
Rapport SGC 089

**RENING AV AVGASER FRÅN EN
NATURGASDRIVEN LEAN BURN MOTOR
I EN FÖRBRÄNNINGSVÄXLARE**

©Svenskt Gastekniskt Center - Oktober 1997

Björn Heed
Institutionen för Energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC´s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydkraft Gas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydkraft Gas AB
Göteborg Energi AB
MEG-TEC AB
Wärtsilä Diesel AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

SAMMANFATTNING

Avgaserna från en naturgasdriven 1 MW lean burn motor har behandlats i en reningsanordning byggande på regenerativ förbränning. För det oförbrända i avgaserna, huvudsakligen metan, var reningsgraden 95%.

Reningsanordningen drevs ihop med motorn under ca 6000 tim utan att någon minskning av reningsgraden kunde konstateras. Reningsanordningen visade heller inga tendenser till igensättning eller tryckfallsökning. Den visade sig fungera bra även under en veckas incident med höga halter smörjolja i motoravgaserna och tog heller ingen skada därav.

Försök att i samma anordning rena avgaserna med avseende på kväveoxider med tillämpning av ett SNCR-förfarande och tillsättning av ammoniak var inte framgångsrika.

SUMMARY

Exhaust gases from a natural gas fired lean burn motor of 1 MW were treated in a pollution control device operating on the principle of regenerative combustion. Unburned components in the exhaust gases, mainly consisting of methane, were incinerated with a cleaning efficiency of 95 %.

The pollution control device was operated with the motor for 6000 hours without any observable decline in cleaning efficiency. Nor did the pollution control device show any tendencies of increasing pressure drop or of the accumulation of deposits. It worked well also during a week of operation with high concentrations of lubricating oil in the motor exhaust gases and it was not damaged by the incident.

Attempts to use the equipment for a simultaneous reduction of nitrogen oxides by adding ammonia to the exhaust gases to establish an SNCR process were not successful.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING / SUMMARY

INNEHÅLL	Sida
1. BAKGRUND	1
1.1 Elproduktion med naturgasdrivna motorer	1
1.2 Motortyper	2
1.2.1 Ottomotorer	2
1.3 Avgasemissioner	3
1.3.1 Rök	3
1.3.2 Oförbrända gaser	3
1.3.3 Kväveoxider	4
1.4 Danska mätningar	5
1.5 Wärtsilä lean burn motorer	5
2. PROJEKTBEKRIJVNING	8
2.1 Oförbrända kolväten	8
2.2 Kväveoxider	8
2.3 Drifterfarenhet	8
2.3.1 Avsättningar i bädden	8
3. EXPERIMENTELL UPPSTÄLLNING	9
3.1 Uppställning	9

3.1.1 Utläggning	9
3.1.2 Motor	10
3.1.3 Reningsanordning	10
3.1.4 Instrumentering	11
4 RESULTAT	12
4.1 Kolväten - 95% rening	12
4.2 Kväveoxider	12
4.3 Avlagringar	13
4.4 Energiförbrukning	13
4.5 Driftserfarenheter	13
4.5.1 Höga halter oförbränt	13
4.5.2 Oljeaerosol	14
5. SLUTSATSER	15
6. REFERENSER	16

BILAGOR

- A. Förbränningsväxlare för destruktion av organiska föroreningar.
- B. Beskrivning av Wärtsilä W6R25SG naturgasmotor.
- C. Ritning och P&I för reningsanordning Grace TEC 1/2-G3-22FD-LT

1. Bakgrund

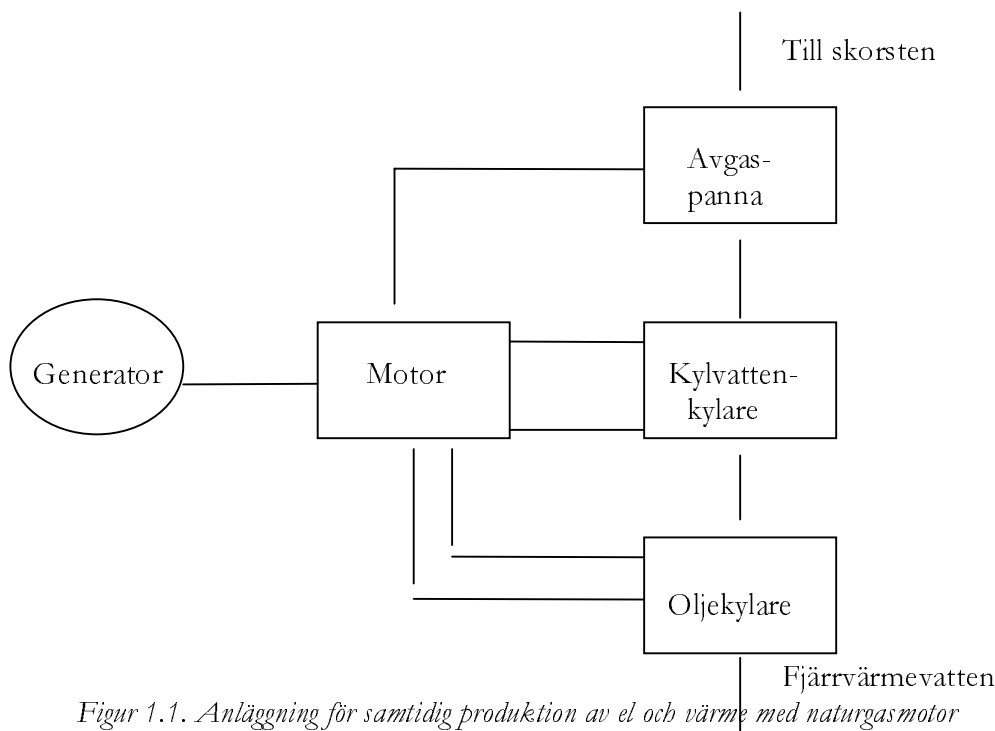
Vid Institutionen för Energiteknik, Chalmers Tekniska högskola har tidigare gjorts arbeten gällande regenerativ förbränning av brännbara föroreningar som är starkt utspädda i luft eller andra gasblandningar som också innehåller syre. En process för destruktion av lösningsmedelsångor från tryckeri- och målningsindustri har därvid tagits fram. En närmare beskrivning av processen finns i Bilaga A. Processen har blivit spridd och på olika ställen i världen har man nu skaffat sig goda kunskaper och erfarenheter gällande konstruktion och drift av anläggningar. Omkring 500 anläggningar är nu i drift. Många nya anläggningar är också under byggnation. För lösningsmedelsdestruktion kan därför tekniken idag i någon mening kallas för mogen och utvecklad.

