

HUR BRA ÄR ENERGIGASER?

©Svenskt Gastekniskt Center - Oktober 2001



Corfitz Norén & Jörgen Thunell
SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB

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 eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

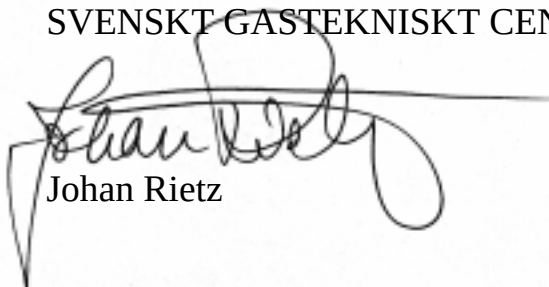
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC's hemsida www.sgc.se.

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, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydgas AB
Öresundskraft AB
Lunds Energi AB
Göteborg Energi AB
Birka Energi AB
Vattenfall Naturgas AB
Statens Energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

SAMMANFATTNING

Föreliggande studie avhandlar olika bränsledrivna applikationers aktuella teknikstatus. Studien behandlar ett antal olika moderna teknologier i några vanliga energitillämpningar samt presenterar data och egenskaper för var och en vid användning av olika bränslen. Ett antal applikationer inom områdena uppvärmning, kraftvärme, industriprocesser och fordon behandlas. Applikationerna återspeglar dagens bästa kommersiellt tillgängliga teknik.

Gasformiga bränslen kan användas i ett mycket stort antal tillämpningar som visas i föreliggande rapport. I de flesta tillämpningar som redovisas är gasbränslen det bästa alternativet om hänsyn tas till energi- och miljöprestanda. Även om naturgas och gasol är fossila bränslen som ger upphov till CO₂ emissioner kan de bidra till att reducera utsläppen av ett flertal föroreningar samt att höja produktivitet och verkningsgrad.

Utvecklingen för alla de studerade bränslena har gått mycket fort under de senaste åren. Man kan konstatera att energi- och miljöegenskaperna för applikationer drivna med olika bränslen är mycket bättre än för bara 10 år sedan men att många av de studerade applikationerna har en lång livslängd och att det tar lång tid innan dagens bästa teknik har slagit igenom i stor skala.

Gasbränslena är fortfarande det mest miljöriktiga alternativet eftersom energi- och miljöegenskaperna är bättre än för andra bränslen. Skillnaden i miljö- och energiprestanda mellan olika bränslen har dock minskat under den senaste 10-års perioden men fortfarande har gasbränslena klart bättre energi- och miljöegenskaper. Andra fördelar med gasbränslen är:

- Ett samhälle kan fungera till sin helhet baserat på gasbränslen. De kan användas för transporter, elproduktion, direkt i industrin, matlagning uppvärmning och klimatisering m.m. Inga andra bränslen kan visa upp en sådan mångfald bland användningsområdena.
- Gasbränslen har en självskriven roll i ett energisystem som baseras på en mångfald av bränslen. Genom att gasbränslen utgör en del av den svenska energitillförseln undviks sårbarheten i ett samhälle där större delen av energitillförseln utgörs av ett och samma bränsle.
- I ett par applikationer kan det också konstateras att det mest realistiska alternativet till el är gasformiga bränslen.

SUMMARY

This study deals with state-of-the-art technologies for burners, vehicles (city buses and cars), gas turbines, stationary engines, high-temperature furnaces and drying applications. For each of the different applications, data concerning energy performance and environmental impact have been collected for different fuels and are presented.

Natural gas and LPG are fossil fuels but despite the CO₂ emissions, both fuels can be used to increase efficiency and productivity and to reduce other emissions such as: CO, NO_x and particles. High efficiency and low emissions are achieved in all the studied applications when gaseous fuels are used. When biogas is used, the CO₂ emissions are zero.

During the recent years, the performance of technologies fired with gaseous and other fuels (oil, gasoline, diesel and biomass) has increased considerably. Though, gaseous fuels are still the best choice for lowest environmental impact and highest efficiency.

Another advantage of gaseous fuels today is the multitude of applications where they can be utilized. No other fuels can be used in as many different applications as gaseous fuels; for example, biomass cannot be used for high-temperature combustion applications.

SAMMANFATTNING.....	i
SUMMARY	ii
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	iii
FÖRKORTNINGAR OCH ENHETER.....	vi
1 INLEDNING.....	1
1.1 SYFTE.....	1
1.2 OMFATTNING.....	1
1.3 METODIK.....	3
1.4 BRÄNSLEFAKTA	3
1.4.1 Naturgas	3
1.4.2 Biogas	4
1.4.3 Diesel.....	4
1.4.4 Motorbensin.....	4
1.4.5 Gasol.....	4
1.4.6 Biobränsle.....	4
1.4.7 Olja	5
1.4.8 DME.....	5
1.4.9 Etanol.....	5
1.5 EMISSIONSFAKTA.....	5
1.5.1 Oreglerade emissioner.....	5
1.6 REFERENSER.....	6
2 NORMER, RIKTVÄRDEN OCH MÄRKNINGAR	7
2.1 GENERELLA KRAV	7
2.1.1 Svavel.....	7
2.1.2 Kväveoxider	9
2.1.3 Emissionsgränser för stoft	9
2.2 SMÅ OCH MEDELSTORA PANNOR.....	9
2.2.1 Verkningsgrad.....	9
2.2.2 Svanenmärkning.....	10
2.2.3 Blauer Engel märkning.....	11
2.3 FORDON.....	13
2.3.1 Testmetoder.....	12
2.3.2 Sverige och EU	12
2.3.3 Kalifornien.....	13
2.4 SAMMANFATTNING	14
2.5 REFERENSER.....	14
3 STADSBUSSAR OCH PERSONBILAR.....	16
3.1 MOTORTEKNIK.....	16
3.1.1 Stökiometrisk förbränning.....	16
3.1.2 Lean burn (magerdrift)	17
3.1.3 EGR.....	17
3.1.4 Hybriddrift	17
3.2 ALTERNATIVA DRIVMEDEL	18
3.3 FORDONS- OCH MOTORPRESTANDA.....	18
3.3.1 Bussar	18
3.3.2 Lätta fordon	19
3.4 TEKNIKUTVECKLING	20
3.4.1 Gasfordon.....	20
3.4.2 Hybridfordon	21
3.4.3 Bensinmotorn.....	21
3.4.4 DME.....	22
3.4.5 Dieselfordon.....	22
3.5 SAMMANFATTNING.....	23
3.6 REFERENSER	23

4	PROCESSVÄRME OCH UPPVÄRMNING – PANNOR OCH BRÄNNARE	25
4.1	UPPVÄRMNING I SVERIGE.....	25
4.2	BEGREPP	26
4.2.1	Pannverkningsgrad.....	26
4.2.2	Årsmedelsverkningsgrad.....	26
4.3	BRÄNNARTEKNIK FÖR GAS- OCH OLJEPANNOR	27
4.3.1	Atmosfärsbrännare för gas	27
4.3.2	Premixbrännare (förblandningsbrännare) för gas	27
4.3.3	Fläktgasbrännare för gas och olja.....	27
4.3.4	Katalytiska brännare för gas	27
4.3.5	Fiberbrännare för gas.....	27
4.3.6	Modulerande brännare för gas och olja.....	28
4.4	SMÅ VÄRMEPANNOR	28
4.4.1	Kringutrustning.....	30
4.4.2	Kaskadkoppling	30
4.4.3	Kondenserande och icke-kondenserande pannor	31
4.5	OLJE- OCH GASPANNOR.....	31
4.6	FASTBRÄNSLEPANNOR.....	32
4.6.1	Rostpannor.....	32
4.6.2	Fluidbäddspannor.....	33
4.6.3	Pannor med brännare.....	33
4.7	TEKNIK FÖR EMISSIONSMINSKNING	33
4.7.1	Svavelutsläpp	33
4.7.2	Kväveoxider (NOx)	33
4.7.3	Oförbrända kolväten.....	34
4.7.4	Koloxid (CO).....	35
4.7.5	Stoft.....	34
4.8	PRESTANDA FÖR MODERNA PANNOR OCH BRÄNNARE.....	35
4.9	UTVECKLINGSTENDENSER.....	37
4.9.1	Gaspannor	37
4.9.2	Oljepannor och oljebrännare.....	38
4.9.3	Fastbränslepannor eldade med biobränslen.....	39
4.9.4	Andra brännartyper	40
4.10	SAMMANFATTNING	41
4.11	REFERENSER.....	41
5	KRAFTVÄRME – GASTURBINER	43
5.1	TEKNIK	43
5.2	TEKNISK UTVECKLING	44
5.3	MILJÖASPEKTER	45
5.4	COGENERATION OCH KOMBIKRAFTVERK BASERADE PÅ GASTURBINER	48
5.5	EXEMPEL PÅ KOMMERSIELLA GASTURBINER.....	49
5.5.1	Mikrogasturbiner	49
5.5.2	Gasturbiner 1 – 4 MW	51
5.5.3	Gasturbiner 10 – 70 MW	52
5.6	UTVECKLINGSTENDENSER.....	54
5.7	SAMMANFATTNING	55
5.8	REFERENSER.....	55
6	KRAFTVÄRME – KOLVMOTORER.....	57
6.1	TEKNIK	57
6.2	MILJÖASPEKTER	59
6.3	KRAFTVÄRME BASERAD PÅ GAS- OCH DIESELMOTORER.....	61
6.4	EXEMPEL PÅ KOMMERSIELLA MOTORER	62
6.5	TEKNISK UTVECKLING	64
6.6	SAMMANFATTNING	66
6.7	REFERENSER.....	66

7	INDUSTRIPROCESSER.....	68
7.1	HÖGTEMPERATURUGNAR.....	68
7.1.1	Brännarkonstruktioner.....	70
7.1.2	Miljöaspekter.....	72
7.1.3	Aluminiumsmältugnar.....	77
7.1.4	Ugnar för värmning och värmebehandling.....	79
7.2	SAMMANFATTNING.....	84
7.3	REFERENSER.....	86
8	TORKNING	87
8.1	IR-TORKNING.....	88
8.2	TORKNING MED VARMLUFT ELLER AVGASER.....	89
8.3	TORKPROCESSER MED ÅNGA	90
8.4	LEVERANTÖRER AV TORKUTRUSTNING	90
8.5	SAMMANFATTNING	91
8.6	REFERENSER.....	91
9	SLUTSATSER.....	92
9.1	FORDON.....	93
9.2	PANNOR OCH BRÄNNARE	93
9.3	GASTURBINER.....	93
9.4	KOLVMOTORER	94
9.5	HÖGTEMPERATURUGNAR OCH TORKNING	94
	BILAGA 1 OMRÄKNINGSFAKTORER	96

FÖRKORTNINGAR OCH ENHETER

EGR	Exhaust Gas Recirculation	Avgasåterföring
LEV	Low Emission Vehicle	Miljöklassning av fordon (USA)
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle	Miljöklassning av fordon (USA)
SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle	Miljöklassning av fordon (USA)
EURO 1-5		Miljöklassning av tunga fordon (Europa)
Miljöklass 1-3		Miljöklassning av lätta fordon (Europa)
FTP	Federal Test Procedure	Testcykel för fordon (USA)
ECE R49	Economic Commission of Europe	Testcykel för fordon (Europa)
ETC	European Transient Cycle	Testcykel för fordon (Europa)
ESC	European Steady State Cycle	Testcykel för fordon (Europa)
HC	Hydro Carbons	Kolväten
THC	Total Hydro Carbons	Totalkolväten
UHC	Unburned Hydro Carbons	Oförbrända kolväten
OGC	Organische Gebundene Kohlenstoffen	Totalkolväten
NMHC	Non-Methane Hydro Carbons	Kolväten exklusive metan
NMOG	Non-Methane Organic Gas	Kolväten exklusive metan
CO		Koloxid
CO ₂		Koldioxid
NO _x		Kväveoxider
SO ₂		Svaveldioxid
O ₂		Syre
LPG	Liquefied Petroleum Gas	Gasol
CNG	Compressed Natural Gas	Komprimerad naturgas
LNG	Liquefied Natural Gas	Flytande naturgas
DME		Dimetyleter
ppm	Parts Per Million	Miljondelar
W _e		Eleffekt uttryckt i Watt
Nm ³		Normalkubikmeter, en kubikmeter vid normaltillstånd (0°C och 1,01325 bar)
rpm	Revolutions Per Minute	Varv per minut
λ		Lufttal
η		Verkningsgrad
g/MJ		Avser g förorening av ett visst ämne per tillförd MJ bränsleenergi
g/kWh		Avser g förorening av ett visst ämne per tillförd kWh bränsleenergi
För fordon gäller speciellt:		
g/km		Avser g förorening av ett visst ämne per fordonskilometer
g/kWh		Avser g förorening av ett visst ämne per kWh uträttat motorarbete

1 INLEDNING

Renheten hos gasformiga bränslen innebär ofta stora fördelar gentemot fasta och flytande bränslen, speciellt i förbränningstekniskt och miljömässigt hänseende. En annan fördel är ofta en högre verkningsgrad. I industriella sammanhang kan dessutom gasbaserade processer innebära högre produktivitet och högre produktkvalitet jämfört med processer baserade på andra bränslen.

Det pågår ständigt FoU för att göra tillämpningen av de gasformiga bränslena ännu effektivare och miljövänligare. Motsvarande FoU pågår emellertid även för övriga bränslen. Ett exempel är utvecklingen av miljövänlig förbränning i mindre fastbränsleeldade pannor och ett annat är utveckling av effektiv reningsutrustning för avgaser från bensinmotorer.

Det är därför angeläget att summera upp det tekniska och miljömässiga dagsläget gällande verkningsgrad, emissioner etc. för ett antal vanligt förekommande tekniker inom uppvärmnings-, industri- och fordonssektorn baserade på fasta, gasformiga och flytande bränslen.

1.1 SYFTE

Syftet med studien är att få fram en objektiv bild av olika bränslens för- och nackdelar och att kunna använda resultatet i diskussioner och ställningstaganden avseende val av bränsle. Studien behandlar ett antal olika moderna teknologier i några vanliga energitillämpningar samt presenterar data och egenskaper för var och en vid användning av olika bränslen.

1.2 OMFATTNING

Studien omfattar ett antal applikationer inom områdena uppvärmning, kraftvärme, industriprocesser och fordon. Applikationerna återspeglar dagens bästa kommersiellt tillgängliga teknik. För varje applikation belyses bl.a. följande:

- Verkningsgrad.
- Emissioner.
- Tillgänglighet.
- Pågående teknisk utveckling.
- Eventuella bonuseffekter (t.ex. CO₂ i växthus, kvalitetsförbättringar eller -försämringar av produkt).

De behandlade applikationerna är följande, där inom parantes anges det kapitel inom vilket respektive applikation behandlas.

Fordon (Kapitel 3)

Bussar i stadstrafik
Personbilar

Uppvärmning och processvärme (Kapitel 4)

Villapannor 10-30 kW
Värmepannor $\approx$ 500 kW
Hetvatten (ång)pannor $\approx$ 5 MW

Kraftvärme

Ångcykel (Kapitel 4)
Gasturbiner (Kapitel 5)
Kolvmotorer (Kapitel 6)

Högtemperaturprocesser (Kapitel 7)

Aluminiumsmältning
Värmning och värmebehandling

Torkning (Kapitel 8)

Inledningsvis görs också en översikt över de normer och riktvärden som gäller och kommer att gälla för effektivitet och emissioner från de aktuella applikationerna samt de olika miljömärkningar som förekommer för framförallt mindre värmepannor.

Vad gäller kraftvärme kan nämnas att i SGC:s regi pågår ett examensarbete som kommer att vara avslutat sommaren 2001. I detta examensarbete studeras mer ingående olika kraftvärmetekniker baserade inte enbart på traditionella ångcykler, gasturbiner och kolvmotorer utan även ny teknik såsom bränsleceller och stirlingmotorer. Tekniska, miljömässiga och ekonomiska uppgifter för olika bränslen och tekniker kommer att redovisas. Den intresserade läsaren hänvisas således till den kommande rapporten från examensarbetet för kompletterande information.

Föreliggande rapport skall inte betraktas som en referenshandbok över exakta emissioner och verkningsgrader. Istället skall den ge en överblick över olika processer, vilka möjligheter det finns att använda olika bränslen i processerna och de energi- och miljömässiga konsekvenserna. Praktiska hinder mot användandet av en viss process eller ett visst bränsle kan innebära att det energi- och miljömässigt bästa valet ej alltid är möjligt.

Studien omfattar endast en redovisning av dagens bästa tillgängliga teknik. Det kan finnas många begränsningar och en stor begränsning kan vara priset på produkten men i studien beaktas inte de ekonomiska konsekvenserna av olika alternativa val vid tillämpning av bästa teknik.

1.3 METODIK

Grundliga litteratursökningar har genomförts men då föreliggande studie behandlar state-of-the-art tillämpningar är möjligheterna att använda sig av redan gjorda mätningar begränsade till nyare studier. En stor del av de data som återges har samlats in genom kontakter med tillverkare, återförsäljare och leverantörer av teknisk utrustning. Tillverkare och leverantörers hemsidor har också bidragit med en del material. Om det har funnits mätningar gjorda av oberoende testcenter, anges detta tillsammans med tillverkarens/importörens egna uppgifter.

1.4 BRÄNSLEFAKTA

Nedan ges några data för de bränslen som är aktuella för de i rapporten behandlade applikationerna. I Tabell 1.1 visas de olika bränslenas ungefärliga energiinnehåll

Tabell 1.1 Studerade bränslen och energiinnehåll [1.1, 1.2]

Bränsle	Energiinnehåll
Naturgas ¹	40,1 MJ/Nm ³
Biogas ²	18-27 MJ/Nm ³
Uppgraderad biogas	35-40 MJ/Nm ³
Gasol	46,1 MJ/Nm ³
Diesel miljöklass 1	35,2 MJ/l
Motorbensin	31,4 MJ/l
Etanol	21,2 MJ/l
DME	19,2 MJ/l
Eldningsolja 1	35,9 GJ/m ³
Skogsbränslen	
30% Fukthalt	12,7 MJ/kg (19,2 MJ/kg TS)
50% Fukthalt	8,4 MJ/kg (19,2 MJ/kg TS)
Pellets/briketter (11% fukthalt)	16,8 MJ/kg (21 MJ/kg TS)

¹ Avser undre värmevärde för naturgas som distribueras i Sverige maj 2001

² Typvärden, kan variera mellan anläggningar
TS = Torrsubstans

1.4.1 Naturgas

Naturgas är vid atmosfärstryck ett gasformigt bränsle som huvudsakligen består av metan samt mindre halter etan och propan. Den naturgas som används i Sverige kommer från danska gasfält i Nordsjön och innehåller cirka 88% metan (augusti 2001) [1.3]. Naturgasen introducerades i Sverige 1985 och den årliga användningen uppgår till strax över 9 TWh. Detta är en förhållandevis liten andel av den totala energianvändningen men på västkusten mellan Trelleborg och Göteborg svarar naturgasen för 20% av den totala energianvändningen. Naturgas i Sverige används huvudsakligen för kraftvärme och i industrin medan endast en mindre andel används i hushåll och för transporter. P.g.a. att naturgas är en ledningsbunden energiform är möjligheterna att använda naturgas begränsade till ledningsnätets sträckning. Komprimerad naturgas benämns CNG (Compressed Natural Gas) och kondenserad (flytande) naturgas benämns, LNG (Liquefied Natural Gas).

1.4.2 Biogas

Biogas bildas då organiskt material bryts ned i en syrefri miljö och beroende på vilka material som ingår i processen, temperaturnivåer m.m., kommer en gas med varierande innehåll att bildas. Biogas innehåller cirka 50-75% metan och resten CO₂ samt lägre halter av svavelväte, kväve och syre. Vanligen är användningen begränsad till produktionsanläggningen och dess närhet men biogas kan injiceras på naturgasnätet vilket ökar användningsområdet, jfr ”Grön el”.

Biogas kan användas för värmeproduktion och kraftvärmeproduktion och efter uppgradering till en kvalité motsvarande naturgas även som fordonsbränsle. Emissionsbilden är i huvudsak densamma som för naturgas. Biogas ger i användningssteget inga nettoemissioner av CO₂ men sett över hela bränslets livscykel ger även biogas ett CO₂ tillskott liksom andra bränslen som baseras på förnyelsebara råvaror.

1.4.3 Diesel

Diesel är det vanligaste fordonsbränslet för tunga fordon men är idag också vanligt i personbilar, främst p.g.a. den högre verkningsgraden och tidigare ofta en gynnsam prisbild. Till fördelarna med diesel hör en högre verkningsgrad än motsvarande ottomotor och därmed lägre bränsleförbrukning och CO₂ emissioner. Till nackdelarna hör att emissionerna av NO_x och partiklar är högre än för ottomotorn.

1.4.4 Motorbensin

Bensin är det vanligaste fordonsbränslet för personbilar världen över. Den främsta nackdelen är att bensin är ett fossilt bränsle med åtföljande bidrag till CO₂ emissionerna.

