{0,5614\lambda - 0,2056\gamma - 0,356 + 0,411\gamma + 0,411(1-\gamma) + 0,00443 + 2,111\lambda} \right) \cdot 100\% = 11,97 \text{ vol}\%$$

Vedlegg 4

Beregninger for Ostwalddiagram for naturgass.

Naturgassens innhold:

Metan	CH ₄	= 0,863 vol %
Etan	C ₂ H ₆	= 0,081 vol %
Propan	C ₃ H ₈	= 0,024 vol %
Nitrogen	N ₂	= 0,019 vol %
Karbondioksid	CO ₂	= 0,013 vol %

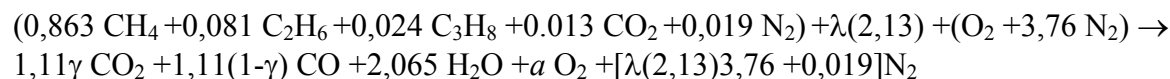
Setter opp andeler av rene stoffer for regne ut den støkiometriske likevekts konstant.

C = m	= 0,863+(2*0,081)+(3*0,024)+0,013	= 1,11 vol %
H = n	= (4*0,863)+(6*0,081)+(8*0,024)	= 4,13 vol %
O = p	= (2*0,013)	= 0,026 vol %
N ₂		= 0,019 vol %

Støkiometrisk likevekts konstant:

$$(m+n/4+p/2) = (1,11+4,13/4-0,026/2) = 2,13$$

Setter opp en støkiometrisk balanse for gassen:



Setter opp en O₂ balanse for å finne uttrykk for a

$$0,013 + 2,13\lambda = 1,11\gamma + 1,11(1-\gamma)/2 + 2,065/2 + a$$

$$a = 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575$$

Alle beregningene som blir vist her tar utgangspunkt i den støkiometriske balansen.

Beregner CO₂ maks. $\rightarrow \lambda = 1$ og $\gamma = 1$:

$$\text{CO}_2 = \left(\frac{1,11\gamma}{1,11\gamma + 8,028\lambda} \right) \cdot 100\% = 12,15 \text{ vol}\%$$

Mengden av O₂ er 21 vol %

Finner linjen for CO maksimum, regnes ut når $\lambda = 1$ og $\gamma = 0$:



$$\text{CO maks.} = \left(\frac{1,11 * (1 - \gamma)}{1,11(1 - \gamma) + 2,13\lambda - 1,575 + 8,028\lambda} \right) \cdot 100\% = 11,45 \text{ vol \%}$$

Finner linjen for CO maksimum:

Finner skjæringen med O₂ aksen, regnes ut når $\lambda = 1$ og $\gamma = 0$:

$$\text{O}_2 = \left(\frac{2,13\lambda - 1,575}{2,13\lambda - 1,575 + 1,11(1 - \gamma) + 8,028} \right) \cdot 100\% = 5,73 \text{ vol \%}$$

Finner skjæringen med CO₂ aksen, for å finne den må en sette opp to ligninger med to ukjente.

Bruker ligning for CO maksimum for å finne ligning nr.1:

$$0,1145 = \left(\frac{1,11(1 - \gamma)}{1,11\gamma + 1,11(1 - \gamma) + 8,028\lambda} \right)$$

$$\text{Ligning nr. 1: } \lambda = 1,0695 - 1,2078\gamma$$

Bruker ligningen for O₂ balansen for å finne ligning nr.2:

$$0,13 + 2,13\lambda = 1,11\gamma + \left(\frac{1,11(1 - \gamma)}{2} \right) + \frac{2,065}{2}$$

$$\text{Ligning nr.2: } \lambda = 0,684 + 0,26\gamma$$

Setter ligning nr.1 og ligning nr.2 mot hverandre og finner omsetningsgraden γ :

$$1,0695 - 1,2078\gamma = 0,684 + 0,26\gamma$$

$$\gamma = 0,26$$

Bruker ligning nr. 2 for å beregne luftoverskuddstallet λ :

$$\lambda = 0,26\gamma + 0,684$$

$$\lambda = 0,75$$

Finner skjæringen med CO₂ aksen når $\lambda = 0,75$ og $\gamma = 0,26$

$$\text{CO}_2 = \left(\frac{1,11\gamma}{1,11\gamma + 1,11(1 - \gamma) + 8,028\lambda} \right) \cdot 100\% = 4,05 \text{ vol\%}$$