Det finns emellertid fler tänkbara användningsområden för tekniken och syftet med föreliggande arbete var att undersöka teknikens potential för behandling av avgaserna från naturgasdrivna motorer. Under senare tid har man blivit uppmärksam på den relativt stora mängd oförbrända kolväten som

släpps ut med avgaserna från sådana motorer. Eftersom de i övrigt uppvisar goda egenskaper, sker för närvarande en kraftig utbyggnad av anläggningar för kombinerad produktion av elkraft och värme baserade på naturgasdrivna motorer. I Danmark, som är föregångsland på området sker nu cirka 15 % av elproduktionen på detta sätt.

1.1 Elproduktion med naturgasdrivna motorer

En stor fördel med att använda naturgasdrivna kolvmotorer är att man vid gynnsamt gaspris med god ekonomi kan bygga och driva små anläggningar. Detta skiljer mot andra processer som också kan utnyttja naturgas som primäre energi, såsom gasturbiner och ångkraftverk vilka inte behandlas här. Anläggningar av storleken 1-10 MW (el eller värme) är vanliga och är vanligen uppbyggda kring en eller ett fåtal motorer. Anläggningarna blir billiga i installation, elverkningsgraden är relativt hög (upp mot ca 40 %, ibland till och med högre) och naturgas är ett relativt billigt bränsle.



Figur 1.1. Anläggning för samtidig produktion av el och värme med naturgasmotor

Att anläggningarna kan byggas små är viktigt när det gäller avsättning och distribution av det värme som tillvaratas i samband med elproduktionen. Även ett mindre samhälle med några hundra villor och ett litet fjärrvärmenät blir då ett passande värmeunderlag. För ekonomin i anläggningen är det mycket viktigt att kunna få betalt både för elproduktionen och värmeproduktionen. De stora och koncentrerade värmeunderlagen i städerna är i stor utsträckning redan tagna i anspråk. Värme kan inte på ett ekonomiskt sätt transporteras långa sträckor.

Produktion i många små produktionsanläggningar för el, s k ”distribuerad” istället för centraliserad produktion av el, medför fördelar vad gäller tillförlitlighet. Det innebär också fördelar vad det gäller utformning och drift av elnätet.

1.2 Motortyper

Naturgas kan användas som bränsle i både diesel och ottomotorer. Naturgasens höga oktantal gör den emellertid mera lämplig som bränsle i ottomotorer än i dieselmotorer [2].

Vid bruk av naturgas i dieselmotorer måste man använda sig av höga kompressionsgrader eller stödbränsle (t. ex. 10 % dieselolja) som tändhjälp.

1.2.1 Ottomotorer

De ottomotorer som kommer ifråga för stationär elproduktion är byggda på ett tyngre sätt än motorer för traktionärt bruk. I sitt yttre utseende liknar de därför i hög grad dieselmotorer av fartygstyp, men är alltså utrustade med tändstift. Den yttre likheten med dieselmotorer blir naturligtvis desto större när motorerna är tillverkade i verkstäder där man annars bygger dieselmotorer och man använder sig av samma principer för konstruktion av vevhus, cylinderblock, vevaxlar etc.

Några av de mera kända tillverkarna är:

Bergen Diesel
Caterpillar
Jenbacher
Wärtsilä Diesel

Motorerna används som delar i kraftvärmeverk som ibland byggs samman av motorleverantören men som också ibland byggs samman av fristående entreprenörer.

Ottomotorer kan indelas i olika grupper alltefter stökiometrin vid förbränningen i motorn. I en grupp sker förbränningen vid nära stökiometriska förhållanden dvs så att luft- och bränslemängderna nära motsvarar varandra. Så är fallet i vanliga bilmotorer. För att få högre verkningsgrad kan man istället arbeta med betydligt mindre bränsle och mer luft. Man talar om ”mager” förbränning och ”lean burn” motorer.

Denna senare typ av motorer har på senare tid tagit en allt större del av marknaden för stationära naturgasdrivna motorer och typen utvecklas snabbt för närvarande. Bland fördelarna kan nämnas:

- hög verkningsgrad
- låg emission av NO_x

För att tända den magra bränsle- luftblandningen använder man sig ofta av någon typ av förkammare där initiering av förbränningen sker under nära stökiometriska förhållanden.

1.3 Avgasemissioner

I kolvmotorer sker förbränning under hög temperatur och högt tryck när kolven är i ett inre läge. Kolven går sedan utåt varvid både tryck och temperatur snabbt minskar. Den kemiska reaktionen får därigenom ett intensivt men kortvarigt förlopp. Detta gör att avgaserna från förbränningsmotorer ur miljösynpunkt generellt är sämre än avgaser från stationär förbränning i pannor och dylikt.

Särskilt besvärliga blir avgaserna från oljedrivna dieselmotorer. Naturgasdrivna motorer, och då särskilt lean burn-varianten, är ur denna synvinkel betydligt bättre, men har i princip samma problem, om än i mindre grad.

De ur miljösynpunkt viktigaste beståndsdelarna i avgaserna är:

- rök, dvs partiklar och droppar i aerosolform
- lukt och oförbrända gaser (CO, HC)
- kväveoxider

Bränslet och smörjoljan innehåller svavel och detta kommer ut som försurande svaveloxider.

1.3.1 Rök

Naturgas är ett så rent bränsle och består av så små molekyler att det normalt inte ger upphov till rök när det förbränns i en motor. Detta utgör en stark kontrast till situationen vid förbränning av olja i en dieselmotor.