1.4.5 Gasol

Gasol består av en blandning av huvudsakligen propan (70-95%) och butan (5-30%). Gasen har ungefärligen samma användningsområden och emissionsbild som naturgas men gasernas fysikaliska egenskaper är olika. Gasol kondenserar vid måttliga tryck (<10 bar) och kan därför transporteras lättare än naturgas. Därför kan även avskilt belägna större förbrukare använda gasol som transporteras med lastbil eller järnväg. Gasol är inte naturligt förekommande utan framställs som biprodukt vid olje- och gasutvinning vilket gör gasolen mer priskänslig än naturgasen. Den årliga gasolanvändningen i Sverige ligger runt 6,5 TWh/år.

1.4.6 Biobränsle

Begreppet biobränsle innefattar:

- Ved
- Pellets
- Avverkningsrester
- Träflis
- Briketter

Ett problem med framförallt ved är att kvaliteten är varierande bl.a. avseende på fukthalten. Detta problem existerar ej för olja och gas varför sådana pannor optimeras för en känd sammansättning på bränslet men i vedpannor kommer bränsle med varierande sammansättning att eldas. Även om fukthalten i briketter och pellets varierar något är inte variationerna speciellt höga och förorsakar inte så stora problem som för ved.

1.4.7 Olja

Olja är fortfarande ett av de mest använda bränslena världen över även om stigande priser på råolja och diskussioner kring den förmodade växthuseffekten har lett till en minskad användning.

1.4.8 DME

DME (Dimetyleter) är ett förhållandevis nytt fordonsbränsle som vid rumstemperatur och atmosfärstryck är i gasform men kondenserar liksom gasol vid låga tryck (5-10 bar). DME är fortfarande på utvecklingsstadiet men fordonsindustrin har stora förhoppningar om en storskalig användning av DME. Naturgas används som råvara för DME framställning idag men det undersöks om biobränslen kan användas som råvara vid förgasning. Egenskaperna liknar diesel men DME ger lägre emissioner av HC, partiklar och NO_x.

1.4.9 Etanol

Etanol framställs genom jäsning, förgasning eller biologiska processer varav flertalet är på experimentstadiet. Det finns endast ett fåtal fordonsmodeller som går på etanol men antalet etanoldrivna bussar växer stadigt.

I tunga fordon används ren etanol som bränsle men för personbilar används E85 som är en blandning av 85% etanol och 15% bensin. Vanliga bensinfordon kan även köras med en låg etanolinblandning utan behov av ändringar, runt 5%.

1.5 EMISSIONSFAKTA

I rapporten behandlas ett antal olika emissioner från olika bränslen, för ytterligare läsning om de olika emissionerna och deras effekter hänvisas till Energigasernas miljöeffekter – Faktahandbok, kapitel 3 [1.4].

1.5.1 Oreglerade emissioner [1.5]

Förutom de emissioner som vanligen mäts, finns det åtskilliga andra ”oreglerade” emissioner som inte mäts i vanliga fall. Här återfinns bl.a.

- Metaller
- Dioxiner
- Kol - svavelföreningar
- Klorväte
- Ammoniak

Det finns generella emissionsdata för dessa framtagna för olika bränslen och olika tillämpningar. I och med att dessa inte är mätta samtidigt eller under samma förhållanden som övriga uppgifter, redovisas inte dessa data tillsammans med övriga emissioner för respektive tillämpning. Underlaget är begränsat och litteratur inom området har ofta några år på nacken.

I en tidigare SGC rapport konstateras att naturgas generellt har de lägsta oreglerade emissionerna [1.5]. Det är svårt att göra några jämförelser för dagens teknik och teknikutvecklingen kan ha medfört att vissa av uppgifterna i SGC rapporten inte är representativa för dagens teknik.

1.6 REFERENSER

- 1.1 Stefan Uppenberget et al. Miljöfaktabok för bränslen. Del 2. Bakgrundsinformation och Teknisk bilaga, IVL Svenska Miljöinstitutet AB B1334 B, Stockholm augusti 1999.
- 1.2 Anna Lindberg, Metananrikning. Uppgradering av biogas till drivmedelkvalitet – ekonomi, teknik och miljökonsekvenser. Slutrapport NUTEK-projekt P3041-1. JTI, Stockholm 1999.
- 1.3 <http://www.dong.dk>
- 1.4 Jörgen Thunell m.fl., Energigasernas miljöeffekter – Faktahandbok. Rapport SGC 075, december 2000.
- 1.5 Jörgen Thunell, Utsläpp av oreglerade ämnen vid förbränning av olika bränslen. SGC Rapport 090, Malmö, juni 1998

2 NORMER, RIKTVÄRDEN OCH MÄRKNINGAR

Högsta tillåtna utsläpp av luftförorenande ämnen från olika typer av anläggningar regleras i lagar som i sin tur resulterar i förordningar, föreskrifter, rekommendationer o. dyl. Härutöver finns av olika organ framtagna krav som, om de uppfylls, berättigar tillverkaren av en produkt att märka produkten på ett visst sätt, exempelvis med Svanen eller Blauer Engel symbolen. Sådan märkning innebär vanligen att även vissa krav på energiverkningsgrad uppfylls.

För en mer fullständig information om gällande lagar och förordningar samt gränsvärden för emissioner hänvisas till Energigasernas miljöeffekter – Faktahandbok [2.1]. Här ges exempel på utsläppsgränser och i vissa fall även krav på verkningsgrad uppdelat på:

- Generella krav.
- Mindre och medelstora pannor.
- Fordon.

Vidare förklaras innebörden av märkning med Svanen och Blauer Engel symbolen.

2.1 GENERELLA KRAV

2.1.1 Svavel

Krav och riktlinjer framgår av Tabell 2-1 Med mgS/MJ bränsle menas mg utsläppt svavel räknat på MJ tillfört bränsle. Med anläggning avses i tabellen samtliga förbränningsenheter inom ett fjärrvärmenät, ett kraftvärmeverk eller en industri

Tabell 2-1 Svenska krav och riktlinjer för svavelutsläpp [2.2].

	Utsläpp mg S/MJ bränsle	Anmärkning
Generell övre gräns för alla svavelhaltiga bränslen utom tunn eldningsolja	190	Maxvärde. Krav.
Tunn eldningsolja	50	Maxvärde motsvarande 0,2 vikt-%. Krav.
Anläggningar med årligt svavelutsläpp < 400 ton	100	Årsmedelvärde. Krav.
Anläggningar med årligt svavelutsläpp > 400 ton	50	Årsmedelvärde. Krav.
Nya koleldade anläggningar	50	Årsmedelvärde. Krav.
Nya anläggningar > 500 MW	30	Årsmedelvärde. Riktlinje.

2.1.2 Kväveoxider

Kraven på begränsningar av kväveoxidutsläpp fastställs för varje enskild anläggning vid tillståndsprövningen och utfallet kan bli strängare än gällande allmänna krav och riktlinjer.

Svenska riktlinjer för kväveoxidutsläpp framgår av Tabell 2-2. Samtliga värden avser årsmedelvärden och de avser summan av kvävemonoxid (NO) och kvävedioxid (NO₂) räknat som NO₂. Med *anläggning* menas vid ny anläggning den aktuella byggnationen och vid befintlig anläggning samtliga enheter inom anläggningen. Med ny anläggning avses anläggning som tillståndsprövas efter det att respektive bestämmelse trätt i kraft.

Utöver värdena i Tabell 2-2 finns EU-gränsvärden för nya anläggningar större än 50 MW tillförd effekt, se Tabell 2-3. Dessa värden gäller även i Sverige men är ej så stränga som de svenska. Det skall observeras att EU-värdena är månadsmedelvärden till skillnad från värdena i Tabell 2-2 som är årsmedelvärden. Observera att EU-gränsvärdena är under revision och att värdena Tabell 2-3 är de som var giltiga vid rapportens tryckning (juli 2001).

Tabell 2-2. Svenska riktlinjer för kväveoxidutsläpp [2.2].

Anläggningstyp	NO _x räknat som mg NO ₂ /MJ bränsle Årsmedelvärde
Nya anläggningar Anläggningar med årligt utsläpp < 300 ton NO ₂	100 - 200
Anläggningar med årligt utsläpp > 300 ton NO ₂	50 - 100
Koleldade anläggningar < 500 MW	50
Anläggningar > 500 MW	300
Befintliga anläggningar Anläggningar med årligt utsläpp < 600 ton NO ₂ ¹⁾	100 - 200
Anläggningar med årligt utsläpp > 600 ton NO ₂ ¹⁾	50 - 100

¹⁾ Gäller ej för vissa län i norra Sverige

Tabell 2-3. EU:s gränsvärden för kväveoxidutsläpp från nya anläggningar > 50 MW [2.3].

Bränsle	Utsläpp, månadsmedelvärde	
	mg NO ₂ /Nm ³ ¹⁾	mg NO ₂ /MJ
Fasta	650	220 - 250
Flytande	450	125 - 130
Gasformiga	350	95

¹⁾ Som bas för utsläppen gäller torra rökgaser 0°C, 101,3 kPa vid 3 % O₂ för flytande och gasformiga bränslen och 6 % O₂ för fasta bränslen

2.1.3 Emissionsgränser för stoft

Renodlade riktvärden för stoftutsläpp finns ej, däremot har följande svenska praxis utvecklats:

Fastbränsleanläggning > 10 MW: 35 mg/nm³ tg, 13 % CO₂
Anläggning eldad med tjock eldningsolja: 0,5 - 1 g/kg olja

Liksom för kväveoxidutsläppen fastställs kraven individuellt i samband med tillståndsprövningen.

EU har fastställt krav på maximala månadsmedelvärden för stoftutsläpp från nya anläggningar ≥ 50 MW. Dessa, som även gäller i Sverige, framgår av Tabell 2-4. Observera att EU-gränsvärdena är under revision och att värdena Tabell 2-4 är de som var giltiga vid rapportens tryckning (juli 2001).

Tabell 2-4. EU:s maximala månadsmedelvärden för stoftutsläpp från nya anläggningar ≥ 50 MW [2.3].

Bränsle	Tillförd effekt MW	Utsläpp mg/Nm ³ 1)	Utsläpp mg/MJ
Fasta	≥ 500	50	20
	50 - 500	100	40
Flytande	≥ 50	50	15
Gasformiga	≥ 500	5	1

1) Tg, 0°C, 101,3 kPa. 3 % O₂ vid flytande och gasformiga bränslen, 6 % O₂ vid fasta bränslen

2.2 SMÅ OCH MEDELSTORA PANNOR

2.2.1 Verkningsgrad [2.4]

Enligt Boverkets föreskrifter så skall alla nya pannor med en märkeffekt mellan 4 och 400 kW som eldas med gasformiga eller flytande bränslen uppfylla vissa krav avseende verkningsgrad. Föreskrifterna gäller ej:

- Pannor som kan eldas med olika typer av bränsle, inklusive fasta bränslen
- Genomströmningsapparat för beredning av varmvatten
- Pannor konstruerade för att eldas med bränslen vars egenskaper avsevärt skiljer sig från egenskaperna hos de bränslen i vätskeform och gasform som vanligen används
- Kaminer och anordningar som huvudsakligen är avsedda att värme upp de lokaler där de är installerade och som samtidigt som en sidofunktion framställer varmvatten för centralvärme och för hushållsbruk
- Anordningar med en märkeffekt som är mindre än 6 kW. Med själv-cirkulation och som uteslutande är konstruerade för att framställa förrådsvarmvatten för hushållsbruk
- Specialtillverkade pannor

Kraven på verkningsgrad framgår av Tabell 2-5.

Tabell 2-5. Minsta verkningsgrad för nyinstallerade pannor som ej undanstags enligt föreskrifterna.

Panntyp	Effekt- område kW	Pannverkningsgrad vid märkeffekt (Pn)		Pannverkningsgrad vid 30% belastning (0,3 Pn)	
		Medeltemperatur för pannvattnet (°C)	Pannverkningsgrad (%)	Medeltemperatur för pannvattnet (°C)	Pannverkningsgrad (%)
Standardpannor	4-400	70	$\geq 84 + 2 \log Pn$	≥ 50	$\geq 80 + 3 \log Pn$
Lågtemperaturpannor ¹	4-400	70	$\geq 87,5 + 1,5 \log Pn$	40	$\geq 87,5 + 1,5 \log Pn$
Gaseldade kondensationspannor ²	4-400	70	$\geq 91 + 1 \log Pn$	30	$\geq 91 + 1 \log Pn$

¹ Lågtemperaturpanna: en panna som kan fungera kontinuerligt med en matarvattentemperatur på 35-40°C och som under vissa förhållanden bildar kondensat. Här inkluderas även kondensationspannor för flytande bränslen.

² Kondensationspanna: en panna som är konstruerad för att kontinuerligt kondensera en stor del av den vattenånga som finns i förbränningsgaserna.

2.2.2 Svanenmärkning [2.5, 2.6]

Den nordiska miljömärkningen Svanen har tagit fram kriteriedokument för miljögodkända oljebrännare, kombinationer oljebrännare och panna samt för fastbränslepannor. Dokumentet för oljebrännare/pannor har nyligen reviderats och det finns idag tre stycken godkända leverantörer varav två svenska. Dokumentet för fastbränslepannor är helt nyligen framtaget och det finns idag inga miljömärkta pannor på den svenska marknaden men detta innebär ej att det inte finns pannor som klarar kraven. Den nordiska Svanenmärkningen omfattar idag ej gaspannor.



Figur 2.1. Svanensymbolen.

Emissionerna från oljebrännare eller kombinationer av oljebrännare och oljepanna får inte överstiga värdena i Tabell 2-6. Med mg/kWh avses mg utsläpp per kWh tillfört bränsle.

Tabell 2-6. Kriterier för Svanenmärkning av oljebrännare samt kombinationer av oljebrännare/panna.

	NO _x (mg/kWh)	CO (mg/kWh)	HC (mg/kWh)	Sottal
Endast brännare	110	60	15 (30 [*])	0,5
Kombination brännare/panna	110	20	10 (30 [*])	0,5

^{*}Gäller tändningsfasen

För verkningsgraden η_k gäller att den skall överstiga 90% vid 10 kW tillförd bränsleeffekt och 91,8% vid 120 kW tillförd bränsleeffekt. För bränsleeffekter däremellan gäller:

$$\eta_k = (1/60) Q_N + 89.833$$

där Q_N är bränsleeffekten i kW.

För fastbränslebrännare och kombinationer brännare/panna med en nominell effekt upp till 300 kW gäller att pannans verkningsgrad η_k skall uppgå till:

Manuellt matade pannor:

$$\eta_k = 69 + 6 \log Q_N$$

Automatiskt matade pannor:

$$\eta_k = 72 + 6 \log Q_N$$

För utsläppen från fastbränslepannor gäller värdena i Tabell 2-7.

Tabell 2-7. Kriterier för fastbränslepannor samt kombinationer av brännare/panna.

Panneffekt	<100 kW	100-300 kW
OGC (mg/m ³ tg vid 10% O ₂)	70	50
CO (mg/m ³ tg vid 10% O ₂)	1000 [*] /2000 ^{**}	500 [*] /1000 ^{**}
Stoft (mg/m ³ tg vid 10% O ₂)	70	70

^{*}Automatiskt matade pannor ^{**}Manuellt matade pannor

2.2.3 Blauer Engel märkning [2.7, 2.8, 2.9, 2.10]

Tyska Blauer Engel är en av de vanligen förekommande miljömärkningarna och kraven för Svanenmärkning har i stor utsträckning hämtats från Blauer Engel. Se Tabell 2-8 för kriterier för märkning av gas- och oljepannor med Blauer Engel.



Figur 2.2. Blauer Engel symbolen.

Tabell 2-8. Kriterier för märkning med Blauer Engel.

	NO _x mg/MJ	CO mg/MJ	HC mg/MJ	Sottal	Verkningsgrad
Gaspannor <70 kW	110	60	-	-	90% (10 kW) 91% (70 kW)
Gaspannor <70 kW Kondenserande	60	50	-	-	100 % (10 kW)* 103% (10 kW)** 101% (70 kW)* 104% (70kW)**
Oljepannor <70 kW	110	60	15	0,5	90% (10 kW) 91% (70 kW)

* Fram/returtemp 75/60°C

** Fram/returtemp 40/30°C

2.3 FORDON

2.3.1 Testmetoder

Det finns olika testcykler för fordon i olika länder och en bra genomgång av de olika metoderna görs i bl.a. IANGVs "Position Paper" som rekommenderas för kompletterande läsning i ämnet [2.11]. Ett dilemma med standardiserade testcykler är att man kan anpassa fordonet energi- och miljöprestanda efter aktuell testcykel. Det har i oberoende tester ibland visat sig att bilar som fått mycket bra testvärden i standardiserade testcykler har mycket högre emissionsvärden vid körning under verkliga förhållanden. Det är alltså värt att poängtera att prestandasiffror som anges är representativa för nya bilar som kör enligt testcykeln. Eftersom det finns olika testcykler i olika länder gör detta att resultaten inte alltid är direkt jämförbara. I IANGVs "Position Paper" finns det även generella omräkningsfaktorer mellan olika testcykler.

2.3.2 Sverige och EU

Tabell 2-9 visar miljöklassning för olika lätta fordon, drivna med diesel eller bensin. Klassningen är de krav som ställs på nyproducerade bilar efter vissa specifika datum men redan existerande bilar påverkas inte.

Tabell 2-9. Utsläppsgränsvärden för lätta fordon [2.12].

Klass Giltig från	Miljöklass 3 (Euro II) Tidigare (g/km)		Miljöklass 2 (Euro III) 1/1-2001 (g/km)		Miljöklass 1 (Euro IV) 1/1 2006 (g/km)	
	Bensin	Diesel	Bensin	Diesel	Bensin	Diesel
Kolmonoxid (CO)	2,2	1,0	2,3	0,64	1,0	0,5
Kolväten (HC)	-	-	0,20	-	0,10	-
Kväveoxider (NO _x)	-	-	0,15	0,50	0,08	0,25
Sammanlagt värde HC+NO _x	0,5	0,7	-	0,56	-	0,3
Partiklar	-	0,08	-	0,05	-	0,025

NO_x emissioner är i praktiken alltid högre från dieselfordon jämfört med motsvarande bensinfordon. Anledningen är att den vanliga trevägskatalysatorn som avlägsnar NO_x kräver att förbränningen i motorn sker utan luftöverskott vilket inte är fallet i dieselmotorer. Teknik utvecklas dock för att bättre rena dieselavgaser, se kapitel 8 och 9.

Det finns liknande krav på tunga fordon som visas i Tabell 2-10. För att uppfylla Euro 3 skall gasmotorer och dieselmotorer med efterbehandling av avgaserna testas enligt ETC testcykel medan konventionella dieselmotorer skall testas enligt ESC och ELR testcykler. Fr.o.m. Euro 4 skall även alla dieselmotorer testas enligt ESC/ELR och ETC testcykler.

Tabell 2-10. Utsläppsgränsvärden för tunga fordon [2.12].

Klass (giltig från)	Testcykel	NO _x (g/kWh)	Partiklar (g/kWh)	THC (g/kWh)	CO (g/kWh)
Euro 1 (1993)		8	0,35	1,1	4,5
Euro 2 (1996)	ECE R49	7	0,15	1,1	4,0
Euro 3 (2001)	ESC/ELR	5	0,10	0,66	2,10
Euro 3 (2001)	ETC	5	0,16	1,6*	5,45
Euro 4 (2005)	ESC/ELR	3,5	0,02	0,46	1,5
Euro 4 (2005)	ETC	3,5	0,03	1,1*	4
Euro 5 (2008)	ESC/ELR	2,0	0,02	0,46	1,5
Euro 5 (2008)	ETC	2,0	0,03	1,1*	4

*Endast metan för gasmotorer

2.3.3 Kalifornien [2.13]

Kalifornien har troligen de hårdaste emissionskraven i världen. I de områden där halten luftföroreningar är som högst, är avgaserna från en SULEV klassad personbil, bortsett från CO₂, nästan renare än utomhusluften. Den nya LEVII standarden sätter hård press på tillverkarna av dieslbilar, med dagens bästa teknik uppfyller helt enkelt inte dieslbilarna kraven som ställs. Till detta kommer ett ambitiöst program för introduktionen av bilar som uppfyller de olika kraven. Tabell 2-11 och Tabell 2-12 visar dagens och kommande krav på personbilar i Kalifornien.

Tabell 2-11. Dagens krav på personbilar i Kalifornien.

Certifiering Klass	Certifiering (miles)	NMOG (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	Formaldehyd (mg/km)	Partiklar (g/km)
Tier 1	50 000	0,16	2,1	0,25	-	0,05
TLEV		0,08	2,1	0,25	9,3	-
LEV		0,05	2,1	0,12	9,3	-
ULEV		0,025	1,1	0,12	5,0	-
Tier 1	100 000	0,19	2,6	0,38	-	-
TLEV		0,10	2,6	0,38	11,2	0,05
LEV		0,06	2,6	0,19	11,2	0,05
ULEV		0,034	1,3	0,19	6,8	0,025

Tabell 2-12. Krav på personbilar enligt LEVII i Kalifornien (fr.o.m. 2004 års modeller).