**Wärtislä 8L 50 DF**

Luftoverskuddstall = 2,22 [14]

Omsetningsgrad beregnes ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.1

Omsetningsgrad, $\gamma = \frac{\text{antall mol karbon reagert til CO}_2}{\text{Antall mol karbon i brensel}}$

Ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.1 kan en finne antall mol karbon som tilføres med brenselet pr. kWh:

$$n_C = \frac{1,1 \text{ g}_{CO} / kWh}{28 \text{ g}_{CO} / mol_{CO}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO} + \frac{3,3 \text{ g}_{CH_4} / kWh}{16 \text{ g}_{CH_4} / mol_{CH_4}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CH_4} + \frac{430 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,02 \text{ mol}_C / kWh$$

Antall mol C reagert til CO₂:

$$n_{CO_2} = \frac{430 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 9,77 \text{ mol}_C / kWh$$

$$\gamma = \frac{9,77 \text{ mol}_C / kWh}{10,02 \text{ mol}_C / kWh} = 0,975$$

Setter in verdiene for luftoverskuddstallet λ og omsetningsgraden γ , og finner skjæringen med CO₂ aksen.

$$CO_2 = \left(\frac{1,1\gamma}{1,1\gamma + 1,1(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 5,03 \text{ vol}\%$$

Finner skjæringen med O₂ aksen.

$$O_2 = \left(\frac{2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575}{1,1\gamma + 1,1(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 12,14 \text{ vol}\%$$

Wärsilä 18V 32 DF

Luftoverskuddstall = 2,25 [14]

Omsetningsgrad beregnes ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.2

Omsetningsgrad, $\gamma = \frac{\text{antall mol karbon reagert til CO}_2}{\text{Antall mol karbon i brensel}}$



Ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.2 kan en finne antall mol karbon som tilføres med brenselet pr. kWh:

$$n_C = \frac{1,9 \text{ g}_{CO} / kWh}{28 \text{ g}_{CO} / mol_{CO}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO} + \frac{7,0 \text{ g}_{CH_4} / kWh}{16 \text{ g}_{CH_4} / mol_{CH_4}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CH_4} + \frac{450 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,73 \text{ mol}_C / kWh$$

Antall mol C reagert til CO₂:

$$n_{CO_2} = \frac{450 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,22 \text{ mol}_C / kWh$$

$$\gamma = \frac{10,22 \text{ mol}_C / kWh}{10,73 \text{ mol}_C / kWh} = 0,953$$

Setter in verdiene for luftoverskuddstallet λ og omsetningsgraden γ , og finner skjæringen med CO₂ akse.

$$CO_2 = \left(\frac{1,11\gamma}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 4,8 \text{ vol\%}$$

Finner skjæringen med O₂ akse.

$$O_2 = \left(\frac{2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 12,32 \text{ vol\%}$$

MAN B&W 18V 32/40 DF

Luftoverskuddstall = 2,23 [17]

Omsetningsgrad beregnes ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.3

Omsetningsgrad, $\gamma = \frac{\text{antall mol karbon reagert til CO}_2}{\text{Antall mol karbon i brensel}}$



Ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.3 kan en finne antall mol karbon som tilføres med brenselet pr. kWh:

$$n_C = \frac{4,2 \text{ g}_{CO} / kWh}{28 \text{ g}_{CO} / mol_{CO}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO} + \frac{13,1 \text{ g}_{CH_4} / kWh}{16 \text{ g}_{CH_4} / mol_{CH_4}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CH_4} + \frac{443,6 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 11,05 \text{ mol}_C / kWh$$