I naturgasmotorn används emellertid smörjolja, bland annat för smörjning och tätning mellan cylindrar och kolvar. En del av denna smörjolja rycks med av gasströmmarna i motorn och kommer i halvförbränt tillstånd ut med avgaserna. Oljan bildar en aerosol som inte är särskilt tät och ibland inte ens synlig. En del av aerosolen faller dock ut i närheten av avgasutsläppet och kan bilda en tjäraktig och oljig beläggning.

Ur hälsosynpunkt är röken naturligtvis tvivelaktig och är en av anledningarna till att man vanligtvis släpper ut avgaserna på ganska hög höjd via en skorsten.

1.3.2 Oförbrända gaser

Det kortvariga förbränningsförloppet i cylindern gör att bränslet inte hinner reagera färdigt. Det gör att avgaserna innehåller både kolmonoxid och en del helt oreagerat bränsle. I en undersökning av danska elproducerande gasmotorer fann man att i medeltal 4,1 % av det tillförda bränslet kommer ut oförbränt i avgaserna [1]. Värdena varierar kraftigt mellan olika motorer, men inga uppvisar fullständig förbränning [5]. I en del fall sker spolningen (bortförsel av avgaser och tillförsel av ny luft-bränsleblandning) i cylindrarna på ett sådant sätt att en del bränsle passerar rakt igenom och går direkt ut i avgassystemet utan förbränning.

För "lean burn" motorer gäller att den termodynamiska verkningsgraden ökar vid ökande luftöverskott. Samtidigt gäller emellertid att förbränningsverkningsgraden i cylindrarna också minskar vid tilltagande luftöverskott. Optimum i resulterande verkningsgrad fås då vid ett visst mått av oförbränt i avgaserna.

Det oförbrända i avgaserna har huvudsakligen samma sammansättning som den tillförda naturgasen. Det består därmed till största delen av metan. Se tabell 1.1.

Metanet är färg-, gift- och luktfritt och innebär ingen omedelbar olägenhet. Däremot är metan en av de gaser som har stor inverkan på atmosfärens växthuseffekt, vilket gör att utsläppen av metan från naturgasdrivna motorer är ett bekymmer ur global miljösynpunkt.

Tabell 1.1 Sammansättning hos olika typer av naturgas - riktvärden [2].

Typ av naturgas	Dansk	Tysk nordsjögas	Rysk exportgas	Norsk
Analys (%)				
Metan CH ₄	90,5	84,4	>92	82
Etan C ₂ H ₆	5,3	9,2	<4	13,4
Propan C ₃ H ₈	0,9	2,6		1,7
Butan C ₄ H ₁₀ inkl tyngre kolväten	1,2	0,9		0,6
Koldioxid CO ₂	0,7	1,6	<1	1,0
Kväve N ₂	0,3	0,9	<2	1,3
Undre värmevärde (MJ/Nm ³)	39,3	39,9	>33,2	40,4

Enligt olika uppskattningar skulle varje metanmolekyl som släpps ut i atmosfären ge ett bidrag till växthuseffekten som är mellan 25 och 60 gånger större än vad som skulle ha blivit fallet om metanmolekylen istället förbränts och bildat en molekyl koldioxid. Sett ur detta perspektiv innebär alltså utsläpp av oförbränt metan från naturgasdrivna motorer i storleksordningen 4 % av tillfört bränslen (se avsnitt 1.4 nedan) större miljömässig belastning än det samtidiga utsläppet av koldioxid.

Kolmonoxiden i avgaserna omvandlas ganska snart till koldioxid i atmosfären och har inte samma fjärr- och långtidsverkan på miljön. Den är emellertid akut giftig för den som andas in den.

Vid drift på ren naturgas är luktproblemen med avgaserna ringa. Däri skiljer sig dessa motorer starkt från oljedrivna dieselmotorer där bildade aldehyder och andra förbränningsrester ger upphov till en stark och irriterande lukt. Ibland körs dock naturgasmotorer med inblandning av biogas från olika ty-

per av fermenteringsanläggningar. I vissa fall kan biogasen ha en mycket stark lukt som i olyckliga fall återfinns även i motorns avgaser. Risk för detta uppstår särskilt vid rötning av slakteriavfall.

1.3.3 Kväveoxider

Vid upphettning av luft till de temperaturer som råder i en flamma kan kväve och syre i luften reagera till olika kväveoxider. Detta sker i större eller mindre utsträckning i alla förbränningsmotorer. Kväveoxiderna utgör en direkt olägenhet i närheten av avgasutsläppen och innebär även en miljöbelastning som sträcker sig ut över större områden.

Kväveoxider bildar surt nedfall som kommer ned med regn och bidrar till övergödning. Tillsammans med kolväten bildar de i atmosfären både ozon och andra sk fotokemiska oxidanter, som verkar hämmande på växters utveckling.

1.4 Danska mätningar

Man har i regi av Danskt Gastekniskt Centrum gjort och sammanställt mätningar gällande avgasernas sammansättning vid ett stort antal installationer i Danmark där man använder gasmotorer för el- och värmeprö-

duktion [1]. Som synes av sammanställningen i figur 1.2 varierar förhållandena mellan olika installationer. Sammanställningen gäller också motorer som skiljer sig mycket både vad storlek och konstruktion beträffar. Som medeltal för installationerna i Danmark fann man att 4,1 % av det tillförda bränslet går oförbränt ut med avgaserna.

1.5 Wärtsilä lean burn motorer

Ett koncept för att få hög elverkningsgrad och samtidigt låga emissionsnivåer av framför allt kväveoxider som man har experimenterat med på olika håll i världen är att låta förbränningen i en Ottomotor ske vid stort luftöverskott. Bränsle- luftblandningen i motorn är alltså mager och det engelska uttrycket lean burn används ofta.