Certifiering Klass	Certifiering (miles)	NMOG (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	Formaldehyd (mg/km)	Partiklar (g/km)
LEV	50 000	0,046	2,1	0,03	9,3	-
ULEV		0,025	1,1	0,03	5,0	-
LEV	120 000	0,056	2,6	0,04	11,2	0,006
ULEV		0,034	1,3	0,04	6,8	0,006
SULEV		0,006	0,6	0,01	2,5	0,006
LEV	120 000	0,056	2,6	0,04	11,2	0,006
ULEV		0,034	1,3	0,04	6,8	0,006
SULEV		0,006	0,6	0,01	2,5	0,006

2.4 SAMMANFATTNING

Det finns idag ingen komplett miljömärkning för pannor, men om pannan uppfyller vissa krav avseende emissioner och verkningsgrad, kan den märkas bl.a. med Svanen. Denna och liknande märkningar säger dock inget om hur låga emissionerna är, bara att de ligger under ett fastställt värde. Dessutom är det frivilligt att märka en produkt och bland de pannor som finns på den svenska marknaden är bara tre Svanenmärkta [2.14]. Genom att välja en Svanenmärkt panna kan man säkerställa vissa nivåer på verkningsgrad och emissioner men det är inte säkert att det valda alternativet är det bästa ur energi- och miljösynpunkt. Trots att gaspannor uppvisar mycket goda energi- och miljöegenskaper saknas kriterier för miljömärkning i Sverige enligt t.ex. Svanen. Ett sådant dokument kan återigen baseras på tyska Blauer Engel och ger en klar signal om gaspannornas energi- och miljömässiga fördelar.

Det hade varit en fördel om alla pannor som säljs i Sverige hade märkts med emissioner och verkningsgrad, liknande den märkning som idag används för kylskåp, tvättmaskiner, torktumlare m.m. Detta sänder en tydlig signal om vilka möjligheter det finns för enskilda konsumenter att påverka sin energiförbrukning och emissioner från uppvärmningssystemet. Märkningen bör vara obligatorisk för alla pannor som skall säljas på den svenska marknaden, såväl svenska som utländska pannor. De tester som genomförs av oberoende testcenter är oftast hemliga och man har som konsument ingen rätt att ta del av resultaten.

Inom fordonssektorn är kraven på öppenhet gällande emissioner hårdare och det finns bestämmelser för vilka emissionsnivåer en ny bilmodell måste uppfylla för vissa årtal.

Förutom de miljömärkningar som presenterats i detta avsnitt finns det ytterligare ett antal förekommande men Svanen och Blauer Engel är de mest vanligen förekommande.

2.5 REFERENSER

- 2.1 Jörgen Thunell m.fl., Energigasernas miljöeffekter – Faktahandbok. Rapport SGC 075, december 2000.
<http://www.sgc.se/energiomiljo/resources/handbok.pdf>
- 2.2 Ann Bohlin m fl, Energi och Miljö. Miljökonsekvenser vid användning av naturgas, biobränslen, olja och kol. ÅF-Energikonsult, 4 dec 1995
- 2.3 Naturvårdsverket. SNFS 1994:8
- 2.4 Boverkets Författningssamling BFS 1997:58 EVP 1. Boverket, Karlskrona 1997.
- 2.5 Ecolabelling of Oilburner/Boiler Combinations. Criteria Document Version 4.0. Nordic Ecolabelling 2000.
- 2.6 Miljömärkning av pannor för uppvärmning med fasta biobränslen (dominerande värmekälla). Kriteriedokument version 1.0. Nordisk miljömärkning, december 2000.
- 2.7 <http://www.blauer-engel.de>
- 2.8 Ölbrenner-Kessel-Kombinationen (Units). Kriteriedokument Blauer Engel RAL-UZ 46. Mars 1997.

- 2.9 Brenner-Kessel-Kombinationen (Units) mit Gasbrenner und Gebläse. Kriteriedokument Blauer Engel RAL-UZ 41. Mars 1997.
- 2.10 Emissionsarme und energiesparende Gas-Brennwertgeräte. Kriteriedokument Blauer Engel RAL-UZ 61. Mars 1997.
- 2.11 Nils-Olof Nylund & Alex Lawson, Exhaust emissions from natural gas vehicles. IANGV Position Paper 2000, <http://www.iangv.org> , mars 2000.
- 2.12 <http://www.engva.org>
- 2.13 Michael P. Walsh, Motor Vehicle Standards And Regulations Around The World. <http://www.worldbank.org/wbi/cleanair/infocenter/regsumm.pdf>, mars 1999.
- 2.14 <http://www.svanen.nu>

3 STADSBUSSAR OCH PERSONBILAR

Vägtrafiken utgör en förhållandevis allt större källa till emissioner av framförallt, NO_x och CO_2 men även partiklar och kolväten. I förhållande till tillförd primärenergi är vägtrafiken odiskutabelt den största källan till NO_x och CO_2 emissioner i Sverige men situationen är ungefär densamma i många andra länder.

Världen över arbetar nu fordonstillverkare med att dels göra fordonen bränslesnålare, dels minska emissionerna. Eftersom fordonsparken, speciellt privata fordon omsätts ganska långsamt tar det emellertid lång tid innan ny teknik märks och kan påverka den totala utsläppsbilden.

De förhärskande drivmedlena för fordon är idag bensin och dieselolja. Nya drivmedel, däribland naturgas, är emellertid på frammarsch och i detta kapitel redovisas utsläppsdata för drivmedel för stadsbussar och lätta fordon.

3.1 MOTORTEKNIK

I lätta fordon är bensinmotorn fortfarande den vanligast förekommande även om dieslbilar har blivit allt vanligare. För tunga fordon dominerar dieselmotorn och även de flesta motorer i tunga fordon för alternativa bränslen är dieselmotorer som konverterats eller anpassats för drift med annat bränsle. Se även kapitel 6 om kolvmotorer som innehåller ytterligare fakta.

3.1.1 Stökiometrisk förbränning

I vanliga bensinmotorer tillförs vanligen precis så mycket luft som krävs för att åstadkomma en fullständig förbränning ($\lambda=1$). Emissionerna kan hållas på en rimligt låg nivå samtidigt som en trevägskatalysator kan användas för att rena avgaserna. Dock blir verkningsgraden lägre än för motsvarande lean burn motor.

3.1.2 Lean burn (magerdrift)

Vid magerdrift körs motorn med ett lufttal som är större än 1 ($\lambda>1$). Detta ger en lägre bränsleförbrukning och därmed lägre CO_2 emissioner samt bättre dellastegenskaper men en trevägskatalysator kan inte användas för att avlägsna NO_x . Istället används ofta en oxiderande katalysator för att rena avgaserna från lean-burn motorer. Tunga motorer är vanligen av lean burn typ men ett par företag, M.A.N. och Neoplan använder stökiometrisk förbränning.

3.1.3 EGR

Med avgasåterföring (EGR, Exhaust Gas Recirkulation) minskas NO_x emissionerna genom att förbränningstemperaturen sänks. EGR har använts länge på ottomotorer men har haft svårare att slå igenom för dieselmotorer eftersom det leder till ökad sotbildning. EGR har visat sig ha positiv inverkan på miljö- och energiegenskaperna för både etanolfordon och gasfordon.

3.1.4 Hybriddrift

I hybridbilar består drivlinan av två delar, en elektrisk drivlina samt en förbränningsmotor som tar vid när den elektriska drivlinan inte räcker till. Det behöver nödvändigtvis inte vara en förbränningsmotor som används utan även gasturbiner, bränsleceller m.m. är tänkbara koncept. Figur 3-1 visar två kommersiella hybridbilar.



Figur 3-1 Hybridbilarna Toyota Prius och Honda Insight.

3.2 ALTERNATIVA DRIVMEDEL

De fossila drivmedlen bensin och diesel är idag helt dominerande inom den svenska transportsektorn och alla bränslen som kan tänkas ersätta dem räknas här som alternativbränslen. I detta avsnitt behandlas endast gasbränslen, etanol samt DME av de alternativa bränslena eftersom de bedöms ha störst potential.

Bussar i stadstrafik är fortfarande till största delen drivna med diesel men under senare år har en övergång till alternativa bränslen börjat äga rum. Det är främst etanol, biogas och naturgas som har tagit marknadsandelar men försök med RME har gjorts. RME används dock i begränsad omfattning idag. Idag är etanol och bio/naturgas de vanligaste alternativa fordonsbränslena för bussar i stadstrafik. För långfärdsbussar kvarstår problemet med begränsad räckvidd med gasdrift, en modern stadsbuss har en räckvidd på cirka 400 km vid full tank.



Figur 3-2 Idag drivs alla stadsbussar i Malmö med naturgas.

Förutom begränsad räckvidd innebär natur- eller biogas som bränsle för bussar att vikten och bränsleförbrukningen ökar. Vikten ökar med cirka 700 kg för en naturgasdriven buss och bränsleförbrukningen med strax över 20%. Dessutom innebär det en merkostnad med cirka 200-300 kkr för en gasbuss jämfört med en diesalbuss.

De första gasmotorerna var känsliga för variationer i gaskvalitet och naturgaskvaliteten ändras över tiden [3.1]. När bussarna levererades justerades motorerna in för en viss gaskvalitet men efter ett par år kan gaskvaliteten ha ändrats med den följd att injusteringen inte längre är optimal. Idag monteras bussarna med ett reglersystem som själv ställer in sig beroende på gaskvalitet. Etanol som drivmedel i tunga fordon innebär även en del förändringar i motorprestanda, det rör sig ofta om konverterade dieselmotorer

Utvecklingen av fordon för alternativa bränslen har gått fort men absolut sett är marknaden för alternativbränslen fortfarande liten i Sverige. Endast 0,3% av energitillförseln till transportsektorn utgörs av alternativbränslen, nästan uteslutande etanol, bio- och naturgas. För tunga fordon, framförallt bussar i stadstrafik och distributionslastbilar, har de alternativa bränslena fått störst genomslag. T.ex. har antalet sålda Scania stadsbussar för alternativa bränslen fördubblats mellan 1996 och 1999 och var sjätte stadsbuss som säljs är nu driven med något alternativt bränsle. I vissa länder påskyndar man övergången till alternativa bränslen genom att kräva att distributionslastbilar som körs i stadskärnan skall vara drivna med alternativa bränslen, annars får endast distribution ske nattetid.

3.3 FORDONS- OCH MOTORPRESTANDA

3.3.1 Bussar

I ett exempel ur IANGV:s "Position Paper" presenteras energiutnyttjandet från utvinning till användning av olika drivmedel för bussar. Som kan utläsas är dieselmotorn effektivast även när energiutnyttjandet över hela livscykeln beaktas. Ingen hänsyn tas till emissioner utan bara till energi.

Tabell 3-1 Energiutnyttjande för bussar drivna med olika drivmedel [3.2].

Bränsle (motor)	Energiutnyttjande motor (%)	Energiutnyttjande fordon totalt (%)	Energiutnyttjande well-to-wheel (%)
Diesel	35	29,4	26,5
DME (Diesel)	35	29,1	19,4
Gasol (Lean-burn)	32	26,9	23,8
Gasol (Stökiometrisk)	29	24,4	21,6
CNG (Lean-burn)	32	26,1	22,4
CNG (Stökiometrisk)	30	23,9	20,6
LNG (Lean-burn)	32	26,9	21,6
Bensin	29	24,6	20,1
Bio etanol (Diesel)	35	29,1	-

I Tabell 3-2 visas data för bussar baserade på dagens bästa tillgängliga kommersiella teknik. Emissionerna från bussarna drivna med alternativa bränslen är klart lägre än för dieselfordonen och DME testerna indikerar emissionsnivåer som ligger lägre än för diesel. I tabellen anges inte verkningsgrader men generellt sett är verkningsgraden för dieselmotorer 5-10 procent högre än för exempelvis naturgasmotorer.

Tabell 3-2 Data för bussar [3.2,3.3,3.4,3.5,3.6,3.7].

Modell	Bränsle	NO _x (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Partiklar (g/kWh)	Testcykel (om uppgiven)
Ford V10 bi-fuel (endast motor)	LPG/Bensin	0,7	3,8	0,15 (NMHC)	i.u.	US
DAF GG170 (endast motor)	LPG	0,4	0,25	0,01	0,015	ECE R49
MAN Stadsbuss	CNG	<1	<1	<0,5	<0,02	ECE R49
Cummins L10-260G (endast motor)	CNG	2,3	0,5	0,3 (NMHC)	0,03	US
Mercedes-Benz M447HG (endast motor)	CNG	3,5	2,0	0,5	0,05	ECE R49
Volvo	CNG	2,0	0,01	1	<0,01	ECE R49
Volvo	Diesel	4,5	<0,1	<0,05	<0,02	ECE R49
Scania	Diesel	4,7	0,6	0,3	0,09	ECE R49
Scania	CNG	2	<0,5	i.u.	0,02	ECE R49
Scania	Etanol	3,2	<0,15	<0,15	0,03	ECE R49
DME tester	DME	3	0,3	0,2	<0,05	ECE R49

i.u. = ingen uppgift

NMHC = Kolväten exkl. metan

Att gasbränslen kan bidra till att sänka emissionerna från kollektivtrafiken är dock odiskutabelt. Som kan utläsas ur tabellen innebär en övergång från diesel- till naturgasbussar kraftigt sänkta emissioner, framförallt om det är äldre dieslbussar som ersätts. CNG har vissa fördelar jämfört med LPG, framförallt lägre CO emissioner men även något lägre CO₂ emissioner. Man har även konstaterat att CNG ger lägre emissioner av vissa oreglerade ämnen, exempelvis aldehyder [8].

3.3.2 Lätta fordon

I Tabell 3-3 visas emissioner för lätta fordon som får anses representera dagens bästa teknik avseende energi- och miljöprestanda. Dessa har valts ut beroende på goda testresultat avseende emissioner och låg bränsleförbrukning. Då det rör sig om olika fordonsmodeller som redovisas för respektive bränsle är inte siffrorna direkt jämförbara, utan visar endast på vad som är möjligt att uppnå med dagens bästa kommersiella teknik. Testcykeln ECE R49 har använts om inget annat anges.

Generellt sett är emissionerna låga för alla bränslena men dieselfordonets svaga punkt är fortfarande relativt höga emissioner av NO_x och partiklar. Dieseln styrka är den högre verkningsgraden och därmed lägre CO₂ emissioner. För såväl gasfordon som etanolfordon kan CO₂ emissionerna reduceras genom att använda biogas respektive etanol baserad på förnybara råvaror som bränsle. För Ford Focus FFV är nettoutsläppen av CO₂ 146 g/km men av dessa utgörs endast 22 g/km av fossil CO₂. För biogasdrivna fordon är utsläppen av fossil CO₂ noll. Metanutsläppen från gasfordonen är mycket låga, dock något över bästa tekniken för bensin och dieselfordon.

*Tabell 3-3 Emissioner från personbilar med dagens bästa kommersiella teknik
[3.9,3.10,3.11,3.12,3.13,3.14,3.15,3.16,3.17].*

Bilmodell och bränsle	NO _x (g/km)	CO (g/km)	Partiklar (g/km)	HC (g/km)	CO ₂ (g/km)
Honda Civic GX CNG	0,013	0,1*	≈0*	0,002 (NMHC)*	140
Dedicerad CNG	0,01	0,2	≈0	0,08 (THC)	
Opel Vectra Dualfuel *** Gasol/bensin	0,077**	0,11	≈0	0,077**	150
Ford Focus FFV E85	0,0081	0,63	i.u.	0,054	146 (22****)
Honda Insight Hybrid Bensin-el	0,03	0,18	i.u.	0,08	80
VW Lupo Bensin	0,025	0,06	i.u.	0,05	134
VW Lupo TDI Diesel	0,22	0,22	0,023	0,02	81

i.u = ingen uppgift

*FTP testcykel

**HC+NO_x

***Gasoldrift

****Fossil CO₂

3.4 TEKNIKUTVECKLING

3.4.1 Gasfordon

Honda Civic GX 1,7a CNG som visas i Figur 3-3 är den miljövänligaste bilen som finns på den amerikanska marknaden. Detta konstaterar American Council for an Energy Efficient Economy i sin Green Book, The Environmental Guide to Cars and Trucks. Honda Civic CNG har tidigare av EPA fått titeln: "cleanest-running internal-combustion-engine vehicle ever tested by the EPA". Honda Civic CNG är ett dedicerat gasfordon och motorn är alltså optimerad för att använda gas som enda bränsle. Detta indikerar att det finns en outnyttjad potential till ytterligare förbättringar för gasfordon som ofta är av bi-fuel typ, d.v.s. som kan köras på både gas och bensin och inte är optimerade för ren gasdrift.



Figur 3-3 Honda Civic GX CNG Sedan.

BMW har tagit fram en prototyp av BMW 523 som dedicerat naturgasfordon, såväl för LNG som för CNG som bränsle, emissionerna är extremt låga [18]:

CO	0,06 g/km
NO _x	0,005 g/km
HC	0,024 g/km
NMHC	0,0024 g/km
CH ₄	0,02 g/km

Ett schweiziskt forskarlag har under laboratorieförsök lyckats köra en stationär naturgasmotor med en verkningsgrad på 42% och NO_x emissioner så låga som 0,003 g/kWh. Tekniken som användes var EGR, stökiometrisk förbränning och trevägskatalysator [3.19], se även kapitel 6 om kolvmotorer.

3.4.2 Hybridfordon

För personbilar finns nu elhybridmodeller kommersiellt tillgängliga och dessa har goda energi- och miljöegenskaper jämfört med motsvarande modeller för ren bensindrift. Om samma utveckling kan ske bland de tunga fordonen återstår att se men Volvo uppger exempelvis att man ligger förhållandevis långt framme i utvecklingen och nu är inne på sista steget före kommersiell produktion av tunga hybridfordon [3.6].

3.4.3 Bensinmotorn

Både otto- och dieselmotorn har sina respektive fördelar och det optimala vore att kombinera båda dessa. I HCCI (ATAC) motorn (Homogeneous Charge Compression Ignition) gör man detta och bränsle-luft blandningen komprimeras till självantändning precis som en dieselmotor. Fördelarna är många: högre verkningsgrad och lägre emissioner NO_x och partiklar. Forskning pågår vid bl.a Lunds Tekniska Högskola.

Honda arbetar med att utveckling av vad man kallar ZLEV (Zero Low Emission Vehicle) som bör kunna ge emissioner som är mycket låga (FTP testcykel):

NMOG* < 0,0025 g/km

CO < 0,11 g/km

NO_x < 0,012 g/km

*Kolväten exklusive metan

I korthet går tekniken ut på att minska emissionerna under själva startfasen genom tre steg:

1. Vid kallstart förbättras förbränningen genom att en av insugsventilerna lyfts något högre än den andra och därigenom skapas en bättre omblandning av bränsle och luft och en bättre förbränning. Oförbrända kolväten absorberas av en kolväteabsorberande katalysator.
2. Innan trevägskatalysatorn har uppnått sin arbetstemperatur kan den inte oxidera kolvätena men trevägskatalysatorn som placerats nära motorn når fort rätt temperatur och kan oxidera kolväten och NO_x. Eventuella kolväterester oxideras i en elektriskt förvärmad katalysator placerad efter den traditionella trevägskatalysatorn.
3. Slutligen har trevägskatalysatorn uppnått sin arbetstemperatur och därmed har den tidigare problematiken med kallstartsemissioner kunnat undvikas.

Mitsubishi arbetar med vad man kallar "ultra lean burn mode" med luft-bränsleförhållande upp till 40:1. Vid start och acceleration används inte "ultra lean burn mode" utan istället något Mitsubishi kallar "superior output mode". Mitsubishi har också tagit fram GDI (Gasoline Direct Injection) som skulle innebära lägre emissioner och lägre bränsleförbrukning men som har visat sig fungera sämre under europeiska förhållanden än japanska.

Typiska bilar använder EGR på runt 10-15%, Renault har tagit fram en motor som använder 25% EGR och detta innebär en minskad bränsleförbrukning på upp till runt 15% enligt Renault.

3.4.4 DME

Många tillverkare sätter en stor tilltro till DME som bränsle i tunga fordon men i dagsläget finns inga kommersiella fordon på marknaden. Volvo anger i sin utvecklingsplan att man nu har tagit fram världens första prototypbuss för DME och att ytterligare utveckling skall ske [3.6].

3.4.5 Dieselfordon

Diesebilarnas svaghet är utsläpp av NO_x och partiklar. Några källor anger upp till 10 ggr högre partikelutsläpp från dieslbilar än från bensinbilar [3.20,3.21,3.22]. Andra källor anger högre faktorer för partikelemissioner från dieslbilar men man måste även beakta storleken på partiklarna. Det är de minsta partiklarna som är farligast för människan och uppgifterna i litteraturen går isär något angående storleken på partiklar från bensin- och dieselmotorer. Vägverket konstaterar i en jämförande rapport mellan bensin- och dieslbilar att valet av bränsle har mindre energi- och miljömässig betydelse om man väljer ett fordon med god bränsleekonomi och låga emissionsnivåer [3.23].