Antall mol C reagert til CO₂:

$$n_{CO_2} = \frac{443,6 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,08 \text{ mol}_C / kWh$$

$$\gamma = \frac{10,08 \text{ mol}_C / kWh}{11,05 \text{ mol}_C / kWh} = 0,912$$

Setter in verdiene for luftoverskuddstallet λ og omsetningsgraden γ , og finner skjæringen med CO₂ akse.

$$CO_2 = \left(\frac{1,1\gamma}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 4,67 \text{ vol\%}$$

Finner skjæringen med O₂ akse.

$$O_2 = \left(\frac{2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 12,33 \text{ vol\%}$$

Wärtsilä 8L 46 GD

Luftoverskuddstall = 2,0 [14]

Omsetningsgrad beregnes ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.4

$$\text{Omsetningsgrad, } \gamma = \frac{\text{antall mol karbon reagert til CO}_2}{\text{Antall mol karbon i brensel}}$$



Ut fra røykgassanalysen i kapittel 6.3.4 kan en finne antall mol karbon som tilføres med brenselet pr. kWh:

$$n_C = \frac{0,9 \text{ g}_{CO} / kWh}{28 \text{ g}_{CO} / mol_{CO}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO} + \frac{0,4 \text{ g}_{CH_4} / kWh}{16 \text{ g}_{CH_4} / mol_{CH_4}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CH_4} + \frac{470 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,74 \text{ mol}_C / kWh$$

Antall mol C reagert til CO₂:

$$n_{CO_2} = \frac{470 \text{ g}_{CO_2} / kWh}{44 \text{ g}_{CO_2} / mol_{CO_2}} \cdot 1 \text{ mol}_C / mol_{CO_2} = 10,68 \text{ mol}_C / kWh$$

$$\gamma = \frac{10,68 \text{ mol}_C / kWh}{10,74 \text{ mol}_C / kWh} = 0,994$$

Setter in verdiene for luftoverskuddstallet λ og omsetningsgraden γ , og finner skjæringen med CO₂ akse.

$$CO_2 = \left(\frac{1,11\gamma}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 5,72 \text{ vol\%}$$

Finner skjæringen med O₂ akse.

$$O_2 = \left(\frac{2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575}{1,11\gamma + 1,11(1-\gamma) + 2,13\lambda - 0,555\gamma - 1,575 + 8,028\lambda + 0,019} \right) \cdot 100\% = 11,04 \text{ vol\%}$$

Vedlegg 5

Beregning av CO₂ utslipp for MAN B&W 18V 32/40 DF.

Motoren har et spesifikt gassforbruk på 8460 kJ/KWh.
Gassens brennverdi er beregnet til 36807,03 kJ/Nm³ ref. kap. 4.2

Motorens gassforbruk pr.sek. er:

$$\text{Gassforbruk} : \frac{8460 \text{ kJ/kWh} \cdot 7200 \text{ kW} \cdot 0,84}{36807,03 \text{ kJ/Nm}^3} = 1390,12 \text{ Nm}^3 / h$$

Antall mol gass pr. time:

$$n = \frac{1390,12 \text{ Nm}^3 / h}{22,69 \text{ Nm}^3 / \text{kmol}} = 61,27 \text{ kmol}_G / h$$

Ut fra gass sammensetningen beregnes antall mol C tilført pr. time:

Metan	CH ₄	= 0,863 vol %
Etan	C ₂ H ₆	= 0,081 vol %
Propan	C ₃ H ₈	= 0,024 vol %
Nitrogen	N ₂	= 0,019 vol %
Karbondioksid	CO ₂	= 0,013 vol %

$$n_{C \text{ inn}} = 61,27 \text{ kmol}_G / h (0,863 + 0,081 \cdot 2 + 0,024 \cdot 3 + 0,013) \text{ kmol}_C / \text{kmol}_G = 68,0 \text{ kmol}_C / h$$

$$\text{Finner antall mol C pr. kWh: } \frac{68,0 \text{ kmol}_C / h}{(7200 \cdot 0,84) \text{ kW}} = 0,01124 \text{ kmol}_C / \text{kWh} = 11,24 \text{ mol}_C / \text{kWh}$$

Fra røykgassanalysen for motoren kan en finne mengden C ut:

NO _x (NO ₂):	1,3	g/KWh
CO:	4,2	g/KWh
HC:	13,1	g/KWh
SO ₂ :	0,01	g/KWh
CO ₂		

Mol balanse C, for å finne CO₂ innholdet i røkgassen:

$$11,24 \text{ mol}_C / \text{kWh} = \frac{4,2 \text{ g}_{CO} / \text{kWh}}{28 \text{ g}_{CO} / \text{mol}_{CO}} + \frac{13,1 \text{ g}_{HC} / \text{kWh}}{13 \text{ g}_{HC} / \text{mol}_{HC}} + \frac{X \text{ g}_{CO_2} / \text{kWh}}{44 \text{ g}_{CO_2} / \text{mol}_{CO_2}}$$

$$X \text{ g}_{CO_2} / \text{kWh} = 443,62 \text{ g} / \text{kWh}$$



Vedlegg 6

Resultater av beregningsprogram for avgasser fra gassmotorer.
Dansk Gasteknisk Senter, DGC, har laget et program for beregning av avgasser på gassmotorer.

Wärtsilä 18V 32 DF

Beregning av årlig gassforbruk:

$$\frac{7800 \text{ kJ/kWh} \cdot 6048 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 200 \text{ d/år}}{368071 \text{ kJ/Nm}^3} = 6152012 \text{ Nm}^3/\text{år}$$

Grønt regnskab – resultater [13]

Anlægstype: Gasmotorer

Årligt gasforbrug: 6.152.012 m³n

Årligt energiforbrug: 245.465 GJ

Komponent	Emissionsfaktor [kg/GJ]	Årlig emission [kg/år]
CO ₂	56,9	14.000.000
CO	0,2	49.000
NO _x	0,15	37.000
UHC	0,6	150.000
SO ₂	0,0003	74

**Wärtsilä 8L 50 DF**

Beregning av årlig gassforbruk:

$$\frac{7500 \text{ kJ/kWh} \cdot 7600 \text{ kW} \cdot 0,79 \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 200 \text{ d/år}}{36807 \text{ kJ/Nm}^3} = 5872361 \text{ Nm}^3/\text{år}$$

Grønt regnskab – resultater [13]

Anlægstype: Gasmotorer

Årligt gasforbrug: 5.872.361 m³n

Årligt energiforbrug: 234.307 GJ

Komponent	Emissionsfaktor [kg/GJ]	Årlig emission [kg/år]
CO ₂	56,9	13.300.000
CO	0,2	47.000
NO _x	0,15	35.000
UHC	0,6	140.000
SO ₂	0,0003	70

**MAN B&W 18V 32/40 DF**

Beregning av årlig gassforbruk:

$$\frac{8460 \text{ kJ/kWh} \cdot 7200 \text{ kW} \cdot 0,84 \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 200 \text{ d/år}}{36807 \text{ kJ/Nm}^3} = 6672567 \text{ Nm}^3/\text{år}$$

Grønt regnskab – resultater [13]

Anlægstype: Gasmotorer

Årligt gasforbrug: 6.672.567 m³n

Årligt energiforbrug: 266.235 GJ

Komponent	Emissionsfaktor [kg/GJ]	Årlig emission [kg/år]
CO ₂	56,9	15.100.000
CO	0,2	53.000
NO _x	0,15	40.000
UHC	0,6	160.000
SO ₂	0,0003	80

**Wärtsilä 8L 46 GD**

Beregning av årlig gassforbruk:

$$\frac{7800 \text{ kJ/kWh} \cdot 6048 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 200 \text{ d/år}}{36807 \text{ kJ/Nm}^3} = 6188632 \text{ Nm}^3/\text{år}$$

Grønt regnskab – resultater [13]

Anlægstype: Gasmotorer

Årligt gasforbrug: 6.188.632 m³n

Årligt energiforbrug: 246.926 GJ

Komponent	Emissionsfaktor [kg/GJ]	Årlig emission [kg/år]
CO ₂	56,9	14.100.000
CO	0,2	49.000
NO _x	0,15	37.000
UHC	0,6	150.000
SO ₂	0,0003	74