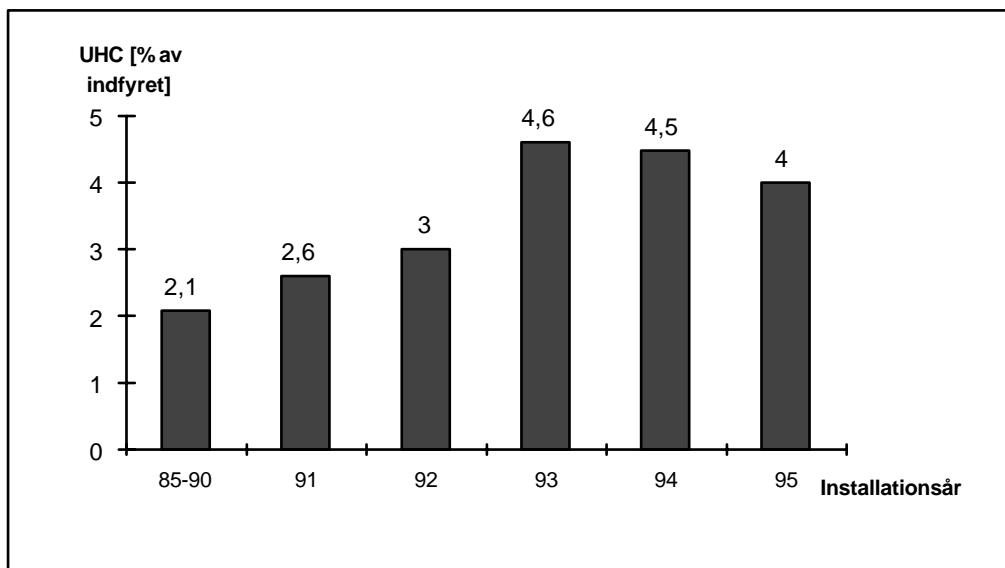
Den stora inblandningen av luft ger ökad mängd arbetsmedium i förhållande till i processen omsatt värme, vilket termodynamiskt medför en bättre verkningsgrad vid de kompressionsförhållanden som används. Det ger samtidigt en lägre förbränningstempe-

ratur och därmed mindre bildning av kväveoxider.

I tabellerna 1.2 och 1.3 ges data för ett par av Wärtsiläs motorer. Det ena kan betraktas som en standardmotor medan den andra är optimerad för att ge så låga emissioner av kväveoxid som möjligt.

Det är intressant att se att den lägre förbränningstemperaturen vid optimering mot lägre utsläpp av kväveoxider också leder till att mängden oförbrända kolväten i avgaserna ökar. De oförbrända kolvätena har i huvudsak samma sammansättning som det tillförda bränslet och består därmed till större delen av metan.

Detta belyser att en av svårigheterna med lean burn konceptet är att få förbränningen att starta och förlöpa på avsett vis. För att underlätta tändningen använder man en förkammare med fetare blandning där själva antändningen sker. Bränsleblandningen i huvuddelen av cylindern tänds sedan av flammen från förkammaren. Vid riktigt höga luftöverskott får man misständningar och dålig funktion.



Figur 1.2 Medelvärden av utsläppen av oförbrända kolväten från motorer i Danmark, fördelat på installationsår (källa: DGC ref 1.)

Tabell 1.2 Anläggning för produktion av el och värme baserad på Wärtsilä motor W16V25GS

PLANT SPECIFICATION					
Number of engines		1			
Engine Type		Wärtsilä 16V25SG	1 000 rpm		
Frequency	Hz	50			
Fuel		Natural Gas			
Lower Heat Value	kJ/m ³ (n)	35 500			
Pressure	bar,a	> 4			
Methane number		85			
Heat Recovery Type		Heat with Effective boiler			
Auxiliary Cooling Type		No Auxiliary Cooling			
Generator Voltage, power factor	V	11 000	0,80		
SITE REFERENCE CONDITIONS					
Altitude	m	20			
Suction air inlet temperature	C	25			
Ambient temperature	C	min 0	max 35		
Raw Water Temperature	C	28			
PLANT PERFORMANCE					
Electrical Production, net	kW		Gen-Set	Plant	
Gasengine-set	kW	2 800		2 790	
Paracitics	kW			- 10	
	kW				
Heat Production				3 620	
Heat	kW	3 620		3 620	
return water	C	50			
supply water	C	90			
Exhaust gas temp to stack	C	82			
Fuel Consumption	kW	7 180		7 180	
tolerance +/- 1 %	kJ/kWhe	9 230		9 260	
Electrical Efficiency		39,0 %		38,9 %	
Heat Efficiency		50,4 %		50,4 %	
Total Efficiency		89,4 %		89,3 %	
EMISSIONS					
O ₂	vol-%	g/kWh(e)	ppm	mg/m ³ (n)	mg/MJ
NO _x , calculated as NO ₂		1,5	82	155	165
CO		2,8	245	826	300
NMHC, calculated as C ₃ H ₈		1,5	85	457	166
CONSUMABLES					
Lube oil consumption	kg/h		Gen-Set	Plant	
			2,8	2,8	

Tabell 1.3 Anläggning för produktion av el och värme baserad på Wärtsilä motor W16V25GS, Low NO_x

PLANT SPECIFICATION					
Number of engines		1			
Engine Type		Wärtsilä 16V25SG 1 000 rpm, Low NO _x			
Frequency	Hz	50			
Fuel		Natural Gas			
Lower Heat Value	kJ/m ³ (n)	35 500			
Pressure	bar,a	> 4			
Methane number		85			
Heat Recovery Type		Heat with Effective boiler			
Auxiliary Cooling Type		No Auxiliary Cooling			
Generator Voltage, power factor	V	11 000	0,80		
SITE REFERENCE CONDITIONS					
Altitude	m	20			
Suction air inlet temperature	C	25			
Ambient temperature	C	min 0	max 35		
Raw Water Temperature	C	28			
PLANT PERFORMANCE		Gen-Set	Plant		
Electrical Production, net	kW		2 690		
Gasengine-set	kW	2 700	2 700		
Paracitics	kW		- 10		
	kW				
Heat Production	kW		3 590		
Heat	kW	3 590	3 590		
return water	C	50			
supply water	C	90			
Exhaust gas temp to stack	C	82			
Fuel Consumption	kW	7 110	7 110		
tolerance +/- 1 %	kJ/kWhe	9 480	9 510		
Electrical Efficiency		38,0 %	37,8 %		
Heat Efficiency		50,5 %	50,5 %		
Total Efficiency		88,5 %	88,3 %		
EMISSIONS		g/kWh(e)	ppm	mg/m ³ (n)	mg/MJ
O ₂	vol-%		15	5	
NO _x , calculated as NO ₂		0,9	44	243	90
CO		4,2	358	1 207	447
NMHC, calculated as C ₃ H ₈		2,1	113	609	225
CONSUMABLES		Gen-Set	Plant		
Lube oil consumption	kg/h	2,7	2,7		