Citroën och Peugeot arbetar med ett partikelfilter av kiselkarbid där partiklarna tillfälligt fastnar och förbränns till koldioxid och vatten. På så sätt regenereras filtret kontinuerligt och sätts inte igen. Tekniken är dock förhållandevis dyr i förhållande till vanliga katalysatorer [24]. Toyota lanserar ett koncept där avgaserna passerar genom ett poröst keramiskt material. Kväveoxiderna fastnar och delas upp i syre och kväve, partiklarna reagerar i sin tur med syret och oxideras. Tekniken ser lovande ut och om den lever upp till laboratorieresultaten kommer det att innebära att emissionerna av NO_x och partiklar från dieselmotorer kan sänkas till i nivå med de från bensinmotorer [25].

För att uppnå lägre emissioner för dieselfordon är ett sätt att finfördela bränslet bättre vid insprutningen i cylindern. Genom att använda mycket höga tryck (>1000 bar) för att spruta in bränslet, uppnås därigenom ett mycket finfördelat bränsle. Tekniken utvecklades ursprungligen av Bosch och benämns ofta Common-Rail.

En mycket ren dieselkvalité som producerats i en Fischer-Tropsch process med naturgas som råvara, har visat sig ge lägre emissioner än konventionell diesel. Man observerade sänkta emissioner av HC, CO, NO_x respektive partiklar med 38%, 46%, 8 respektive 29%. Dieseln karakteriseras av högt cetantal och låga halter av aromatiska kolväten samt svavel [3.26].

Forskare vid Siemens rapporteras ha tagit ett stort steg mot en kraftig sänkning av NO_x emissionerna för lätta dieselbilar. Avgaserna skall vara tillräckligt rena för att uppfylla LEVII SULEV kraven i Kalifornien som träder ikraft 2004. Tekniken bygger på Siemens existerande SINO_x katalytiska teknik för tunga fordon. För personbilar har denna teknik begränsningen att många bilfärder inte är tillräckligt långa för att SINO_x anordningen skall komma upp i arbetstemperatur. Genom att kombinera SINO_x tekniken med en nyutvecklad plasmateknik har man i labbförsök lyckats reducera NO_x emissionerna med upp till 90% redan vid 160°C avgastemperatur.

3.5 SAMMANFATTNING

Gasbränslen som fordonsbränsle innebär låga emissioner och hög verkningsgrad, den senare dock ej i nivå med de bästa dieselmotorerna. Fördelarna gentemot dieseln ligger i lägre emissioner och även mindre buller.

Tack vare effektiva katalysatorer och snabb motorutveckling uppvisar dagens bästa bensinfordon mycket låga emissioner utom för CO₂. Hybriddrift kan sänka emissionerna från bensindrivna bilar ytterligare och denna teknik är på stark frammarsch. De två främsta hybridbilarna är Honda Insight och Toyota Prius.

Bland personbilarna är en av de absolut miljövänligaste bilarna, eventuellt den bästa, ett dedicerat naturgasfordon som ännu inte finns på den svenska marknaden. Det pågår en snabb utveckling även för bensinmotorer och Hondas ZLEV teknik ser ut att kunna innebära goda miljöprestanda. Prototypen för BMW 523g har dock emissionsdata som är mycket bättre än för något annat existerande fordon.

Överhuvudtaget är den svenska marknaden för alternativbränslefordon begränsad även om andelen bussar för alternativbränslen har ökat snabbt under de senaste åren. Gasdrift av bussar innebär kraftigt reducerade emissioner av NO_x, CO och partiklar jämfört med diesalbussar.

Precis som för värmepannor är den tekniska livslängden på fordon lång och det tar åtskilliga år innan ny teknik slår igenom inom fordonssektorn. Teknik som introduceras idag har inte fått något större genomslag förrän om 10-15 år vilket betyder att skärpta utsläppskrav enligt miljöklass 1 år 2006 i praktiken slår igenom först runt 2015 - 2020.

3.6 REFERENSER

- 3.1 <http://www.dong.dk>
- 3.2 Nils-Olof Nylund & Alex Lawson, Exhaust emissions from natural gas vehicles. IANGV Position Paper 2000, <http://www.iangv.org> , mars 2000.
- 3.3 <http://www.euweb.de/NGVeuropa/>
- 3.4 <http://www.volvo.com>
- 3.5 <http://www.scania.com>
- 3.6 Volvo miljöredovisning 2000.

- 3.7 Volvo Bussar och alternativa bränslen. Naturgas och biogas. Volvo Bussar.
- 3.8 Nylund, N-O. et al., Performance evaluation of alternative fuel/engine concepts 1990 - 1995. Final report including addendum of diesel vehicles. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1996.
- 3.9 <http://www.vcacarfueldata.org.uk>
- 3.10 <http://www.afdc.nrel.gov/>
- 3.11 <http://www.epa.gov>
- 3.12 <http://www.gronabilister.com/>
- 3.13 http://www.honda2001.com/models/natural_gas_civic/intro.html
- 3.14 Environmental Report 1999/2000, Volkswagen.
- 3.15 Miljöbästa val bland svenska personbilar, Gröna Bilister, 2001.
- 3.16 Toshiyuki Suga, et al, Potential of a Low-Emission Natural Gas Vehicle for the 21st century. 7th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Yokohama, Japan 17-19 oktober 2000.
- 3.17 Personlig kommunikation med Nils Lekeberg, Ford Sverige.
- 3.18 Micheal Heitzer, et al, Achieving Low Emissions and High Engine Performance with Natural Gas. 7th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Yokohama, Japan 17-19 oktober 2000.
- 3.19 Christian Nellen & Konstantinos Boulouchos, Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero Emissions through Turbocharging, EGR and 3-way Catalytic Converter. SAE Paper 2000-01-2825.
- 3.20 <http://www.aftonbladet.se/nyheter/9901/25/diesel.html>
- 3.21 Sydsvenska Dagbladet 2001-04-12.
- 3.22 <http://www.chassisdynamometer.com/Rotonews/index.html>
- 3.23 Håkan Johansson, Bensin eller dieseldriven personbil vad är bäst för miljön? Vägverket Publikation 2001:40, Borlänge 2001.
- 3.24 <http://www.ukcar.com/features/tech/Engine/diesel/pf.htm>
- 3.25 Norbert Andersson, Katalysator gör dieseln renare än bensinbilen. Ny Teknik 2001-09-05.
- 3.26 The slurry phase distillate process. Natural gas to liquid fuels, SASOL, 1997.

4 PROCESSVÄRME OCH UPPVÄRMNING – PANNOR OCH BRÄNNARE

Med värmepanna avses en eldriven eller bränsleeldad panna som levererar värme i form av hetvatten för t.ex. lokaluppvärmning eller industriändamål. Det finns olika indelningsgrunder för värmepannor beroende på storleken, pannor upp till cirka 150 kW tillförd bränsleeffekt säljs oftast som färdiga enheter av sammanbyggd brännare, panna och kringutrustning. Upp till 10 MW tillförd bränsleeffekt levereras brännare och eldstad i separata enheter, ofta av olika fabrikat. Över 10 MW tillförd bränsleeffekt är brännarna inte längre av monoblock typ utan består av separat fläkt, brännare och kringutrustning.

En annan indelningsgrund är efter bränslet och då kan man skilja på:

- Gaspannor
- Oljepannor
- Fastbränslepannor

Slutligen kan man dela in värmepannor i kondenserande och icke kondenserande typer. I föreliggande studie behandlas alla pannor och brännare upp till 5 MW tillförd bränsleeffekt.

4.1 UPPVÄRMNING I SVERIGE

Energiåtgången för uppvärmning av småhus, flerbostadshus och lokaler fördelat på olika uppvärmningsformer framgår av Tabell 4-1.

Tabell 4-1 Uppvärmningsformer i Sverige 1999 [4.1,4.2,4.3].

Uppvärmningssätt	Småhus (TWh)	Flerbostadshus (TWh)	Lokaler (TWh)	SUMMA
Olja	12,6	3,8	4,7	21,1
Fjärrvärme	2,5	22,3	14,5	39,3
Elvärme	16,1	1,8	3,6	21,5
Naturgas	0,1	0,5	0,6	1,2
Ved, flis, spån, pellets	9,6	i.u.	i.u.	9,6
SUMMA	40,9	28,4	23,4	92,7

i.u. = ingen uppgift

Elvärme är den dominerande uppvärmningsformen i svenska småhus men även olja och bibränslen används i stor utsträckning medan fjärrvärme är den dominerande uppvärmningskällan i flerbostadshus. För lokaler gäller samma förhållande som för flerbostadshus: fjärrvärme är den dominerande energikällan. För såväl lokaler som flerbostadshus gäller att bibränslen används i mindre omfattning.

Naturgas står för en mycket liten del av uppvärmningen av svenska fastigheter (1,2 TWh). Dels har naturgas endast funnits tillgängligt i Sverige i 15 år, dels är man bunden till ledningsnätets sträckning i Syd- och Västsverige. Utomlands har naturgasen en prioriterad ställning på uppvärmningsmarknaden och är det primära uppvärmningsalternativet i många europeiska länder.

4.2 BEGREPP

Två viktiga begrepp i samband med pannor är pannverkningsgraden och årsmedelsverkningsgraden. Definition av dessa begrepp ges nedan.

4.2.1 Pannverkningsgrad

Pannverkningsgraden (η_p) anger förhållandet mellan den till pannan tillförda bränsleenergin ($E_{\text{tillförd}}$) och den av värmesystemet nyttigjorda energin (E_{System}).

$$\eta_p = \frac{E_{\text{System}}}{E_{\text{Tillförd}}}$$

Pannverkningsgraden tar alltså hänsyn till:

- Rökgasförluster
- Förluster genom pannans ytterhölje
- Förluster till följd av oförbrända kolväten

Speciellt för gaspannor är det viktigt hur verkningsgraden anges eftersom en modern gaspanna vanligen utnyttjar kondenseringsvärmen i avgaserna. Värmevärdet för naturgas anges i de flesta europeiska länder som det undre värmevärdet. Det är lika med den energi som frigörs vid förbränningen minus den energi som finns som kondenseringsvärme i avgaserna. P.g.a. denna definition av värmevärdet kan verkningsgraden för kondenserande gaspannor bli över 100% räknat på det undre värmevärdet.

4.2.2 Årsmedelsverkningsgrad

Årsmedelsverkningsgraden anger hur mycket av den till pannan tillförda energin som kommer värmesystemet till godo i medeltal över ett år. Den är *beräknad* för typfall, t.ex. för hus med ett årsbehov på 25 000 kWh värme och varmvatten men eftersom ett antal olika faktorer påverkar årsmedelsverkningsgraden är det vanskligt att göra direkta jämförelser mellan olika beräkningsresultat. Faktorer som kan påverka årsmedelsverkningsgraden är exempelvis:

- Dimensioneringen av pannan i förhållande till husets värmebehov och integrationen med värmesystemet.
- Pannans skick (ålder, eventuella skador etc.)
- Om pannan används för varmvattenproduktion sommartid. Undersökningar av bl.a. DGC visar att medelverkningsgraden sommartid kan ligga 20-30 procentenheter under verkningsgraden vintertid. Detta beror på att förlusterna sommartid är förhållandevis höga då pannan endast används för varmvattenproduktion.

4.3 BRÄNNARTEKNIK FÖR GAS- OCH OLJEPANNOR[4.4,4.5]

4.3.1 Atmosfärsbrännare för gas

Lufttillförseln i atmosfärsbrännare sker i två steg, dels genom ejektorverkan och dels genom diffusion vid flammen. Vanligen tillsätts 40-60% av det stökiometriska luftbehovet före flammen via ejektorverkan (primärluft) och resten genom diffusion vid flammen (sekundärluft). Atmosfärsbrännare är vanliga i värmepannor upp till 1 MW. Genom att öka mängden primärluft och även gå över till överstökiometrisk förbränning har man lyckats sänka NO_x emissionerna från atmosfärsbrännare ordentligt.

4.3.2 Premixbrännare (förblandningsbrännare) för gas

Till skillnad från atmosfärsbrännaren sker blandningen av all förbränningsluft och bränsle före förbränningen. Förblandningsbrännare är vanliga i mindre gaspannor och ger generellt sett mycket låga emissioner tack vare låg förbränningstemperatur.

4.3.3 Fläktgasbrännare för gas och olja

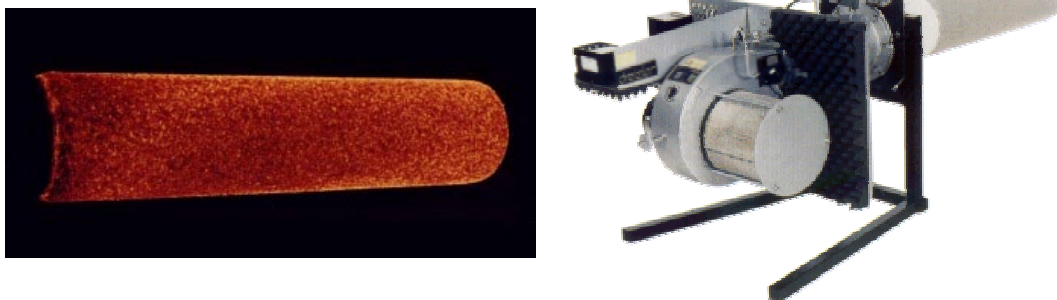
I fläktgasbrännaren tillförs förbränningsluften mekaniskt genom en fläkt varefter bränsle och luft blandas i brännarhuvudet. En högre effekttäthet kan uppnås jämfört med atmosfärsbrännare. Fläktgasbrännare används i applikationer i alla storleksklasser.

4.3.4 Katalytiska brännare för gas

Katalytiska brännare karakteriseras av att förbränningen sker vid ytan av ett katalytiskt skikt och att emissionerna från en rätt utformad och välfungerande katalytisk brännare ligger på mycket låga nivåer. P.g.a. den låga yttemperaturen förekommer katalytiska brännare idag endast i mindre pannor.

4.3.5 Fiberbrännare för gas

Karakteristiskt för en fiberbrännare är att en större del av värmeöverföringen sker genom strålning jämfört med traditionella brännartyper. Den fullständigt förblandade blandningen av bränsle och luft förbränns på ytan av ett tunt keramiskt eller metalliskt fibermaterial. Fördelen är att emissionerna kan hållas mycket låga men fiberbrännare är dyrare än traditionella brännare och finns bara i storleksklasser under cirka 5 MW. Figur 4.1 visar exempel på en fiberbrännare.



Figur 4.1 Dreizler Magma fiberbrännare, $NO_x < 10 \text{ mg/MJ}$.

4.3.6 Modulerande brännare för gas och olja

En brännare vars effekt kan regleras kontinuerligt kallas modulerande brännare. Tidigare förekom sådana brännare enbart på större pannor men finns nu även för småpannor. En högre kostnad för modulerande brännare kompenseras mer eller mindre av en höjd pannverkningsgrad vid varierande last. Andra fördelar med modulerande brännare jämfört med on-off brännare är högre livslängd och lägre emissioner.

4.4 SMÅ VÄRMEPANNOR

Småhuspannor består vanligen av följande delar:

- Eldstad med ytor för värmeöverföring och varmvattenberedning
- Brännare med eventuell fläkt
- Kringutrustning som pumpar m.m.
- Utrustning för bränsletillförsel

Beroende på val av bränsle blir behovet av kringutrustning olika stort, en gaspanna kräver endast gasmätare och anslutning till gasnätet, en oljepanna kräver en oljetank medan en fastbränslepanna kräver både utrustning för tillförsel av bränsle och förvaring av bränsle och en eventuell ackumulatortank.

För bara några år sedan var de flesta småhuspannor dimensionsmässigt ganska stora och med hänsyn till lukt, buller m.m. var det nödvändigt att placera pannorna i separata utrymmen. Snabb utveckling har medfört att dagens småhuspannor, och då speciellt små gaspannor, är mycket små (t.ex. 80x50x40 cm) och därför kan placeras inne i bostaden, se Figur 4.2. För en vägghängd gaspanna behövs ingen skorsten i traditionell mening utan rökgaserna leds ut genom en öppning i väggen. För biobränslepannor är det svårt att genomföra denna konstruktion beroende på att en del kringutrustning krävs. För oljeeldning finns det nu en vägghängd kondenserande oljepanna på marknaden, se Figur 4.3 [4.8].



Figur 4.2 Vägghängd gaspanna med skyddskåpan borttagen.



Figur 4.3 Vägghängd oljepanna med skyddskåpan borttagen.

4.4.1 Kringutrustning

Förutom att gaspannor dimensionsmässigt är mycket små, är även behovet av kringutrustning litet. Det behövs t.ex. inget lager då bränslet finns tillgängligt hela tiden. För övriga bränsleslag finns det behov av såväl lagerutrymme och att bränslet måste fyllas på en eller flera gånger varje år. Tabell 4-2 visar behovet av kringutrustning vid eldning med olika bränslen. Med gasbränslen behövs ingen kringutrustning medan såväl olja som biobränslen behöver lagringsutrymme. Vad det gäller biobränslen måste pannan också tömmas på aska cirka en gång i veckan och askan kan för det mesta användas i den egna trädgården om det inte rör sig om stora mängder.

Tabell 4-2 Behov av kringutrustning vid eldning med olika bränslen.

	Skorsten	Lagerbehov	Restprodukter
Gaspanna	Behövs ej för vägghängd panna	Inget behov av lager	Inga
Oljepanna	Ja (Behövs ej för vägghängd panna)	Ja, 2-4 m ³ per år	Inga
Biobränslepanna	Ja	Ja, 8-12 m ³ per år	Aska, tömning/sotning cirka 1 gång per vecka

4.4.2 Kaskadkoppling

Genom att kaskadkoppla flera mindre enheter går det att använda små värmepannor även för att täcka uppvärmningsbehovet i större byggnader, se Figur 4.4. Exempelvis innebär 8 stycken pannor med en maximal effekt på vardera 60 kW att man erhåller 480 kW i kaskadkoppling samt en rad fördelar såsom:

- Extremt goda dellastegenskaper. Om pannorna är försedda med modulerande brännare kan ett reglerförhållande på upp till 50:1 erhållas med bibehållen hög verkningsgrad.
- Extremt hög säkerhet mot haverier. Även om en enhet går sönder så kan värmesystemet med största sannolikhet ändå täcka byggnadens värmebehov. Med en större panna är man beroende av back-up.



Figur 4.4 Kaskadkoppling av fyra mindre pannor.

4.4.3 Kondenserande och icke-kondenserande pannor

I en icke-kondenserande panna tillåter man inte att rökgastemperaturen sjunker under vattenångas daggpunkt i skorstenstoppen. Det innebär att en stor mängd energi finns bundet i form av vattenånga i rökgaserna. Genom att sänka rökgastemperaturen under daggpunkten, cirka 60°C vid gaseldning och stökiometrisk förbränning, frigörs kondensationsvärmen i rökgaserna. Sänkningen av rökgastemperaturen åstadkommes genom kylning med returvattnet från värmesystemet vilket förutsätter ett lågtemperatursystem.

Kondensation innebär att bränslets hela energiinnehåll utnyttjas och det medför att verkningsgraden kan uppgå till över 100% om den beräknats med utgångspunkt från bränslets undre värmevärde.

För en del pannor inom t.ex. processindustrin har returvattnet till pannan för hög temperatur för att kunna kyla rökgaserna under vattenångas daggpunkt. Då kan istället en separat värmeväxlare monteras in som kyler rökgaserna mot en separat krets med lägre temperatur på det kylmediet. På så sätt kan kondensationsvärmen ändå tas till vara.

Kondensering lämpar sig väl för naturgaspannor eftersom naturgas i princip inte innehåller något svavel. Om svavel är närvarande finns risk för korrosion i avgaskanalen och hänsyn måste tas till sådana risker vid val av material.

Det finns även kondenserande oljepannor. Viessmann lanserade sin vägghängda oljepanna Vitoplus 300 med över 100% verkningsgrad i mars 2001, se Figur 4.3. Den beräknas finnas ute på marknaden i slutet av 2001. CTC har utvecklat två olika typer för den tyska och schweiziska marknaden men det är i dagsläget ej klart om eller när dessa lanseras i Sverige. För kondenserande oljepannor kan svavelutsläppen minskas genom att rökgaserna tvättas i en skrubber, dock är denna teknik inte använd i villapannor. Större oljeeldade anläggningar kan liksom gaspannor förses med ett separat kondenseringssteg.

Kondenserande biobränslepannor finns även framtagna i mindre omfattning för villaapplikationer och det finns ett koncept utvecklat i Sverige [4.6]. För större biobränsleeldade anläggningar kan de precis som olje- och gaspannor förses med ett separat kondenseringssteg.