2. Projektbeskrivning

Avsikten med projektet har varit att prova möjligheten att använda den regenerativa teknik, som utvecklats för att destruera lösningsmedel i industriell ventilationsluft, på avgaserna från en naturgasdriven motor. Flera olika aspekter på detta skulle studeras:

2.1 Oförbrända kolväten

I första hand gäller det att undersöka förmågan att förbränna de oförbrända kolväten, huvudsakligen metan, som avgaserna innehåller. Frågeställningen har två aspekter. Den ena är hur anordningen kan minska emissionen av kolväten från motorn. Den andra är hur anordningen kan omvandla den kemiskt bundna energin i dessa kolväten till värme och därmed öka totalverkningsgraden hos en anläggning för samproduktion av elektricitet och värme.

2.2 Kväveoxider

Uppvärmningen till förbränningstemperatur i sandbädden innefattar att gasblandningen passerar det temperaturområde där en s k SNCR reaktion mellan kväveoxider och ammoniak skulle kunna äga rum. Effekten av en ammoniaktillsats till avgasen före behandling i reningsanordningen skulle därför undersökas.

2.3 Drifterfarenhet

Syftet var att undersöka anläggningens funktion inte bara vid ett enstaka mättillfälle utan också att samla driftserfarenheter och se om funktionen hade tendenser att variera med tiden.

2.3.1 Avsättningar i bädden

En betydelsefull sak för applikation i kommersiellt bruk är om det med tiden skulle bildas någon typ av avlagring av till exempel tjära, koks eller sot i bädden. För att undersöka detta skulle utrustningen köras för att samla så mycket drifttid som möjligt.

3. Experimentell uppställning

Experimentella försök gällande rening av avgaserna från en naturgasdriven lean burn motor gjordes vid en av Göteborg Energi ägd motor-elgenerator installation vid Lindholmen i Göteborg.

Den använda reningsanordningen tillverkades för ändamålet av Grace TEC AB i Göteborg efter de principer man normalt använder för rening av ventilationsluft från lösningsmedel.

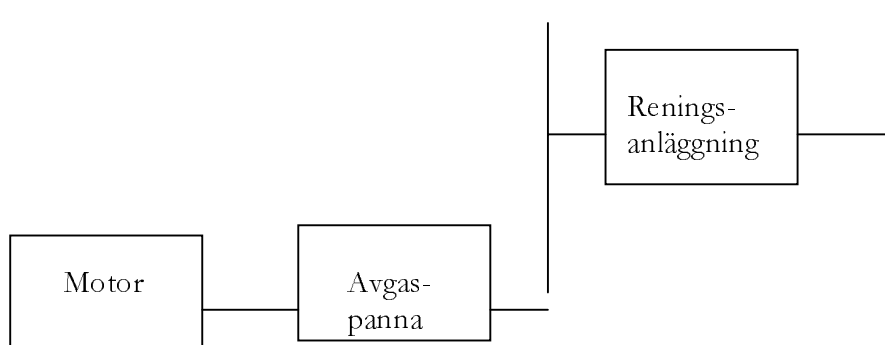
3.1 Uppställning

Motorinstallationen på Lindholmen är gjord i bottenplanet på en laborations- och lektions-salsbyggnad i anslutning till en värmecentral för området. Utrymmet där motorn är installerad är fullt utnyttjat av motor, ljuddämpare, avgaspanna etc och installation av reningsanläggningen fick göras i det närliggande rum där värmecentralens naturgaseldade pannor är placerade. Reningsanordningens kapacitet var tillräcklig för att behandla mellan 1/3 och hälften av motorns avgaser.

3.1.1 Utläggning

Systemutläggningen framgår av fig 3.1. Det begränsade utrymmet på platsen gjorde att det mest praktiskt att ansluta en kanal till reningsanordningen från motorns avgaskanal efter det att avgaserna kylts i den befintliga avgaspannan. Temperaturen hos avgaserna när de kom fram till reningsanordningen var ca 100°C. Efter rening fick avgaserna gå ut via en av gaspannornas avgaspipor i befintlig skorsten.

Reningsanordningen arbetade alltså med en utsugen delström av motorns avkylda avgaser. Detta gjorde det möjligt att variera flödes hastigheten genom reningsanordningen oberoende av motorn. Reningsanordning och motor kunde också köras oberoende av varandra vilket var en stor fördel. Motorn användes dels för elproduktion och dels i Wärtsilås regi för en del testkörningar och utprovning av ny teknik. Den hade ett av reningsförsöken oberoende och delvis svårprognostiserat körschema. Reningsförsöken pågick dygnet runt och långa tider utan tillsyn.



Figur 3.1 Utläggning av försöksanläggningen

Anslutningen av reningsanordningen till motorns avgaskanal var utformad som en ren T-anslutning och fungerade bra utan användning av spjäll när motor eller reningsanordning vid körning utan övervakning eventuellt stannade. Om motorn stannade utan att reningsanordningen stängdes av, sög denna bara luft baklänges genom avgaskanalen och behandlade denna luft på samma sätt som om den varit avgas. Motorn kunde alltså alltid startas eller stannas utan hänsyn till reningsanordningen och vice versa.

Tillsättning av ammoniak till gasströmmen in till reningsanläggningen kan ske från en gastub. En magnetventil kopplad till anläggningen gjorde det möjligt att avbryta doseringen av ammoniak i samband med växling av flödesriktning genom förbränningsbädden. Detta gjordes för att förhindra ammoniak från att passera förbi reningsanläggningen i växlingsögonblicket och den därmed sammanhängande ”puffen” av orenat flöde.

3.1.2 Motor

Den använda motorn är en Wärtsilä W6R25SG, en 1 MW turboöverladdad rak sexcylindrig lean burn motor för naturgas. Motorn arbetar vid 1000 varv/min och driver en elgenerator som är ansluten till elnätet. Spillvärme från motorn tas tillvara och matas ut i ett lokala fjärrvärmenät. En närmare beskrivning av motorn finns i Bilaga B.

3.1.3 Reningsanordning

Den använda reningsanordningen är en Grace TEC 0112/2-G3-22FD-LT med gasdoseringsutrustning, växelspjällanordning och fläkt med elektronisk varvtalsreglering. Konstruktionen är avsedd för rening av industriell ventilationsluft från lösningsmedel.

Funktionen bygger på att värma luften till en temperatur av ca 1 000°C varvid föroreningarna oxideras till vatten och koldioxid. Upp-

värmningen följs av en omedelbar kylning och återvinning av värme till processen. Återvinningen är så god att man efter start normalt inte behöver tillsätta mer värme. Det värme som utvecklas vid oxidationsreaktionen räcker i allmänhet för att upprätthålla arbetstemperatur i bädden. Principen bygger alltså på att det finns syre i överskott i den gasblandning som behandlas. Detta villkor uppfylls med råge såväl i avgaserna från en lean burn motor som i ventilationsluften från en måleriprocess.

Det värme som bildas vid den exoterma oxidationsreaktionen räcker normalt för att behålla arbetstemperaturen. Skulle emellertid koncentrationen av brännbar substans bli för låg kan detta kompenseras genom tillsats av naturgas i luften innan den går in i anläggningen.

Den använda reningsanläggningen är utrustad med en anordning för detta. Tillsats av gas sker när temperaturen i förbränningsbädden underskrider ett inställt börvärde.

Vid koncentrationer av brännbara föroreningar som överstiger det som behövs för så kallad autoterm drift stiger temperaturen i förbränningsbäddens centrum bara högst obetydligt. Däremot inlagras värme i bädden och temperaturprofilen breddas. En större del av bädden får maximitemperatur och utgående gastemperatur ökar.

Reningsanordningen är försedd med överhettningsskydd som stänger av anläggningen om utgående gastemperatur skulle bli för hög.

Den har därigenom förmåga att behandla gasblandningar med en medelhalt av brännbar substans varierande mellan motsvarande 0 och 8 gram metan per kubikmeter luft. Under korta tider (< 5 min), medan värme åtgår för breddning av temperaturprofilen, kan betydligt högre halter accepteras.

Flödet genom reningsanordningen regleras genom varvtalsreglering av fläkten med hjälp

av en så kallad frekvensomformare kopplad till den elektriska motorn. Härigenom kan flödet ställas in mellan 0 och ett maximalt flöde av ca 3500 normalkubikmeter per timme. Det maximala flödet begränsas uppåt av att tryckfallet över bädden med en viss säkerhetsmarginal inte får överskrida bäddens egen vikt/tvårsnittsarea. Högre flöden än så ger fluidisering och omblandning i bädden så att den önskade temperaturprofilen och värmeåtervinningsmekanismen förstörs.

Ritning över anläggningen och P&I-diagram finns i Bilaga C.

Förbränningsbädden var cylinderformad med en diameter av 1 m och en bäddhöjd av 1,2 m. Som bäddmaterial användes bränd och krossad chamottelera i storleksintervallet 3-5 mm partikelstorlek.

Vid normalt använd flödes hastighet om 2000 m³/tim genom bädden var tryckfallet över bädden 4,2 kPa.

3.1.4 Instrumentering

Temperaturmätningar såväl i bädden som i gaskanaler är gjorda med termoelement typ K (cromel-alumel) kapslade i höljen av inconnel. Avläsning av spänningen från termoelementen, kompensering för kalla lödställets temperatur och omvandling till temperatur, gjordes automatiskt av tillkopplade instrument.

Gasflödesmätningar gjordes med pitotrör och en elektronisk tryckmätare av fabrikat Testoterm, typ 452. Flödes hastigheten mättes på flera ställen över ett tvärsnitt i kanalen varefter medelvärdesbestämning, temperaturmätning och tvärsnittsarea gav flödet.

Kolvätehalter mättes med ett FID-instrument Bernath Atomic typ 3005. Det kalibrerades med certifierad kalibrergas från AGA innehållande 801 vol ppm propan. Det

visar totalolvätehalten och användes för mätning av reningsgraden genom mätning före och efter reningsanläggningen. Samma mätinstrument användes för bägge dessa mätningar, vilket ger ett gott mått på reningsgraden även om instrumentet skulle ha lite olika respons för olika sorters kolväten och kalibreringen kanske inte skulle ge helt rättvisande absolutvärden. Den helt övervägande delen av det oförbrända var metan och erfarenheter från andra tillämpningsområden är att utgående oförbränt har samma proportionella sammansättning som ingående brännbart; med lika reduktion oberoende av ämne. Detta sammanhänger med att det som verkligen går igenom förbränningsbädden förbränns helt, medan det, som ventileras förbi vid ändring av flödesriktning eller som läcker igenom vid spjällmekanismen, inte förbränns alls.

Kväveoxider mättes med ett instrument byggande på principen med chemoluminisens: Tecan CLD 502 med konverter, som gjorde det möjligt att skilja på NO och NO₂. Kalibrering, som får göras ofta med detta instrument, gjordes med certifierad kalibrergas från AGA innehållande 86,2 ppm NO och 6,3 ppm NO₂.

Ammoniaktillsats mättes med en rotameter av fabrikat Platon med utbytbara rörgraderade för ammoniakflöden av 0 - 7 och 0 - 17 l/min. Att ingen ammoniak överlevde behandlingen i reningsanordningen konstaterades genom mätning med Dräger-rör.

Driftsövervakning av reningsanläggningen har kunnat ske på avstånd via ett telefonmodem som på anläggningen varit ansluten till en datalogger där driftsdata för de senaste dygnen ligger sparade.

Noggrannheten hos de olika mätningarna har uppskattats i tabell 3.1.