4.5 OLJE- OCH GASPANNOR

Medan mindre värmepannor vanligen säljs som sammanbyggda enheter av brännare och panna så upphandlas större värmeanläggningar i delar där kunden själv kan bestämma kombination brännare/panna. Detta innebär att verkningsgrad och emissioner inte enbart är beroende av brännarteknik och bränsle utan även av bl.a.:

- Typ av panna
- Eldstadens utformning
- Tillämpning (hetvatten- eller ångproduktion)

En och samma brännare kan således ge mycket varierande emissioner beroende på vilken typ av panna den är placerad i och hur eldstaden ser ut i den aktuella pannan. För effekter upp till cirka 10 MW går det att köpa brännare som monoblock, d.v.s. kompletta standardbrännare med fläkt och reglerutrustning men för effekter däröver är brännarna oftast specialbyggda och kunderna får själva kombinera brännare med lämplig fläkt och reglerutrustning.

Stora pannor är vanligen av trestråkstyp med brännaren placerad centralt i pannan och rökgaserna vänder två gånger och värmeväxlas mot vatten i tuber placerade runt eldstaden, se principskissen i Figur 4.5.



Figur 4.5 Bild av trestråkspanna.

4.6 FASTBRÄNSLEPANNOR

Pannor för fastbränsle skiljer sig en del från olje- och gaspannor eftersom bränslet tillförs i fast form och förgasas.

4.6.1 Rostpannor

I en rostpanna ligger bränslet på rosten medan förbränningsluften tillförs genom rosten och bränslet. Rostpannor delas även in efter hur rosten ser ut och hur bränslet tillförs, exempel på rostpannor är:

- Snedrost (rörlig/fast)
- Plan rost (rörlig/fast)
- Trappstegsrost (rörlig/fast)
- Vibrerande rost
- Fast rost med bränslematning underifrån
- Fast rost med bränslematning från sidan

Andra faktorer som kan variera är om anläggningen har en förugn eller ej, om bränslet tillförs automatiskt samt hur rosten kyls. Ett problem med rostpannor är att luftöverskottet och produktionen av brännbara gaser varierar över rosten vilket innebär att förbränningen inte sker optimalt överallt. Detta kallas stråkbildning och är det stora problemet med biobränsleeldade anläggningar, inte bara för rostpannor utan även för fluidbäddspannorna.

4.6.2 Fluidbäddspannor

Fluidbäddar påminner om rosteranläggningar bortsett från att rosten är ersatt med en bädd antingen en cirkulerande fluidiserande bädd (CFB) eller en bubblande fluidiserande bädd (BFB).

4.6.3 Pannor med brännare

Användningen av förädlade träbränslen har ökat kraftigt under de senare åren och många pannor för förbränning av pellets eller träpulver är idag försedda med brännare snarare än roster. Om träpulver används kan detta eldas direkt i brännaren annars måste även brännaren kunna sönderdela bränslet. Det gäller att bränslet fördelas homogent och med ungefärlig lika storlek i hela eldstaden annars kan lokala zoner med över- eller undertemperaturer uppstå med ej optimal förbränning som följd.

4.7 TEKNIK FÖR EMISSIONSMINSKNING

Den tekniska utvecklingen inom pann- och brännarområdet har under de senaste åren fokuserat mot en minskning av emissionerna av luftförorenande ämnen. De emissioner som främst berörs är svavel, kväveoxider, koloxid, oförbrända kolväten och stoft.

4.7.1 Svavelutsläpp

Svavelutsläppen hänger samman med det använda bränslets svavelhalt och för naturgas är den dominerande källan (över 90%) till svavel det luktämne som tillsätts gasen för att läckage skall kunna detekteras av människor. Eo1 och förädlade biobränslen innehåller högre halter svavel, se Tabell 4-3, och ger upphov till högre svavelutsläpp än naturgas. De är dock relativt låga i moderna anläggningar. Det finns möjlighet att tvätta rökgaserna från svavel i en skrubber.

Tabell 4-3 Svavelhalt i olika bränslen.

	Svavelhalt	Svavelhalt
Naturgas	10-20 mg/Nm ³	0,25-0,5 mg/MJ
Eldningsolja 1	Max 0,1 viktprocent	23 mg/MJ
Träpellets och -briketter	≈ 0,04 viktprocent	≈ 24 mg/MJ

4.7.2 Kväveoxider (NO_x)

Man skiljer på termisk NO_x och bränsle NO_x. Termisk NO_x bildas vid höga temperaturer genom förening av förbränningsluftens kväve och syre. Genom att sänka förbränningstemperaturen kan man således sänka bildningen av termisk NO_x.

För att hålla nere termisk NO_x bildning är det viktigt att det inte uppstår lokala zoner med hög temperatur i eldstaden s.k. "hot-spots" och att bränslet är homogent. Det är därför lättare att hålla nere NO_x halterna vid förbränning av naturgas och olja.

Bränsle NO_x bildas genom förening mellan kväve i bränslet och syre i förbränningsluften. Emissioner av bränsle NO_x är alltså direkt relaterat till bränslets kväveinnehåll. Dansk naturgas innehåller inget kväve utan den enda process som är aktuell är termisk NO_x . Olja innehåller små mängder kväve vilket leder till högre NO_x emissioner än för naturgas.

Termisk NO_x är den dominerande källan och några exempel på olika metoder för reducering av termisk NO_x ges nedan.

Avgasrecirkulation. Genom att återföra delar av avgaserna till förbränningsutrymmet, sänks temperaturen och syrekoncentrationen vid förbränningen. Återföringen kan antingen göras externt genom att rökgaser leds tillbaka och blandas med förbränningsluften eller internt genom att recirkulationszoner skapas i eldstaden.

Dock kan avgasrecirkulation leda till att pannans effekt minskar, att flaminstabilitet inträder samt i värsta fall till att kondensvatten från avgaserna bidrar till korrosion.

Vatteninsprutning. Genom att spruta in vatten sänks temperaturen vid förbränningen vilket minskar NO_x bildningen. Dock har detta vissa andra nackdelar som:

- Om rökgaserna ej tillåts kondensera ökar rökgasförlusterna genom att ytterligare vatten måste förångas.
- Kalkhaltigt vatten kan leda till kalkavlagringar inne i pannan med sämre värmeöverföringsförmåga och därmed lägre pannverkningsgrad som följd.

Höga luftöverskott. I överstökiometrisk brännare håller det höga luftöverskott temperaturen nere och därmed också NO_x -bildningen.

Bättre omblandning. För biobränslepannor är den stora källan till NO_x att förbränningen inte sker optimalt. Bättre omblandning mellan förbränningsluft och brännbara gaser sänker NO_x emissionerna.

"Låg- NO_x brännare". Låg NO_x brännare används som samlingsnamn på brännare som använder sig av en eller flera av ovanstående tekniker för att minska NO_x -bildningen.

4.7.3 Oförbrända kolväten

Oförbrända kolväten bildas genom för lite syretillgång, ofullständig förbränning samt korta uppehållstider. Det är framförallt under startfasen som emissionerna av oförbrända kolväten är höga och antalet start och stopp skall alltså hållas nere. Reduktion av oförbrända kolväten under normal drift efter startfasen sker uteslutande genom förbränningstekniska åtgärder.

4.7.4 Koloxid (CO)

Koloxid bildas genom att förbränningen inte sker fullständigt överallt eller i delar av eldstaden. CO emissioner från olje- och gasbrännare är idag i praktiken lika med noll på moderna anläggningar som sköts regelbundet. Även för dagens bästa biobränsleeldade anläggningar är CO emissionerna relativt låga till följd av god förbränning.

4.7.5 Stoft

Emissioner av stoft är inga problem för vare sig olje- eller gaspannor idag men för biobränsleeldade anläggningar krävs det reningsutrustning. Vanligen används en eller flera av följande metoder:

- Elektrofilter
- Slangfilter
- Cykloner
- Rökstovvätt med rökstovvätt

4.8 PRESTANDA FÖR MODERNA PANNOR OCH BRÄNNARE

Med ledning av uppgifter från bl.a. tillverkare av värmepannor och brännare har gjorts en sammanställning av prestanda med dagens bästa teknik vad gäller pannverkningsgrad och emissioner från gas- och oljepannor, gas- och oljebrännare samt fastbränslepannor. Data för gaspannor avser kondenserande pannor. Värdena för fastbränslepannor avser sådana eldade med förädlade bränslen, d.v.s. briketter eller pellets.

Tabell 4-4 Sammanställning av data för olika pann typer med dagens bästa teknik [4.7,4.8,4.9,4.10,4.11,4.12,4.13].

	CO (mg/MJ)	CO ₂ (g/MJ)	NO _x (mg/MJ)	UHC (mg/MJ)	Stoft (mg/MJ)	η (%)
Gaspanna < 25 kW	4	57	2,5	i.u.	≈0	>100
Gaspanna ≈ 500 kW	1-5	57	<10	i.u.	≈0	>100
Gasbrännare ≈ 5 MW	1-5	57	<10	i.u.	≈0	>90
Oljepanna < 25 kW	<2	76	<20	i.u.	≈0	≈95
Oljepanna ≈ 500 kW	1-5	76	<35	i.u.	≈0	≈95
Oljebrännare ≈ 5 MW	1-5	76	<35	i.u.	≈0	>90
Fastbränslepanna < 30 kW Förädlade biobränslen	<5	0***	<80	<1	<10	≈95
Fastbränslepanna ≈ 500 kW Förädlade biobränslen	<15 ppm**	0***	<80	i.u.	*	>90
Fastbränslepanna ≈ 5 MW Förädlade biobränslen	<15 ppm**	0***	≈50	i.u.	*	>90

* Beroende på val av reningsutrustning

** Vid 5% O₂, cirka 10-15 mg/MJ

*** Nettoemission från förbränning

Med dagens bästa teknik för värmeproduktion erhålls mycket låga emissioner av CO och NO_x samtidigt som verkningsgraden är hög. Som framgår av tabellen uppvisar gaseldade kondenserande pannor de bästa energi- och miljöegenskaperna.

Utvecklingen har dock gått snabbt även för de andra bränslena och för bibränsleeldade pannor är emissionerna mycket låga jämfört med vad som var standard för bara några år sedan. Idag är pellets pannor helt överlägsna vedpannorna vad det gäller energi- och miljöprestanda. Testresultaten är hämtade från panntester gjorda i Österrike som till skillnad från de svenska testresultaten är offentliga. Ett ytterligare skäl att titta på just Österrike är att Österrike har bland de hårdaste kraven på mindre bibränsleeldade pannor som finns i Europa och att teknikutvecklingen därmed har tvingats längre än exempelvis i Sverige.

Som tidigare nämnts säljs större pannor sällan som kompletta enheter utan istället som separat panna och brännare, ofta av olika fabrikat. Det finns med andra ord många möjligheter att kombinera olika brännare och pannor men det går att konstatera att med den bästa teknik som erbjuds idag kan mycket goda energi- och miljömässiga förhållanden uppnås med gasbränslen. NO_x emissioner under 10 mg/MJ även för brännare upp till 5 MW är fullt möjligt med keramiska fiberbrännare. Även för oljebrännare kan låga emissionsnivåer erhållas, dock ej i nivå med gasbrännarna. De siffror som presenteras för brännare i Tabell 4-4 förutsätter att brännare och eldstad har anpassats till varandra så långt som möjligt.

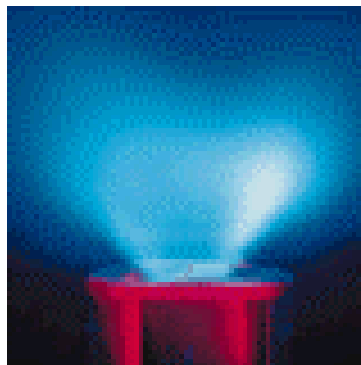
I Tabell 4-5 ges data för tre kommersiella villapannor med mycket goda prestanda vad gäller emissioner och verkningsgrad.

Tabell 4-5 Exempel på kommersiella villapannor.

	Viessmann VITODENS 300	Viessmann VITOLA 300	Hargassner HSV 14 & 15
Bränsle	Naturgas	Olja	Pellets
Brännare	MatriX	RotriX	
Effektområde	8-24 kW modulerande	18-27 kW	4-16
CO (mg/MJ)	<5	<1,5	<20*
NO _x (mg/MJ)	<3	<20	<80*
CO ₂ (g/MJ)	57	76	0**
UHC (mg/MJ)	≈0	i.u.	<1
Stoft (mg/MJ)	≈0	≈0	<10
Verkningsgrad	>100%	≈95%	≈95%

*Gäller vid fullast ** Nettoemission från förbränning

Viessmanns brännare MatriX och RotriX, se Figur 4.6 och Figur 4.7, ger emissioner som är mycket låga både för olja och gas. Jämfört med äldre vedpannor uppvisar pellets pannan från Hargassner mycket bättre miljö- och energiegenskaper. Det finns även moderna vedpannor som uppvisar goda energi- och miljöegenskaper, dock inte i nivå med de bästa pellets pannorna. Det är framförallt vid dellast som emissionerna från vedpannorna är väsentligt högre än för pellets pannorna.



Figur 4.6 RotriX oljebrännare från Viessmann.



Figur 4.7 MatriX gasbrännare från Viessmann.

4.9 UTVECKLINGSTENDENSER

Moderna pannor har mycket lägre emissioner än de som var nya för bara 10 år sedan. Förbränningsteknisk utveckling i kombination med stränga miljökrav i stora länder som Tyskland har medfört att emissionerna från moderna pannor är mycket låga och denna utveckling har gått mycket snabbt. Det är framförallt förbränningstekniskt som utvecklingen har skett, i oljebrännare har man exempelvis hämtat teknik från gasturbinområdet.

Ett resultat av detta är att en panna kan ha en teknisk livslängd på över 30 år och många pannor som är installerade i Sverige är därför omoderna ur energi- och miljösynpunkt. Framförallt är det äldre vedpannor utan ackumulatortank som kan ha flera tiopotenser högre emissioner än moderna pannor. Den långa livslängden gör att det tar 10-15 år innan ny och effektivare teknik slår igenom på allvar.

4.9.1 Gaspannor

Gaspannornas verkningsgrad ligger redan nu mycket högt och ytterligare förbättringar kommer att ligga i storleken tiondelars höjning. Ett angeläget FoU område är att studera hur gaspannor skall integreras i befintliga värmesystem och hur underhållssidan kan effektiviseras.

Felaktiga installationer kan leda till att pannans prestanda ligger långt under den som garanterats och kondenserande gaspannor har högre underhållskostnad jämfört med andra pannor [4.14]. Andra intressanta områden är uppföljning av befintliga installationer avseende pannans prestanda efter ett antal år i drift och för kondenserande pannor även hur skorstensinsatser har påverkats.

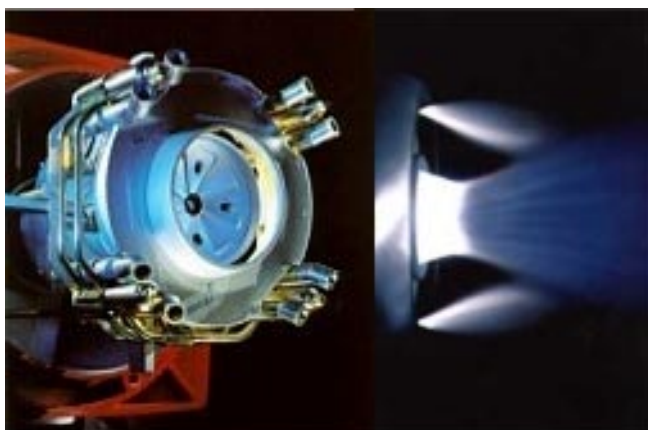
En viss utveckling inom brännarområdet kan förväntas på gassidan. Emissionerna är redan idag mycket låga ($\text{NO}_x \approx 5 \text{ mg/MJ}$, $\text{CO} \approx 2 \text{ mg/MJ}$) men utveckling kan sänka emissionerna ytterligare något. Vi har ännu inte sett vad man kan åstadkomma med den katalytiska tekniken och i ett SGC projekt testas en katalytisk brännare med samtidig värmewäxling. Denna kommer troligen att erbjuda emissioner under dagens bästa gaspanna samtidigt som enheten blir mycket kompakt och får ett brett reglerområde.

Ett koncept som tagits fram av Vaillant är en gaspanna med bränslecell som beräknas komma på den tyska marknaden 2002/2003. Tekniska data är 5 kW_{el} och $7 \text{ kW}_{\text{värme}}$ från bränslecellen och för vintern finns det back-up i form av en 28 kW gasbrännare. Bränslecellen är av PEM-typ som drivs med vätgas som produceras ur naturgas i en reformer i pannan. Totalverkningsgraden beräknas till över 80% och emissionerna av NO_x , CO och HC är låga. Den miljömässiga fördelen med bränslecellen är om den kan ersätta el producerad med fossil kondenskraft. Marknadspotentialen uppskattas till runt 100.000 enheter i Europa år 2010 [4.15].

Kombinationen av ökande verkningsgrader och energisnålare hus har lett till att man har börjat undersöka hur mycket energi som går åt till att driva kringutrustning som pumpar, fläktar, elektronik m.m. Undersökningar vid DGC har visat att elförbrukningen för kringutrustning kan vara över 10 % av den totalt tillförda energimängden i en modern gaspanna. Gasunie har genom att bygga in termoelement i en panna, visat att det går att få en panna som är självförsörjande på el. Detta har ett antal fördelar, exempelvis att man inte är beroende av eltillförsel för att värmesystemet skall fungera. Tekniken är idag alltför dyr för att säljas kommersiellt men kostnaderna är på väg nedåt. Det kan poängteras att tekniken med termoelement fungerar oberoende av bränsle.

4.9.2 Oljepannor och oljebrännare

Liksom för gasbrännare ligger utvecklingen av oljebrännare mycket långt framme och emissionsnivåerna är mycket låga med dagens bästa teknik. Det är hårda miljökrav från främst Tyskland och Schweiz som drivit på utvecklingen och de stora tillverkarna som agerar på den internationella marknaden har anpassat sig efter dessa krav. Utvecklingen fortsätter dock inom området och pågående projekt är bl.a. multiflamtekniken som är en ny låg- NO_x - teknik för stora oljebrännare. Multiflamtekniken tas fram av Weishaupt och kommer att innebära ytterligare sänkta emissioner för större oljebrännare, se Figur 4.8 [4.16].



Figur 4.8 Bilder av multiflambrännare och låga.

Viessmann har utvecklat oljebrännaren RotriX som ger mycket låga emissioner. Tekniken bygger på samma koncept som används i ALSTOMS:s gasturbiner och ger NO_x emissioner runt 15-20 mg/MJ och CO emissioner på under 2 mg/MJ, d.v.s CO emissioner i nivå med den bästa gaspannan. RotriX brännaren bygger på en hög rökgasåterföring vilket dock innebär relativt höga NO_x emissioner under startfasen men efter cirka 60 sekunders drift har NO_x emissionerna gått ned till cirka 20 mg/MJ.

4.9.3 Fastbränslepannor eldade med biobränslen

Vedpannor, och då framförallt äldre vedpannor, uppvisar fortfarande höga emissioner men en övergång till pellets i kombination med ökade krav avseende emissioner från just vedpannor bör rimligen leda till förbättrade energi- och miljöegenskaper. För vedpannor kan t.ex. en ackumulatortank sänka emissionerna väsentligt men trots detta är de ett klart sämre val än exempelvis en pelletspanna. Små pelletspannor uppvisar goda energi- och miljömässiga egenskaper. Även för större panncentraler är emissionerna från pelletseldade pannor förhållandevis låga, dock ej i nivå med de bästa olje- och gaspannorna när det gäller NO_x , CO och partiklar. En fördel med eldning med biobränslen är att nettoemissionerna av CO_2 från förbränningen är noll räknat över en längre tidsperiod.

Studier visar att emissionerna av NO_x och CO kan sänkas till en bråkdel av ursprungsvärdena med hjälp av katalysatorer. Praktiska försök på en existerande vedpanna gav att CO emissionerna kunde sänkas med över 60 % och försök i mindre skala under väl kontrollerade former indikerar att en nästan hundra procentig reduktion av CO kan uppnås. En aspekt som är viktig är tändningen av vedpannor, ett flertal studier har visat att det är under tändningsfasen som emissionerna är högst och undersökningen visar att tändning med så torrt bränsle som möjligt är viktigt för att uppnå låga emissioner. Även här kan katalysatortekniken hjälpa till att sänka emissionsnivåerna och tester vid KTH visar att emissionerna av kolväten i startfasen kan reduceras betydligt genom att förvärma katalysatorn till runt 200°C [4.17]. För större anläggningar, rostpannor eller bäddpannor är problemet att styra förbränningen bättre och att åstadkomma jämn förbränning i hela eldstaden.

Rostpannor. Man arbetar för att utveckla bättre omblandning av gaserna som kommer upp från bränslebädden i pannan. Tekniken har testats på en panna och man lyckades reducera NO_x emissionerna med 20% och erhöll samtidigt så låga halter av oförbrända kolväten att de inte kunde mätas. Andra metoder som undersöks är om IR-teknik kan användas för att bättre styra förhållandena i bädden. Idealiskt skulle NO_x emissionerna kunna reduceras med 30-50%.