Tabell 3.1 Mätnoggrannhet

Gasflöden		$\pm 5\%$ av uppmätt värde
Kolvätehalt	absolutvärden	$\pm 20\%$ av uppmätt värde
”-	relativvärden	$\pm 3\%$ av uppmätt förhållande
Kväveoxidhalt	NO + NO ₂	$\pm 3\%$ av uppmätt värde
”-	fördelning NO/NO ₂	$\pm 20\%$ av uppmätt förhållande
Temperatur		$\pm 1\%$ av uppmätt värde

4. Resultat

Reningsanordningen har körts ihop med motorn under sammanlagt ca 6000 timmars drift fördelade över 2 års kalendertid. Efter intrimning och anpassning till de höga halter oförbränt som ibland kommit med avgaserna (se driftserfarenheter nedan) har anläggningen uppvisat god driftsäkerhet och visat sig kunna fungera väl utan tillsyn eller åtgärder veckotal i sträck.

4.1 Kolväten - 95 % rening

Halterna av totalkolväte in och ut ur anläggningen mättes med FID ett stort antal gånger under försökstiden. När motorn fungerade normalt vid fullast låg den totala halten kolväten i avgaserna i området 1000 - 1800 ppm (räknat som CH₄).

Reningsgraden för kolväten befanns ligga konstant under huvuddelen av försöksperioden och var 95 ± 1 %, oberoende av ingångshalten.

Under en veckas tid minskade dock reningsgraden successivt ned mot 85 %, vilket berodde på felfunktion och läckage i ett av spjällen. Efter justering återgick reningsgraden till det normala. Någon generell tendens till att reningsgraden skulle minska med drifttiden kunde inte märkas.

Mätningar av kolvätereduktion hos anläggningen gjordes också 96-11-19 av Lis Jacobsen och Brian Schmidt från DGC (Danskt Gastekniskt Center). Man använde både FID och tog påsprover som sedan analyserades i gaskromatograf. Man uppmätte en reningsgrad av 94,8 %. Inom mätnoggrannheten var reningsgraden lika för olika kolväten [3].

Resultaten ligger i linje med resultat från tidigare mätningar på liknande utrustning för rening av ventilationsluft från lösningsmedel.

Förbränningsgraden för det som passerar bädden är mycket hög och det som gör att hela anläggningens destruktionsgrad är lägre är dels läckage mellan anläggningens in- och utlopp och dels att det vid varje skifte av flödesriktning genom bädden går ut en "puff" av orenad gas från spjällanordningen och det som före skiftet tjänade som fördelningskammare för ingående flöde.

4.2 Kväveoxider

Behandling i reningsanordningen gav ingen nämnvärd reduktion av den totala halten av kväveoxid.

Eftersom avgasen från motorn först kyldes i en avgaspanna och sedan transporterades ganska långt fram till reningsanordningen hade en del av innehållet av NO omvandlats till NO₂ innan det kom fram till reningsanordningen. Vid passage genom reningsanordningen omvandlades det tillbaka till NO igen. Typiska mätdata var:

Ingående avgas (ppm):

NO	NO ₂	totalt NO _x
100	55	155

Utgående behandlad avgas (ppm):

NO	NO ₂	totalt NO _x
151	4	155

Mätning skedde efter att gasen sugits en ganska lång väg fram till mätinstrumentet (tid ca 5 sek) och en del NO kan alltså ha hunnit reagera tillbaka till NO₂ före mätningen. Omvandlingen av NO₂ till NO kan alltså ha varit ännu mer fullständig än vad dessa data visar.

Vid dosering av ammoniak till avgasen innan den kom in i reningsanordningen skedde för små tillsatser (< 25 ppm) möjligen en viss minskning av totalhalten av kväveoxider

(maximal minskning ~10 ppm), men dessa resultat var aldrig reproducerbara. Vid höga ammoniaktilfsatser ökade istället totalhalten NO_x av behandlingen i reningsanordningen

Den här uppmätt dåliga reningsgraden avviker från de resultat som tidigare erhållits vid behandling av avgaser från en oljeeldad dieselmotor, där reduktionsgrader upp över 90 % kunnat uppnås. Den viktigaste skillnaden torde vara att man i dieselfallet hade en ingående halt av NO₂ som var ungefär en tio gånger högre än halten kväveoxider från den aktuella gasmotorn. En modelleringsstudie av de kemiska reaktionerna som gjorts av Bent Karll och P G Christensen vid DGC stöder detta [4].

4.3 Avlagringar

Under de två tre första veckornas drift ökade tryckfallet genom bädden med omkring 10 %. Samtidigt sjönk bäddytan något. Efter detta initialskede då bädden packade sig kunde sedan ingen förändring av tryckfallet över bädden märkas under försökstiden. Detta ligger helt i linje med erfarenheterna från andra användningsområden.

Efter ca 4000 timmars drifttid fick anläggningen svalna ner för inspektion av bäddmaterialet. Så när som på en viss förändring av kulören på de partiklar som legat i de varmare delarna av bädden kunde inga effekter av driften konstateras. Inte vid något djup i bädden fanns något skikt med koks eller sotavlagringar. Incidenten med olja i avgaserna (se nedan under driftserfarenheter avsnitt 4.5.2) lämnade inga spår i bädden. Färgskiftningen från grått till gult torde bero på en oxidering av järn i chamottmaterialet och är en reaktion som är väl känd från den keramiska industrin.

4.4 Energiförbrukning

Energiförbrukningen för att under drift hålla förbränningsbäddens inre i drifttemperatur

täcktes normalt ganska precis av det förbränningsvärme som utvecklades vid förbränningen av det oförbrända i avgaserna.

Bädden uppvisade sådan autoterm drift ned till halter motsvarande 1300 ppm metan. Detta motsvarar vid förbränning en adiabatisk temperaturökning hos avgaserna av 35°C. Det mesta av detta kunde återfinnas som en höjning av avgastemperaturen vid passage av reningsanordningen. Eftersom anläggningens övre och undre luftskåp, spjällanordning och kanaler till och från anläggningen var oisolerade skedde där en viss avkylning och en normal uppmätt temperaturskillnad över reningsanläggningen var ca 30°C.