Fluidbäddspannor. Ett problem med fluidbäddspannor är att sintring i bädden inträffar och detta beror på en sned förbränningsbild i bädden med lokalt höga temperaturer. Forskning om hur lufttillförseln i bädden styrs optimalt pågår och ett demonstrationsprojekt har pekat mot NO_x reduktion i storleksordningen 25%. Andra projekt är forskning kring bättre spridning av bränsle över bädden och hur SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) kan användas utan att ammoniakslipet blir alltför högt.

Pannor med brännare. Det svåraste med brännare för träbränslen är att förstå hur strömningsbilden ser ut inne i pannan och hur förbränningsförhållandena ser ut vid dellast. Forskning kring detta pågår och CFD tekniken har genom den snabba datorutvecklingen kunnat användas i större utsträckning. Andra pågående projekt är forskning kring karakterisering av träpulver och hur olika pulverkvaliteter påverkar förbränningen.

4.9.4 Andra brännartyper

I industriprocesser med måttliga temperaturkrav kan gaseldade vätskevärmare vara ett alternativ. Det finns modeller där avgaserna leds ut genom vätskan och det finns modeller där avgaserna leds genom vätskan i ett slutet system. Om avgaserna leds genom vätskan och önskad vätsketemperatur ligger under avgasernas daggpunkt kommer kondensation att ske i vätskan med en mycket hög verkningsgrad som följd.

Typiska data för brännare för vätskevärmning är [4.19]:

Effekt	Max 2500 kW
Reglerområde	25:1
CO	3-20 mg/MJ
NO _x	50-60 mg/MJ

Mer om vätskevärmning kan läsas i en rapport från DGC och i industribrännarkatalogen från DGC [4.18,4.19].

En pulsbrännare består i korthet av ett resonansrör och en brännkammare. Förbränningen sker inte kontinuerligt utan med en frekvens av 40-100 Hz. Detta leder till ett oscillerande flöde och därmed även en mycket hög värmeöverföring. Begränsningarna med brännaren är dock stora, bl.a. en hög bullernivå och dimensioneringssvårigheter. Forskning kring pulsbrännare har pågått ett par på LTH [4.20], och det finns även ett svenskt företag som säljer kommersiella pannor med pulsbrännare [4.21]. Pulsbrännare för hetvatten- och ångpannor har troligen ingen större kommersiell framtid.

För uppvärmningsändamål i främst större lokaler finns det gaseldade IR-strålare såväl av "röd" typ där avgaserna släpps direkt ut i lokalen som av "svart" typ där avgaserna leds ut i ett slutet system. Mer finns att läsa i bl.a. två tidigare SGC rapporter [4.22,4.23]

4.10 SAMMANFATTNING

Teknikutvecklingen inom brännarområdet har gått mycket fort de senaste åren och emissionerna från pannor eldade med alla typer av bränsle har reducerats kraftigt. De bästa gaspannorna och -brännarna uppvisar mycket låga emissionsnivåer. Den kvarvarande utvecklingspotentialen för gaspannor och gasbrännare är liten, troligen kan dock den katalytiska tekniken innebära ännu lägre emissioner och bättre reglerbarhet.

Gasbränslen har dessutom fördelen att behovet av kringutrustning är lågt och att rökgaserna ofta är mycket rena, exempelvis måste biobränslen och olja förvaras i lager i anslutning till pannan och biobränsleeldning ger upphov till aska som måste tas ur pannan vid behov. Dessutom kan man vid gaseldning enkelt ta tillvara energiinnehållet som finns bundet i form av vattenånga i rökgaserna genom att kondensera rökgaserna. Då uppnår man mycket höga verkningsgrader. Det låga svavelinnehållet i gasol och naturgas gör att man i allmänhet inte får några korrosionsproblem i samband med kondensering, vilket är fallet för övriga bränslen.

4.11 REFERENSER

- 4.1 Energistatistik för småhus 1999, Statistiska meddelanden, EN 16 SM 0003, Statistiska Centralbyrån 2000.
- 4.2 Energistatistik för flerbostadshus 1999, Statistiska meddelanden, EN 16 SM 0001, Statistiska Centralbyrån 2000.
- 4.3 Energistatistik för lokaler 1999, Statistiska meddelanden, EN 16 SM 0002, Statistiska Centralbyrån 2000.
- 4.4 Mikael Näslund, Låg-NO_x-teknik för gasdrivna processer - Dagsläge. Rapport SGC 076, oktober 1996.
- 4.5 Mikael Näslund. Energigasteknik. Svenska Gasföreningen Service AB, Stockholm 1995.
- 4.6 Kondenserande pelletspanna. Energimagasinet EM 7/99, s.49, 1999.
- 4.7 Personlig kommunikation med Ulf Bondesson, Bentone AB.
- 4.8 <http://www.viessmann.de>
- 4.9 Personlig kommunikation med Jan Carlson, Svenska Weishaupt
- 4.10 Anette Rydén. Teknikinventering av biobränsleeldade pannor 0,5-10 MW, Värmeforsk 647, Stockholm 1998.
- 4.11 Mats-Lennart Karlsson, Analys av dagens bästa teknik för biobränsleeldade pannor mellan 0,5 och 10 MW. Energimyndigheten ER 1998:19, Eskilstuna 1998.
- 4.12 http://www.blb.bmlf.gv.at/deutsch/bio_nawa/pruef/pruefung/pell_blt.htm
- 4.13 Personlig kommunikation med HOTAB Eldningsteknik AB.
- 4.14 Mikael Näslund. Gaspannor saknar miljömärkning. Gasnytt 3/2000 s. 14-16, Stockholm 2000.

- 4.15 Fremtidens villakedel er en brændselcelle. Vaillant GmbH, Temadag om forskning og ny teknologi på gasområdet. Naturgassens Hus, 8 november 1999.
- 4.16 <http://www.weishaupt.de>
- 4.17 Katalytiska metoder för begränsning av skadliga utsläpp från förbränning av biobränsle. Energimyndigheten ER 23:1998, Stockholm 1998.
- 4.18 Michael Andersen. Væskeopvarmning med rørbrænder. Dansk Gasteknisk Center, Hørsholm oktober 1996.
- 4.19 Industribrænderkatalogen, <http://www.dgc.dk>
- 4.20 Annika Lindholm, Pulsating Combustion- Combustion Characteristics and Reduction of Emissions. Inst. för Värme- och Kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-1016--SE, 1999.
- 4.21 <http://www.pulsonex.se>
- 4.22 Anders Lundin & Michael Johansson. Utvärdering av röd IR-installation vid Kockums - Malmö. SGC Rapport 111, Svenskt Gastekniskt Center, december 2000.
- 4.23 Pär Dalin. Handledning för installation av gaseldade IR-värmare. Rådgivning, analys och genomförande. SGC Rapport 079, Svenskt Gastekniskt Center, december 1996

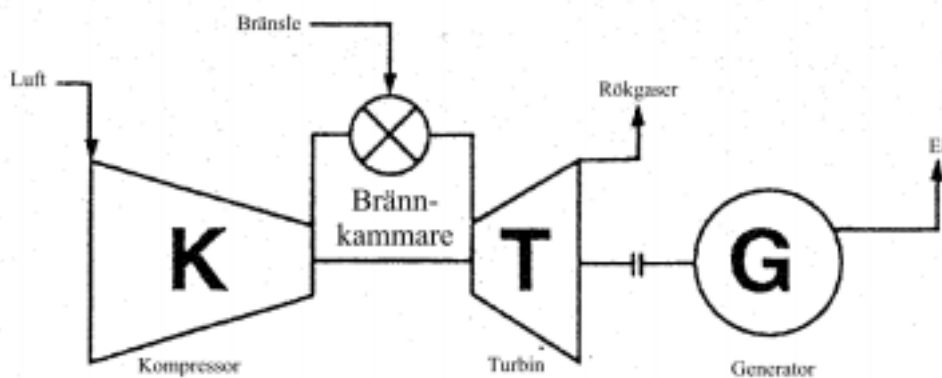
5. KRAFTVÄRME – GASTURBINER

Gasturbiner är de dominerande drivkällorna i större flygplan, de används i stor utsträckning för framdrivning av fartyg och är den främsta drivkällan vid utvinning av olja och gas på land och offshore. I elkraftsammanhang har gasturbiner sedan flera år tillbaka använts som spetslast- och reservkraftverk. Under senare år har gasturbiner dessutom blivit allt vanligare i anläggningar för "cogeneration" d.v.s. samtidig produktion av el och värme samt i "kombikraftverk" där gasturbiner kombineras med ångcykler. Gasturbiner eldas i allmänhet med naturgas eller olja men kan även eldas med andra energigaserna eller fasta bränslen såsom kol. Det dominerande bränslet är sedan några år tillbaka naturgas.

5.1 TEKNIK

Gasturbinen är en maskin, som genom förbränning av ett bränsle omvandlar kemiskt bunden energi till rörelseenergi (jetmotor för flygplan) eller till mekanisk energi hos en roterande axel (t. ex. fartygsturbin eller elproducerande turbin). En elproducerande gasturbin består i sin grundkonstruktion av fyra huvuddelar (se figur 5.1):

- kompressor, som kontinuerligt suger in luft och trycksätter denna
- brännkammare där bränslet sprutas in och förbränns med hjälp av syret i den komprimerade luften
- turbin, i vilken den heta rökgasen under hög hastighet expanderar genom turbinens skovelsystem ner till omgivningstrycket samt generator



Figur 5.1. Gasturbins huvuddelar

I en öppen eller enkel gasturbincykel, "simple cycle", släpps avgaserna direkt ut i fria luften via en skorsten. Vid cogeneration eller vid kombikraftverk får avgaserna först avge en del av sin värme till en värme- eller ångpanna (avgaspanna) innan de släpps ut i atmosfären.

Gasturbiner finns i storlekar från "mikroturbiner" på ca 30 kW_e till kraftverksturbiner på nära 300 MW_e. För stationära gasturbiner skiljer man på flygmotorerivat (ursprungligen utvecklade som flygmotorer, på engelska aeroderivative turbines) och industriturbiner. I flygmotorderivaten utnyttjas komponenter från flygmotorerna vilket bl.a. innebär att man har en separat "gasgenerator" (=flygplansturbinen) och en separat kraftturbin. Gasgeneratoren består av en kompressor och en turbin som driver kompressorn, båda placerade på en egen axel. Kraftturbinen, som drivs av jetstrålen från gasgeneratoren, har en egen axel på vilken även elgeneratoren är placerad.

Industriturbinerna är från början planerade för stationär produktion av mekaniskt arbete (t.ex. drift av pumpar) eller för elproduktion. De är normalt enaxliga med kompressor, turbin och generator placerade på en och samma axel. En industriturbin är vanligen något billigare än motsvarande flygderivat men har i gengäld något sämre verkningsgrad.

Den termiska verkningsgraden för en större gasturbin i enkel cykel ligger idag mellan 35 och 40 %. I kombikoppling, d.v.s. med samtidig elgenerering i ångprocess kopplad till gasturbinens avgaspanna, kan den elektriska verkningsgraden uppgå till nära 60 % vid kondensdrift. Om ångturbinen är av mottryckstyp och kondensvärmen utnyttjas för fjärrvärmeändamål kan verkningsgraden för el- och värmeproduktionen tillsammans bli så hög som 90 %.

Någon märkbar skillnad i verkningsgrad mellan nya gaseldade respektive nya oljeeldade gasturbiner har ej kunnat konstateras. För vissa äldre maskiner förekommer uppgifter om en skillnad på upp till en procentenhet till de gaseldades fördel. Man bör dock i detta sammanhang beakta att inkoppling av en gasturbin i ett lågtrycksgasnät kräver en höjning av gastrycket före inmatning i brännkammaren vilket påverkar verkningsgraden i negativ riktning.

5.2 TEKNISK UTVECKLING

Även om principen för en gasturbin var framtagen redan under 1700-talet dröjde det till i början på 1900-talet innan man lyckades demonstrera en maskin som producerade nettoeffekt. Det var dock först med utvecklingen av jetmotorn under 1930-talet som gasturbinen började få teknisk och kommersiell betydelse. I jetmotorn utnyttjas reaktionskraften i jetstrålen, d.v.s. rörelseenergin i avgaserna, för att driva ett flygplan framåt

Världens första industriella gasturbin, tillverkad av Brown Boveri et Cie (BBC) i Schweiz, togs i drift 1939 och den hade en uteffekt på 4 MW och en verkningsgrad på 17,4 %. Flera andra företag började vid den tiden utveckla såväl jetmotorer som stationära gasturbiner, däribland General Electric, Pratt and Whitney, Rolls-Royce, Siemens och Westinghouse. I Sverige fick 1946 dåvarande STAL i Finspång svenska statens uppdrag att utveckla flygmotorer för flygvapnets räkning. Denna utveckling lades dock ner efter några år och företaget satsade i stället på stationära gasturbiner.

Utvecklingen inom gasturbinområdet har i första hand styrts av en strävan mot

- ökad uteffekt
- högre verkningsgrad
- ökad tillförlitlighet
- lägre specifik anläggningskostnad (kostnad per installerad kW) och
- lägre emissioner

För att åstadkomma förbättringar i dessa avseenden har insatser gjorts inom alla de teknikområden som berör gasturbiner, däribland strömningsteknik (kompressorer, brännkammare, turbiner), materialteknik (brännkammare, turbiner), hållfasthetsteknik (rotorer, skovlar), förbränningsteknik samt styr- och reglerteknik.

Exempel på åtgärder som vidtagits är högre kompressionsförhållanden, högre inloppstemperatur till turbinen, nya skovelmateriel, effektivare skovelkyllning och förbättrad förbränningsteknik t.ex. genom sekventiell förbränning.

Genom utvecklingen av bättre skovelmateriel, främst keramiska materiel, i kombination med avancerad kylteknik klarar man i dag inloppstemperaturer till turbinen på 1350 – 1400°C. Luft från kompressorerna olika steg används för kylningen av skovlarna. Denna luft är dock så het att den måste kylas först innan den används för skovelkyllningen vilket ger vissa förluster. Om gasturbinen ingår i ett kombikraftverk har man därför valt att i stället kyla skovlarna med ånga från ångprocessen.

Sekventiell förbränning utnyttjas av bl.a. Alstom i deras nya gasturbiner. Metoden innebär att förbränningen sker i två separata brännkammare. Efter första brännkammaren uppnår rökgaserna en temperatur på ca 1260°C och får sedan expandera i en första del av gasturbinen. Genom eldning i den andra brännkammaren höjs rökgastemperaturen åter igen till 1260°C innan rökgaserna får expandera i gasturbinens sista del. Metoden ger såväl högre fullastverkningsgrad som högre dellastverkningsgrad samtidigt som man på grund av den relativt låga inloppstemperaturen (1260°C) kan använda beprövade skovelmateriel med känd livslängd.

5.3 MILJÖASPEKTER

De första gasturbinerna konstruerades utan speciell tanke på miljöeffekterna. Så kunde exempelvis NO_x-utsläppen ligga vid ca 1000 mg/Nm³ eller 500 ppm vilket kan jämföras med dagens bästa värden kring eller under 10 ppm (Alla här angivna föroreningshalter gäller för torr gas och 15 % O₂ om ej annat anges). Däremot har utsläppen av CO och UHC (oförbrända kolväten) alltid legat vid relativt låga nivåer. Mätningar på ett antal gasturbiner av olika åldrar i Danmark visade således på värden kring 20 ppm för CO och 3 ppm för UHC.

En viktig del i utvecklingsarbetet kring gasturbiner har därför varit att reducera emissionerna av kväveoxider. Man har därvid i princip tre olika vägar att välja mellan - förbränningstekniska åtgärder, vatten- eller ånginsprutning samt katalytisk rening av avgaserna.

- Förbränningstekniska åtgärder. I de äldre, traditionella brännarna användes s.k. diffusionsflamma. Bränsle och förbränningsluft hämtas skilt från varandra till förbränningszonen. I förbränningszonen diffunderar bränsle och luft in i varandra, bildande en brinnande massa. Vid flamfronten bildas då stora mängder termisk NO_x .

Numera arbetar man med mager förbränning och förblandning om bränslet är naturgas eller förångning om bränslet är dieselolja (Lean Premix Combustion, LPM). I brännarelementet anordnas en blandningssträcka där förbränningsluft och gas blandas homogent för mager förbränning. Härvid undviks höga temperaturer i flammen och NO_x -bildningen reduceras kraftigt. Varje tillverkare har sina egna specialkonstruktioner och egna namn på dessa såsom Alstoms AEV (Advanced EV burner), General Electrics DLN (Dry Low NO_x), Rolls-Royce's DLE (Dry Low Emission) och Solar Turbines' SoLo NO_x .

För siffervärden på utsläpp av NO_x , CO och UHC hänvisas till data i ett senare avsnitt med exempel på kommersiella gasturbiner

Andra förbränningstekniska åtgärder för att minska NO_x -utsläppen är användning av katalytiska brännare samt s.k. Rich Burn Quick Quench förbränning (RBQQ).

Tekniken med katalytiska brännare är fortfarande på utvecklingsstadiet. Problemen är många, bl.a. blir katalysatorerna lätt förgiftade om bränslet innehåller föroreningar och livslängden är relativt kort. Ett företag i USA, Catalytica Combustion Systems Inc, har under utveckling ett "XONON Combustion System" med en katalytisk brännare som testats 1000 timmar på en industriell gasturbin och där emissionerna uppmätts till 3 ppm för NO_x och 10 ppm för CO och UHC.

Rich Burn Quick Quench innebär en tvåstegsförbränning, där man i en första zon med en rik förbränning eldar upp allt syret med hjälp av kolet och vätet i bränslet (Rich Burn). Eftersom kol och väte reagerar snabbare med syret än kvävet så bildas inget NO_x . Däremot bildas i denna zon mycket CO och UHC. I en andra zon sker först en snabb nedkylning (Quick Quench) med luft varefter slutförbränning sker med tillsats av utspädningsluft. En förenklad RBQQ-metod har utvecklats vid National Aerospace Laboratory i Japan och denna har gett så låga NO_x -emissioner som 5 ppm, vilket (1998) betecknades som "the lowest level world wide"

- Vatten- eller ånginsprutning. Denna princip, som använts sedan länge, innebär att förbränningen sker vid lägre temperatur än eljest och att därmed NO_x -bildningen reduceras. Metoden kan tillämpas på såväl oljedrivna som gasdrivna gasturbiner. En NO_x -reduktion på upp till 80 % är ganska normalt och denna siffra gäller för både oljedrivna och gasdrivna turbiner. Eftersom NO_x -halten vanligen är något högre vid en oljeeldad gasturbin än vid en gaseldad innebär detta att samma förhållande råder även efter NO_x -reduktionen.

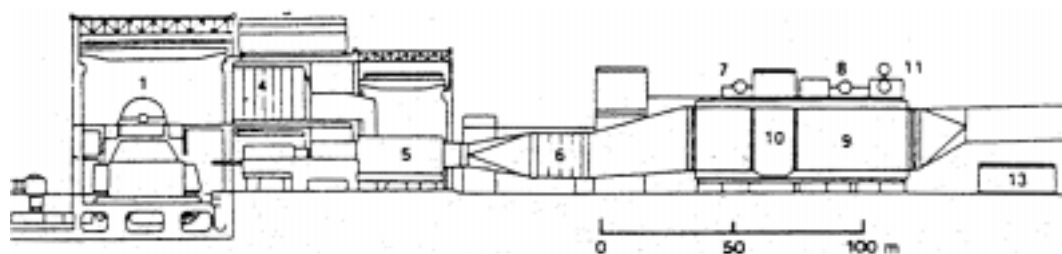
Konsekvenserna av vatten/ång-insprutningen är, förutom lägre NO_x -halt, högre uteffekt och ökade utsläpp av CO och UHC. Utsläppsökningarna rör sig omkring en faktor 2 vid en vatten/bränslekvot på 1. När det gäller den termiska verkningsgraden resulterar vatteninsprutning i lägre verkningsgrad medan ånginsprutning ger högre verkningsgrad. Det senare gäller dock under förutsättning att ångan genereras i en avgaspanna kopplad till turbinen.

Vatten/ång-insprutning är vanligast vid små gasturbiner där det kan vara svårt med utrymmet för Lean Premix Combustion.

- Katalytisk rening av avgaserna. Avgaserna kan renas i katalytiska DENOX-anläggningar, s.k. SCR-system (SCR = Selective Catalytic Reduction). I katalysatorn får kväveoxiderna reagera med ammoniak och bilda kvävgas och vatten. Vid naturgaseldning blir hållbarheten på katalysatormaterialet mycket god. Avskiljningsgraden är också mycket god, 80 – 90 %, vilket innebär att exempelvis en NO_x -halt i turbinens avgaser på 30 ppm utan vidare kan sänkas till 5 ppm.

De katalysatorer som finns idag tål inte temperaturer högre än 300 – 400°C. Eftersom många gasturbiner har högre utloppstemperatur måste avgaserna kylas före inloppet till katalysatorn. Av det skälet lämpar sig katalytisk avgasrening bäst för gasturbiner med samtidig produktion av värme eller ånga eftersom avgaserna där kyls ner i avgaspannan.