Nogranna mätningar av detta var svåra att göra då driftsförhållandena hela tiden varierade. Den termiska responstiden för bädden rör sig om flera timmar och utloppstemperaturen varierar hela tiden under tidscykeln för växling av flödesriktning genom bädden.

När motorn gick trimmad för lägsta halt av oförbränt räckte ibland halten av oförbränt i avgaserna inte till. Temperaturen i förbränningszonen i bädden sjönk då under inställt börvärde varvid naturgas doserades in i avgaserna strax före reningsanordningen. Några stora mängder naturgas behövdes aldrig när motorn gick. Den maximalt uppmätta förbrukningen under ett sådant dygn var 10,7 m³.

4.5 Driftserfarenheter

Den långa drifttiden ihop med en verklig motor i produktionsdrift med tillhörande start, stopp och underhåll gav en del oväntade driftserfarenheter. Att motorn också användes för utprovning av olika nya komponenter och körsätt bidrog ytterligare till erfarenheterna.

4.5.1 Höga halter av oförbränt

Det visade sig att motorn under ett normalt startförlopp från kallt tillstånd gav ifrån sig höga halter av oförbränt i avgaserna. Ett standard startförlopp som det styrdes av motorns kördator kunde ha en längd av 15 till 30 minuter. Under denna tid kunde halten av oförbränt i avgaserna tidvis uppgå till motsvarande 1 % metan.

Detta ger vid förbränning en temperaturhöjning av 250°C. Det motsvarar en utloppstemperatur av 350°C från reningsanordningen. Det mesta av det utvecklade värmemet absorberades av bädden, men om startförloppet blev alltför långdraget kunde detta så småningom resultera i att utloppstemperaturen från reningsanordningen ökade upp till så höga värden att anläggningens överhettningsskydd löste ut. Efter justering av detta till att acceptera 250°C och en diskussion med motorns driftpersonal kunde man sedan normalt starta motorn utan att svårigheter uppstod i reningsanläggningen.

Upprepade startförsök under kort tid när något krånglade i motorn kunde dock fortfarande driftstopp i reningsanläggningen.

Denna gick då över i ett beredskapsläge utan flöde och med avstängd fläkt. När avgaserna från motorn var normala igen kunde man då slå över i drift.

Vid körning på låglast gav motorn också höga halter av oförbränt i avgaserna. Enligt Wärtsilä berodde detta på att driftsparametrarna för låglastdrift inte var optimerade. Man kör normalt inte en elproducerande motor av detta slag på annat än fullast.

4.5.2 Oljeaerosol

Motorn användes förutom för elproduktion även för utprovning av olika motorkomponenter. Vid en incident som varade i två veckor uppstod något fel som innebar att smörjolja från motorn kom ut i avgaserna i

mycket större mängder än normalt. I brist på utrustning kunde några mätningar av hur mycket olja som kom med avgaserna inte göras.

Visuellt var skillnaden mot normaldrift mycket tydlig. Ur alla små läckor i fläkten och ledningen fram till anläggningen läckte det olja och bildade pölar på golvet. Uppskattningsvis kom det ut sammanlagt ca 5 l olja under perioden. Den mesta oljan gick dock in i reningsanordningen och destruerades där. Ingen olja sågs läcka ut genom de läckor som fanns i kanalen efter reningsanläggningen. Förmodligen var reningsgraden och destruktionsen gällande oljedimma lika stor som den uppmätta destruktionsen av gasformiga kolväten. Den lilla del av oljan som inte destruerades, förångades troligen i avloppskanalen efter anläggningen och gick i gasform ut i skorstenen.

5. Slutsatser

Reningsanordningen har provats ihop med en motor under varierande betingelser under lång tid. Den har därvid visat sig väl ägnad att rena motorns avgaser från oförbrända kolväten.

Rening av kväveoxider genom tillsättning av ammoniak och genomförande av en SNCR-process tycks inte fungera vid de låga halter av kväveoxider som är aktuella hos naturgasdrivna lean burn motorer.

En ökning av luftöverskottet i motorn ger en minskning av utsläppen av kväveoxider. Samtidigt sker emellertid en ökning av utsläppen av oförbrända kolväten. Tekniken fungerar bra för att destruera dessa. Även om direkt rening av kväveoxider alltså inte fungerar så ger möjligheten att ta hand om utsläppen av kolväten en frihet för

motorkonstruktören att öka luftöverskottet i motorn och den vägen minska utsläppen av kväveoxider. Ett ökat luftöverskott kan också samtidigt medföra en ökad axelverkningsgrad.

Den provade anläggningens värmeåtervinning matchade halten oförbränt i avgaserna ganska bra så att mycket lite extra naturgas behövdes för att vidmakthålla arbetstemperatur. En större bäddtjocklek i anläggningen skulle helt eliminera behovet av extra gas. Inget värme förbrukas emellertid i processen utan produceras tvärtom ur det oförbrända i avgaserna i samband med den exoterma förbränningsreaktionen.

Vid en installation av reningsanläggningen mellan motor och avgaspanna skulle detta värme kunna nyttiggöras i avgaspannan och därmed öka totalverkningsgraden för en anläggning för kombinerad produktion av el och värme.

6. Referenser

1. M Nielsen:
UHC/metan-emission fra gasmotorbaserede kraftvarmeinstallationer
Dansk teknisk Center
Klientrapport, Februar 1996.
2. J de Wit, A N Myken
Gaskvalitet i Nordeuropa
Gasteknik (DK) 4/1996
3. L Jacobsen:
Incineration of Exhaust from Wärtsilä NG Engine,
Danish Gas Technology Centre
Test Report February 1997.
4. B Karll och P G Kristensen:
Lean Burn Engines - Emission Reduction
Danish Gas Technology Centre,
Technical Note No. 1, March 1997.
5. J de Wit och M Nielsen
Emission of Unburned Hydrocarbons from Gas Engines for Cogeneration
4th Int Conf on Tech and Comb for a
Clean Environment, 7-10 July 1997,
Lisbon, Portugal



SE-205 09 MALMÖ • TEL 040-24 43 10 • FAX 040-24 43 14
Hemsida www.sgc.se • epost info@sgc.se