Nackdelarna med katalytisk avgasrening är bl.a. utrymmesbehovet, försämrad verkningsgrad, förekomsten av ammoniakslip samt kostnaden. En SCR-anläggning upptar större volym än själva gasturbinen (se figur 5.2) och reningsprocessen sänker den termiska verkningsgraden med ca en procentenhet.



- | | | |
|----------------------|--------------------|---------------------|
| 1. Ångturbin | 6. Ljuddämpare | 11. Avluftare |
| 2. Ventilarrangemang | 7. Högtryckstrumma | 12. Till skorsten |
| 3. Luftintag | 8. Lågtryckstrumma | 13. Matarvattenpump |
| 4. Luftfilter | 9. Avgaspanna | |
| 5. Gasturbin | 10. SCR-system | |

Figur 5.2. Gaskombi med selektiv katalytisk avgasrening

Vad gäller kostnaden så har General Electric jämfört årskostnaden för tre olika tekniker applicerade på deras LM 1600 på 14 MW och kommit fram till följande resultat:

DLN (GE's premix-metod)	120.000 dollar/år
Vatteninjektion	485.000 –"
Katalytisk avgasrening (SCR)	657.000 –"

För att få en översikt över de olika teknikerna för emissionsreduktion vid gasturbiner är de sammanfattade i tabell 5.1 tillsammans med ungefärliga reduktionstal i procent för kväveoxider (NO_x), kolmonoxid (CO) och oförbrända kolväten (UHC). Som utgångsvärden har valts de ungefärliga emissionsvärden som gäller för en vanlig diffusionsflamma.

Tabell 5.1. Emissionsreducerande tekniker vid gasturbiner

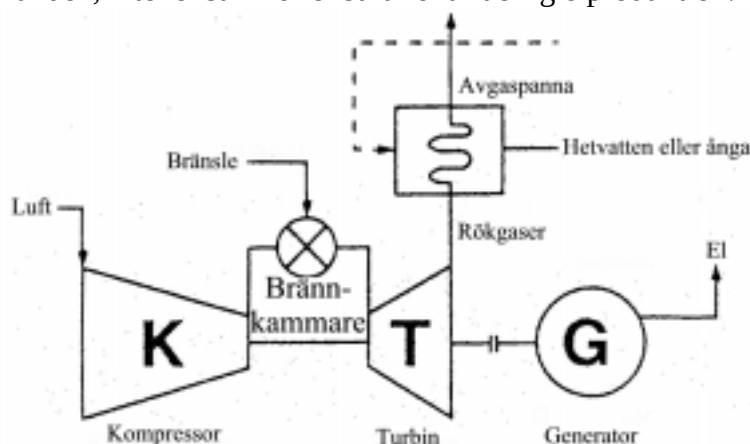
Emissions-begränsande teknik	Typiska emissionsvärden i mg/Nm^3 eller reduktionsprocent vid 5 % O_2			Anmärkning
	NO_x	CO	UHC	
Ingen (d.v.s. diffusionsförbränning)	1000	120	20	
Premixflamma	80 %	- 100 %	n.a.	Ökar CO och UHC
Katalytisk förbränn.	99 %	95 %	75 %	Ej färdigutvecklad
Ånginsprutning	90 %	- 100 %	n.a.	Ökar CO, UHC och η
Vatteninsprutning	90 %	- 100 %	n.a.	Ökar CO och UHC
SCR-katalysator	95 %	-	-	Dyrbar + amm.slip

Kommentarer till tabellen: Minusvärde innebär att emissionen ökar. n.a. innebär att siffervärden saknas men det är troligt att ökningen i UHC är ungefär densamma som ökningen i CO. η = verkningsgraden.

Omräkningstal mellan ppm, mg/Nm^3 och mg/MJ finns i bilaga 1.

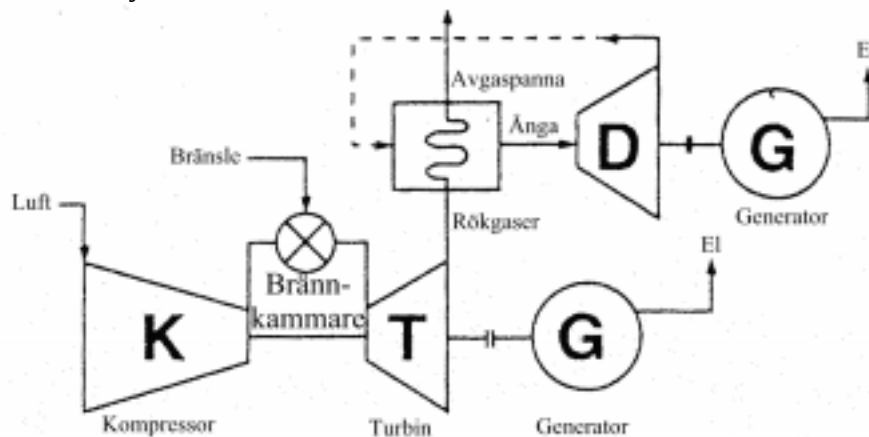
5.4 COGENERATION OCH KOMBIKRAFTVERK BASERADE PÅ GASTURBINER

Cogeneration innebär samtidig produktion av el och nyttig värme. Värmen är normalt i form av hetvatten eller ånga. Hetvatten- eller ångproduktionen sker i en avgaspanna som värms av avgaserna från gasturbinen, se figur 5.3. Elen produceras i en generator kopplad till gasturbinen. Intresset för cogeneration styrs främst av möjligheten till god ekonomi genom att den totala verkningsgraden (el + värme) blir mycket hög. En gasturbin i enkel cykel är, åtminstone för svenska förhållanden, inte lönsam för enbart kontinuerlig elproduktion.



Figur 5.3. Gasturbin med avgaspanna för hetvattenproduktion

Ett kombikraftverk baserat på gasturbiner kallas allmänt för gaskombi eller gaskombikraftverk. Det består i sin enklaste form av en gasturbin, en avgaspanna och en ångturbin, se figur 5.4. Avgaspannan producerar ånga för ångturbinen och elen produceras både av gasturbinen och ångturbinen. Genom att mottryckskoppla ångturbinen kan dessutom nyttig värme, t.ex. fjärrvärme tas ut ur processen. Kombikraftverk presterar den högsta elverkningsgraden av alla idag kommersiella elproduktionssystem.



Figur 5.4. Kombikraftverk

Det ska noteras att det även finns cogenerationssystem och kombikraftverk som inte är baserade på gasturbiner. Ett vanligt kraftvärmeverk med ångpanna och ångturbin i mottryckskoppling räknas således in under rubriken cogeneration och en dieselmotor med avgaspanna+ångturbin/generator tillhör gruppen kombikraftverk.

5.5 EXEMPEL PÅ KOMMERSIELLA GASTURBINER

Här skall ges exempel på prestanda för några av de gasturbiner som är kommersiellt tillgängliga på marknaden i dag. Även om små s.k. mikroturbiner i storleksklassen 30 – 100 kW uteffekt ännu inte är ekonomiska i Sverige så redovisas ett par sådana för att man ska få en uppfattning om verkningsgrad m.m. i relation till större gasturbiner. I övrigt redovisas turbinerna nedan i tre storleksklasser: 1 – 4 MW, 10 – 30 MW och 40 – 70 MW elektrisk uteffekt i enkel cykel.

5.5.1 Mikrogasturbiner

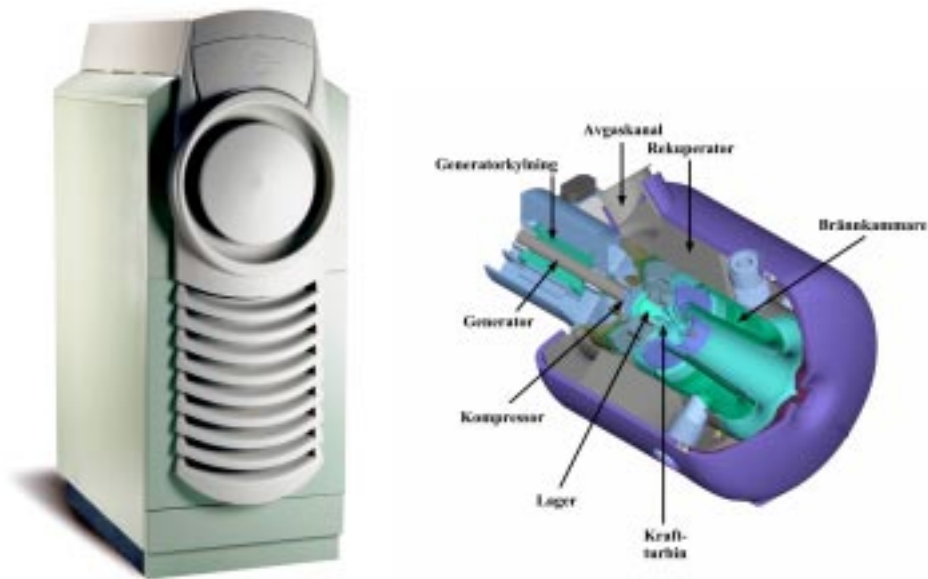
I den minsta storleksklassen finns bl.a. Capstone Micro Turbine med en elektrisk uteffekt på ca. 30 kW. Den kan köras på naturgas, deponigas och dieselolja. Maskinen är primärt inte tänkt för samtidig el- och värmeproduktion. Uppgifter från tillverkaren ges i tabell 5.2.

Hela anläggningen är inbyggd i en "pelare" med måtten 1,3 x 0,7 m och höjden 2 m. Figur 5.5 visar dels själva turbogeneratoren dels den kompletta anläggningen. Det kan nämnas att mätningar på en Capstoneturbin i Los Angeles-området som utnyttjar deponigas visade på en NO_x-halt på 1,3 ppm!

Tabell 5.2. Capstone Micro Turbine, Model 330

Parameter	Enhet	Naturgas	Deponigas	Dieselolja
Uteffekt	kWe netto	29	30	29
El. verkningsgrad	%	26	27	26
Varvtal	rpm	96 000	96 000	96 000
Värmetal	kJ/kWh	13 700	13 300	13 900
Rökgastemperatur	°C	261	261	261
NO _x vid 15 % O ₂	ppm	<9	<9	<35
CO	ppm	<9	n.a.	n.a.
UHC	ppm	<9	n.a.	n.a.

n.a. = uppgift saknas, UHC = oförbrända kolväten



Figur 5.5. Capstones Micro Turbine

En annan liten maskin är Turbec's T 100 på 100 kW el och 167 kW värme. Turbec är ett relativt nytt företag grundat av ABB och Volvo Aero. T 100 är en komplett kraftvärmeenhet med gasturbin och värmeväxlare sammanbyggda till en kompakt enhet. Den är konstruerad för att köras på enbart naturgas eller annan energigas och den är unik så tillvida att generatoren är monterad direkt på gasturbinaxeln utan mellanliggande växel. Generatoren får således ett högt varvtal och därmed blir frekvensen hög på den producerade elenergin. Med en konverter omvandlas emellertid frekvensen till 50 Hz innan elen matas ut på nätet. Tekniken med direktmonterad generator kallas ibland HSG = High Speed Generator.

Några data för T 100 ges i tabell 5.3.

Tabell 5.3. Turbec's T 100 mikroturbin

Elektrisk uteffekt, netto	kW	100
Elektrisk verkningsgrad	%	30
Värmeeffekt (hetvatten)	kW	167
Totalverkningsgrad	%	80
Förbränningstyp		Lean, premix
Inloppstemp. turbin	°C	950
Varvtal	rpm	70 000
Gaskompressor		Inbyggd
Emissioner		
NO _x vid 15 % O ₂	ppm	< 15
	mg/Nm ³	< 30
CO	ppm	< 15
	mg/Nm ³	< 19
UHC	ppm	< 10
	mg/Nm ³	< 5
Dimensioner ("skåp")	m	2,9 x 0,87 x (höjd) 1,9



Figur 5.6. Turbec T100 mikroturbin.

5.5.2 Gasturbiner 1 – 4 MW

Som exempel på gasturbiner inom området 1 – 4 MW redovisas i tabell 5.4 turbiner från Solar Turbines och från Rolls-Royce Power Engineering. Uppgifterna i tabellen har lämnats av respektive tillverkare.

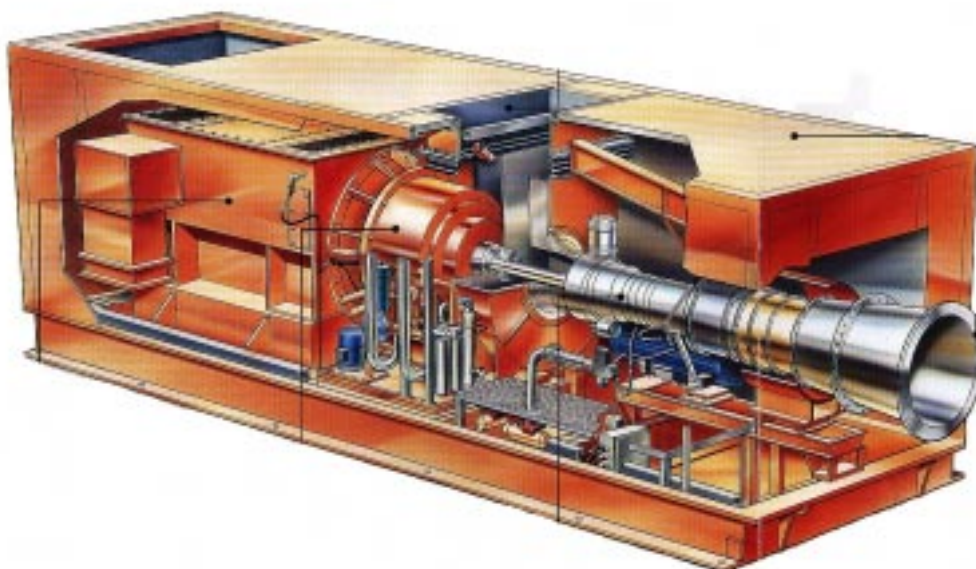
Tabell 5.4. Data för gasturbiner i storleksklassen 1 – 4 MW

Tillverkare		Solar		Solar		Rolls-Royce	
Modell		Saturn 20		Centaur 40		Allison 501 KB 5	
Bränsle		Gas	Olja	Gas	Olja	Gas	Olja
Netto el	MW _e	1,2	1,15	3,5	3,3	3,9	3,9
Elverkn.grad	%	24,5	24,5	28	28	29	29
Turbinvarvt.	rpm	22 300	22 300	15 500	15 500	14 600	14 600
Gen.varvtal	rpm	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Tillgängl.het	%	95	95	95	95	96	96
<u>Emissioner:</u>							
NO _x	mg/Nm ³	229	416	50	96	<50	<120
CO	”-	64	318	64	64	<30	<180
UHC	”-	n.a.	n.a.	52	52	<2	<10
Metan	”-	n.a.	-	n.a.	-	<1	-
Partiklar	”-	-	n.a.	-	n.a.	-	n.a.

n.a. = uppgift saknas

Solars NO_x-reduceringsteknik, SoLoNO_x tillämpas inte på deras mindre maskiner vilket återspeglas i värdena i tabell 5.4 där Saturn 20 i gasversion emitterar ca 230 mg/Nm³ NO_x medan den större Centaur 40 endast emitterar 50 mg/Nm³. Rolls-Royce tillämpar den tidigare nämnda DLE (Dry Low Emission)-tekniken vilken, liksom SoLoNO_x ger NO_x-utsläpp kring eller under 50 mg/Nm³.

En genomskärning av en installation med Rolls-Royces Allison 501 visas i figur 5.7.



Figur 5.7. Allison 501 gasturbin med turbogenerator

5.5.3 Gasturbiner 10 – 70 MW

I tabell 5.5 ges data för Solars Titan 130 på 13,5 MW och Rolls-Royce's RB 211 – 6761 på 31 MW.

Tabell 5.5. Data för två gasturbiner i storleksskassen 10 – 30 MW

Tillverkare		Solar		Rolls-Royce	
Modell		Titan 130		RB 211	
Bränsle		Gas	Olja	Gas	Olja
Netto el	MW _e	13,5	12,2	30,9	30,9
Elverkn.grad	%	33,3	33,3	39,1	39,1
Turbinvarvt.	rpm	8 855	8 855	4 850	4 850
Gen.varvtal	rpm	1 500	1 500	1 500	1 500
Tillgängl.het	%	95	95	96	96
<u>Emissioner:</u>					
NO _x	mg/Nm ³	50	200	<50	<120
CO	”-	64	64	<30	<180
UHC	”-	52	52	<2	<10
Metan	”-	n.a.	-	<1	-

Slutligen redovisas i tabell 5.6 leverantörsdata för några maskiner i storleksskassen 40 – 70 MW.

Tabell 5. 6. Data för gasturbiner i storleksskassen 40 – 70 MW

Tillverkare		ABB-Alstom		Rolls-Royce	Siemens	
Modell		GTX 100		Trent	V 64.3A	
Bränsle		Gas	Olja	Gas	Gas	Olja
Netto el	MW _e	43	41,4	51,2	67	65
Elverkn.grad	%	37	36,3	41,6	34,7	34,4
Turbinvarvt.	rpm	6 600	6 600	3 000	5 400	5 400
Gen.varvtal	rpm	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Tillgängl.het	%	96	96	95	n.a.	n.a.
<u>Emissioner:</u>						
NO _x	mg/Nm ³	30	50	<50	70	300
CO	”-	13	19	<30	<13	25
UHC	”-	0,7	2,1	<2	2,5	n.a.
Metan	”-	n.a.	-	<0,7	n.a.	-

GTX 100 har utvecklats av ABB Stal i Finspång, ett företag som numera ingår i Alstomkoncernen. Maskinen är optimerad för kombicykler och har ett kompakt utförande där gasturbin, avgaspanna och ångturbin ligger i linje med varandra. Det första naturgaseldade exemplaret installerades vid kraftvärmeverket i Helsingborg hösten 1999, där ångan från avgaspannan leds till en sedan tidigare installerad ångturbin. Den låga NO_x-halten uppnås enbart genom förbränningstekniska åtgärder (avancerade EV-brännare).

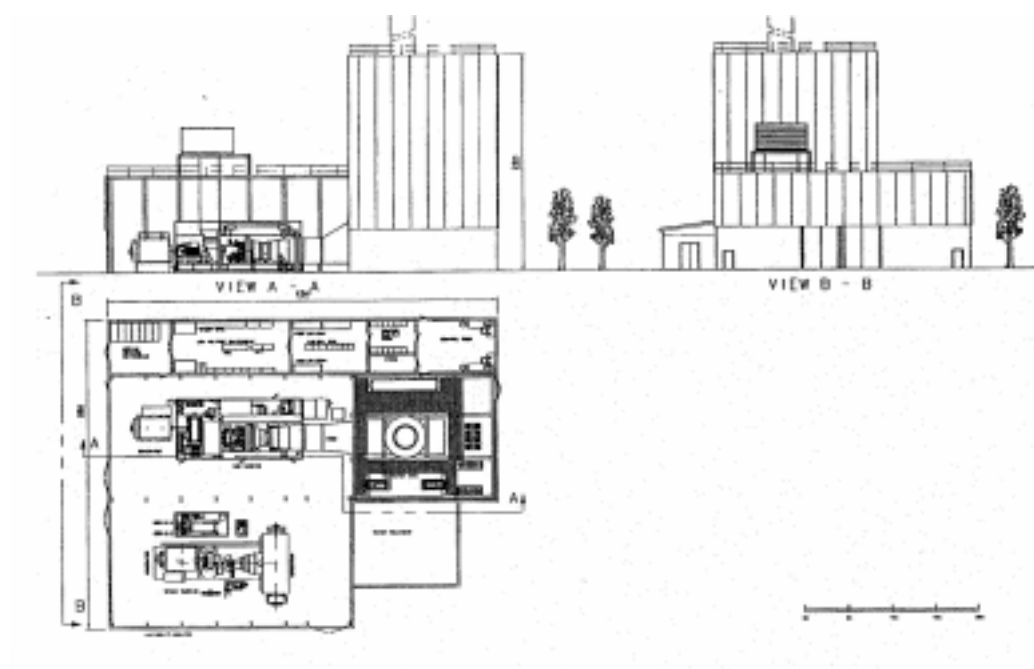
Bland de tendenser som kan utläsas ur tabellerna 5.4 – 5.6 kan noteras:

- verkningsgraden ökar med ökande storlek, från 24,5 % för Saturn 20 på 1,2 MW till ca 40 % för de större maskinerna
- verkningsgraden är ungefär samma för gasdrivna och oljedrivna gasturbiner
- de oljedrivna gasturbinerna har högre NO_x-utsläpp än de gasdrivna och i allmänhet också högre CO-utsläpp

Vissa av de tillfrågade gasturbinleverantörerna har även redovisat data för kombianläggningar. Exempel ges i tabell 5.7 för Alstoms KAX 100-1 (bygger på GTX 100) och Siemens V64.3A, båda i naturgasversion. Vid oljedrift sjunker verkningsgraderna något, så t.ex. sjunker elverkningsgraden vid kondensdrift för KAX 100-1 från 53,3 % för naturgas till 52,9 % för olja. Figur 5.8 visar en typisk layout för KAX 100-1.

Tabell 5.7. Prestanda för GTX 100 och V64.3A i kombikoppling och med naturgasdrift

		<u>KAX 100-1</u> (GTX 100)	<u>V64.3A</u>
Eleffekt med havsvattenkylning av ångturbinens kondensor	MW _e	62	101
Motsvarande elverkningsgrad	%	53,3	54
Eleffekt med mottrycksturbin (= kylning med fjärrvärmevatten)	MW _e	56	97
Motsvarande elverkningsgrad	%	48,3	52
Totalverkningsgrad el+värme	%	89,5	> 80



Figur 5.8. Typlayout för Alstoms KAX 100-1

5.6 UTVECKLINGSTENDENSER

Den tidigare nämnda utvecklingen mot högre prestanda och lägre miljöpåverkan fortsätter. Således finns i USA ett omfattande utvecklingsprogram "Advanced Turbine Systems" under ledning av Department of Energy (DOE) med målsättning att höja nuvarande turbinverkningsgrad med 15 % och sänka

elproduktionskostnaden med 10 %. Detta ska ske samtidigt som NO_x-emissionen begränsas till mindre än 9 ppm (18 mg/Nm³) samt CO- och UHC-emissionerna till mindre än 20 ppm.

Ett intressant utvecklingsprojekt är den s.k. HAT-cykeln (HAT = Humid Air Turbine). Den trycksatta luften efter kompressorn befuktas genom massiv insprutning av vatten i ett befuktningstorn innan den leds in i brännkammaren. Härigenom ökas såväl uteffekt som verkningsgrad jämfört med motsvarande ”torra” gasturbin. Vid Lunds Tekniska Högskola (LTH) pågår ett utvecklingsprojekt inom detta område med namnet EvGT vilket står för Evaporative Gas Turbine. En konceptstudie har visat att man med tekniken tillämpad på en 60 – 80 MW-anläggning skulle kunna få en elverkningsgrad på ca 55 % och en totalverkningsgrad (el+värme) på ca 94 %. Detta är prestanda i klass med eller bättre än för motsvarande gaskombianläggning. Försöken vid LTH sker i en 600 kW pilotanläggning.

5.7 SAMMANFATTNING

Tack vare att verkningsgraden för gasturbiner ökat kraftigt under senare år har deras användning för elproduktion också ökat markant. Kombikraftverk baserade på gasturbiner har stora fördelar såsom relativt låg byggkostnad och kort byggtid. Detta i kombination med mycket hög elverkningsgrad gör att marknaden för denna typ av kraftverk ter sig mycket ljus.

Trots redan i dag förnämliga drift- och emissionsdata för gasturbiner fortsätter utvecklingsarbetet för att göra dem ännu bättre. Som exempel kan nämnas ett utvecklingsarbete vid Lunds Tekniska Högskola där man befuktat förbränningsluften innan den leds in i brännkammaren. Med denna teknik förväntas gasturbinen uppnå en verkningsgrad på 55 % vid ren elproduktion och 94 % vid kombinerad el- och värmeproduktion. Uppnås dessa värden får man en maskin i klass med eller bättre än motsvarande gaskombianläggning.

5.8 REFERENSER

- 5.1. Sven Gunnar Sundkvist
Gasturbinens roll i energisystemet
Energimagasinet nr 6, 1997
- 5.2. J. J. Wolf
Stand und Entwicklung der Gasturbinentechnik
GASWÄRME International, 47 (1998) Heft 3, März
- 5.3. US Department of Energy (DOE)
Advanced Turbine Systems
DOE:s hemsida www.fe.doe.gov/coal_power

- 5.4. Ole Sundman, DONG
Micro Gasturbiner
Gasteknik, nr 5, 1998
- 5.5. Aksel Hauge Pedersen
Mikrogasturbiner
Gasteknik, nr 2, 2000
- 5.6. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE)
Emissionsverhalten von Gasturbinen mit schadstoffarmen Brennkammern in
Der Praxis
(Odaterat broschyrblad)
- 5.7. Jyrki Halme, Ekono Oy
Gasturbinteknologi. Nuläge och utvecklingstendenser
Rapport. Nordisk Gasteknisk Center, juli 1992
- 5.8. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE)
Gasturbinen – Kenndaten
September 1999
- 5.9. Mohsen Assadi och Tord Torisson
Moderna Gaskombianläggningar
Institutionen för Värme- och Kraftteknik, LTH, 1997-10-23
- 5.10 Malene Nielsen
Status för små gasturbiner
Dansk Gasteknisk Center, Projektrapport August 1997
- 5.11. Allan Laursen
Emissionsforhold og forureningsreducerende teknikker for gasmotor- og
turbinenanlæg
Dansk Gasteknisk Center, Teknisk note nr 3/1995
- 5.12. Teknisk information från gasturbinleverantörer via Internet och personlig
kommunikation

6. KRAFTVÄRME – KOLVMOTORER

Kolvmotorer används, liksom gasturbinerna, både för mobila och stationära ändamål. I mobila sammanhang är de helt dominerande då det gäller fordon av typ personbilar, lastbilar, bussar och arbetsfordon men används även i flygplan, fartyg och järnvägslok. I stationära sammanhang har de ungefär samma funktion som gasturbiner, d.v.s. de används för drift av roterande maskiner inklusive generatorer för produktion av elektrisk energi. Därutöver kan förlustvärme i motorns avgaser och kylsystem utnyttjas för uppvärmningsändamål.

Beskrivningarna i det följande gäller i första hand stationära motorer avsedda för kombinerad el- och värmeproduktion.

6.1 TEKNIK

De två vanligast förekommande kolvmotortyperna är ottomotorn och dieselmotorn. Båda har fått namn efter sina respektive ”uppfinnare”, Nicolaus Otto och Rudolf Diesel. Utöver dessa motortyper finns bl.a. Stirlingmotorn och Wankelmotorn som dock ej behandlas i denna rapport.

I en ottomotor startas förbränningen av en gnista från ett tändstift. En blandning av bränsle och luft sugas in i cylinderrummet av den nedåtgående kolven och antändningen sker då kolven vänt och närmar sig sitt övre läge. Bränslet kan antingen vara flytande (t.ex. bensin) eller i gasform (t.ex. naturgas eller biogas).

I en dieselmotor är kompressionstrycket så högt att bränsleluftblandningen självantänder. Till skillnad från ottomotorn sugas enbart luft in av den nedåtgående kolven och först då kolven är på väg upp sprutas bränslet in. Eftersom trycket i cylindern är högt vid insprutningstillfället fordras speciell pump eller kompressor för bränsleinsprutningen.

Bränslet för en dieselmotor kan vara flytande (t.ex. dieselolja eller tjock eldningsolja) eller gasformigt (t.ex. naturgas eller biogas). Naturgas har så hög självantändningstemperatur att man inte uppnår stabil tändning med enbart gas. Ett sätt att antända är att injicera en liten mängd dieselolja (”pilotolja”) för att stabilisera tändningsförloppet och starta huvudförbränningen. Gasen injiceras med hjälp av kompressorer vid ca 250 bars tryck efter det att förbränningen av pilotoljan startats och antänds av denna. Det fortsatta förbränningsförloppet är samma som med flytande bränsle. Mängden pilotolja motsvarar 3 à 5 % av den totalt tillförda effekten vid fullast. Dieselmotorer för naturgas kan vanligen också köras med enbart olja och kallas då ”dual fuel”-motorer.

Kolvmotorer kan vara tvåtakts- eller fyrtaktsmotorer. Fyrtaktsprincipen är klart dominerande för ottomotorer medan fördelningen är mer jämn på stationära tvåtakts- respektive fyrtakts dieselmotorer. Fyrtaktsdieslar är oftast medel- eller högvarviga och har i allmänhet lägre effekt än de lågvarviga tvåtaktsdieslarna. Som exempel kan anges MAN B&W's dieselpådriftsprogram som omfattar

- fyrtaktsdieslar, > 400 rpm, upp till 24 MW
- tvåtaktsdieslar, < 300 rpm, upp till ca 70 MW

För att höja verkningsgraden i dieselmotorerna kan man öka medeltrycket eller fyllnadsgraden i cylindrarna genom överladdning, d.v.s. tillförsel av förbränningsluft under förhöjt tryck. Överladdningen sker med en turbokompressor (turboladdare) som drivs av utgående rökgaser. Vid större dieslar för elproduktion kan elutbytet ökas ytterligare genom att rökgaserna, förutom en turboladdare, även får driva en turbogenerator. En sådan installation ger normalt ett effekttillskott på ca 5 % av effekten hos huvudgeneratoren och en ökning av verkningsgraden med 1 – 2 procentenheter.

Verkningsgraden sammanhänger med bl.a. motortyp, bränsleslag, motorstorlek och om motorn är optimerad för maximal verkningsgrad eller minimala emissioner.

Vid en jämförelse mellan idealverkningsgraden för en ottomotor och en dieselmotor kan man visa att vid en given kompressionsgrad har ottomotorn alltid högre verkningsgrad än dieselmotorn. I ottomotorn begränsas emellertid kompressionsgraden av risken för självantändning av bränslet (knack) medan sådana begränsningar inte finns hos dieselmotorn. Dieselmotorn har därför generellt sett numera en högre verkningsgrad än ottomotorn. När det gäller tvåtakts- respektive fyrtaktsmotorer har någon avgörande skillnad i verkningsgrad dem emellan ej kunnat påvisas.

Vid gasdrift av dieselmotorer tillförs gasen, som nämnts tidigare, vid ett tryck av ca 250 bar. I ett naturgasnät är gastrycket väsentligt lägre varför tryckökningen till 250 bar måste ske med hjälp av en eller flera kompressorer. Den effekt som måste tillföras kompressorerna beror på ingångstrycket och vid exempelvis 25 bars ingångstryck erfordras en kompressoreffekt motsvarande ca 2, 5 % av dieselns axeleffekt. Denna effektminskning uppvägs emellertid av den höjning av verkningsgraden som högtryckstekniken medför.

Vid jämförelser mellan dieselolja och naturgas som bränsle för en och samma motor (dual fuel motor) kan man konstatera att såväl uteffekt som verkningsgrad sjunker något vid övergång från olja till gas. Därtill bidrar bl.a. kompressorarbetet vid naturgasdrift. Motorer som är konstruerade för enbart naturgas uppvisar däremot ungefär samma verkningsgrad som motsvarande oljedrivna motorer.

Verkningsgraden sammanhänger också med motorstorleken och där gäller, liksom för gasturbiner, att ju större motor desto högre verkningsgrad. Med ledning av uppgifter från motortillverkare har data i tabell 6.1 sammanställts. Data gäller elutbyte vid generatorklämmorna och utan turbogenerator. Med turbo kan elverkningsgraden för de större motorerna komma upp mot 55 %.

Tabell 6.1. Elverkningsgrad för dieslar inom olika effektområden

<u>Effektområde, MW</u>	<u>Motortyp</u>	<u>Elverkn.grad, %</u>
1 – 3	4-takt	39 – 42
4 – 9	4-takt	42 – 46
10 – 16	4-takt	47 – 48
10 – 20	2-takt	48 – 49
> 20	2-takt	48 – 50

6.2 MILJÖASPEKTER

Utvecklingsinsatserna vad gäller motorer för elproduktion är huvudsakligen inriktade mot högre verkningsgrad och lägre emissioner av skadliga ämnen. Båda insatsområdena ger resultat som är positiva för miljön.

Elverkningsgraden har ständigt ökat under senare år framför allt genom successiva höjningar av topptryck/topptemperatur i cylindrarna. Topptrycket i större tvåtakts- och fyrtaktsmotorer ligger idag på typiskt 130 resp. 180 bar.

Lägre emissioner av i första hand kväveoxider kan åstadkommas dels internt genom motortekniska åtgärder dels externt genom rening av avgaserna.

Den enklaste åtgärden för låga NO_x-utsläpp från en ottomotor är att köra motorn på en mager bränsleblandning d.v.s. med stort luftöverskott. En sådan motor, på engelska lean burn engine, kännetecknas också av relativt hög verkningsgrad eftersom motorn kan ges ett högt kompressionstal. Dock är förbränningen mindre fullständig.

Av andra motortekniska åtgärder är påverkan av förbränningsförloppet den viktigaste. Kväveoxidbildningen kan således minimeras genom att bränsle/luftblandningen görs så homogen som möjligt, genom noggranna beräkningar av tändningstidpunkt och tändningsenergi samt genom optimering av reglersystemen för tändning, bränsleinsprutning, turbotryck och belastning. En annan motorteknisk åtgärd är vatten/ång-insprutning som, liksom vid gasturbiner, sänker förbränningstemperaturen och därmed NO_x-bildningen.

Slutligen kan nämnas rökgasrecirkulation, EGR (Exhaust Gas Recirculation). En del av rökgaserna kyls och blandas med förbränningsluften vilket har en dämpande effekt på bildningen av kväveoxider i motorn genom att förbränningstemperaturen sänks.

Externa åtgärder omfattar rening med trevägskatalysator, selektiv katalytisk rening (SCR) och rening med oxiderande katalysator. Trevägskatalysatorer reducerar, förutom kväveoxider även koloxid och kolväten och de är vanliga vid stökiometriska ottomotorer i storleksområdet 20 – 1000 kW. Metoden fordrar en s.k. λ-sond med placering i avgaskanalen och som styr inställningen av bränslesystemet. Inställningen är kritisk eftersom katalysatorn har hög reningsgrad för alla tre föroreningskomponenterna endast inom ett smalt arbetsområde (λ - fönstret).

Selektiv katalytisk rening är en metod som tillämpas i många sammanhang såsom vid kol-, olje- och gaseldade pannor samt vid gasturbiner och förbränningsmotorer. Reduktion av kväveoxiderna sker genom injektion av ammoniak i avgaserna vid en temperatur av 300 – 400°C. Gasblandningen får sedan strömma genom en katalysator (vanligen vanadinpentoxid) där kväveoxiderna konverteras till kväve (N_2) och vatten. Effektiviteten hos processen avhänger med mängden ammoniak, men man ska då ha i minnet att ju mer ammoniak som tillsätts desto större blir utsläppet av oanvänd ammoniak ("ammoniakslip"). Detta kan dock hållas på en tillfredsställande låg nivå genom en adekvat reglering.

Oxiderande katalysatorer kan med fördel användas vid naturgasdrift eftersom risken för förgiftning av katalysatorn är liten med naturgas. Den lilla förgiftning som erhålles kommer från det svavelhaltiga luktämne som tillsätts naturgasen. En oxiderande katalysator tar endast hand om koloxid (CO) och oförbrända kolväten (HC) och inte kväveoxider eftersom NO_x -konverteringen är en reducerande process. Effektiviteten för kolväta metan, som utgör huvuddelen av de oförbrända kolvätena, är dock begränsad eftersom metanmolekylen är stabil och därmed vanskeligare att oxidera än de tyngre kolvätena.

Just utsläppen av metan från gasmotorer har på senare tid tilldragit sig allt större uppmärksamhet. Eftersom metan är en "starkare" växthusgas än koldioxid kan även små utsläpp få en relativt stor påverkan på växthuseffekten. I Danmark har man gjort mätningar på ett stort antal gasmotorer för el- och värmeproduktion och konstaterat att utsläppen av oförbrända kolväten, av vilka således metan utgör huvuddelen, i genomsnitt ligger omkring 3,5 % av den tillförda naturgasmängden.

Det finns olika metoder för att komma tillrätta med metanutsläppen. Eftersom det visat sig att metanutsläppen från en motor med öppen förbränningskammare ("open chamber motor") är mellan 50 och 60 % lägre än för en motor med förkammare ("pre chamber motor") så kan man bygga om en befintlig motor med förkammare till öppen kammare eller, mer radikalt, byta ut den mot en ny motor med öppen kammare. Båda metoderna är kostsamma framför allt beroende på att motorer med öppna kammare har lägre uteffekt än motsvarande motorer med förkammare och en ombyggnad måste då kompletteras med anskaffning av ytterligare en eller flera motorer.

Metanutsläppen kan också reduceras genom förbränning av avgaserna i en förbränningsväxlare. Förbränningsväxlaren, som utvecklats vid Chalmers Tekniska Högskola tillkom ursprungligen för att bränna bort lösningsmedel i ventilationsluft från t. ex. målerier. Den har med framgång testats på motoravgaser och man har därvid uppmätt en reduktionsgrad på ca. 95 % för metan. Metoden har dock ännu ej slagit igenom kommersiellt.

Slutligen skall nämnas att metanutsläppen kan reduceras med omkring 40 % genom tillsats av 10 % vätgas till naturgasen. Denna metod är dock alltför dyrbar för att vara praktiskt användbar.

Det ska påpekas att interna eller motortekniska åtgärder för begränsning av NO_x och CO i allmänhet är tillräckliga för att uppfylla de i dag gällande normerna för utsläpp av skadliga ämnen och att följaktligen avgasrening endast tillämpas i fall där omgivningskraven är extremt höga. I framtiden kan dock de generella kraven skärpas så att långt gående åtgärder, t.ex. kombinationer av EGR och trevägskatalysatorer blir nödvändiga

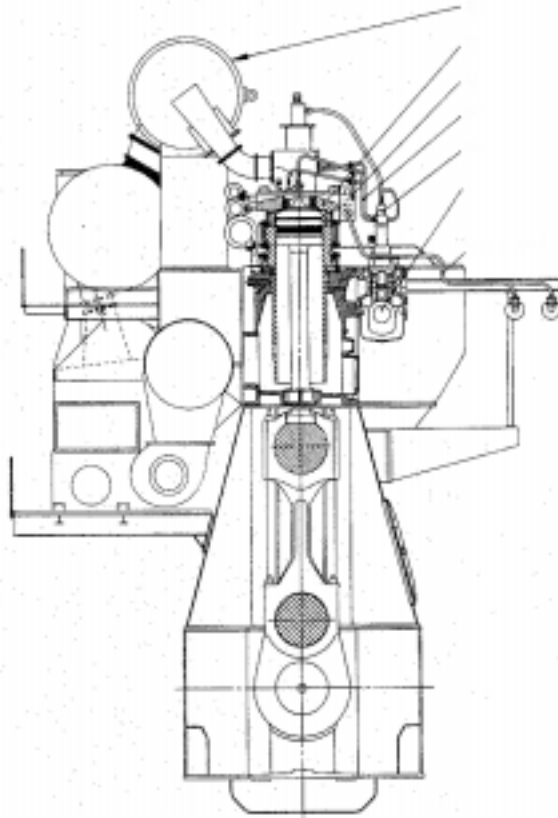
6.3 KRAFTVÄRME BASERAD PÅ GAS- OCH DIESELMOTORER

För att få lönsamhet på el producerad i en motor måste spillvärmen tillvaratas och utnyttjas för uppvärmningsändamål. Nyttig värme erhålles från motorns huvudkylsystem, från avgaserna, från smörjolkjekylaren och från kylaren efter turboladdaren. Med utnyttjande av spillvärmen kan en totalverkningsgrad på nära 90 % uppnås med fördelningen elverkningsgrad 40 % och värmeverkningsgrad 50 %.

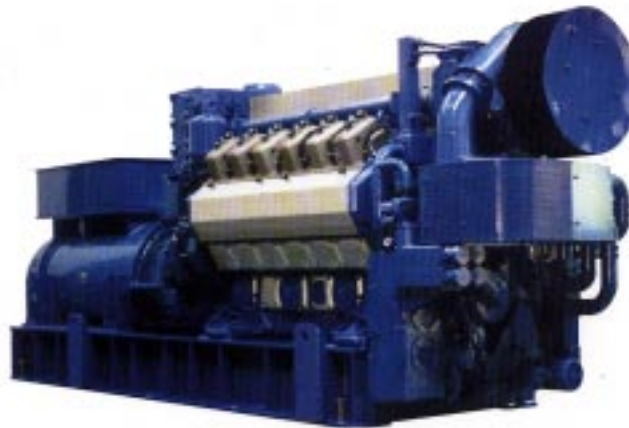
Huvuddelen av de motorer som utnyttjas för kraftvärmeproduktion drivs med naturgas. I exempelvis Danmark fanns år 1999 naturgasmotorer för kraftvärmeändamål om tillsammans 720 MW el. Därutöver fanns vid samma tidpunkt 13 biogasdrivna motorer installerade vid större biogasproducerande anläggningar i Danmark. I Sverige finns ett femtiotal motorer som drivs med naturgas, rötgas eller deponigas och som har en sammanlagd eleffekt om ca. 20 MW.

Förutom produkterna el och värme från en gasmotor kan avgasprodukten koldioxid få en nyttig användning. Således finns det bl.a. i Danmark trädgårdsmästerier med gasmotorer för el- och värmeproduktion och där motoravgaserna används för koldioxidgödsling i växthusen. Med denna tillsatsgödsling kan produktionen i växthusen förbättras med upp till 30 %. För att möjliggöra ”motorgödslingen” måste emellertid avgaserna först renas. Vanligtvis sker detta i en tvåstegs reningskrets där första steget avlägsnar NO_x genom en SCR-process och andra steget oxiderar CO och kolväten, däribland etylen, till koldioxid och vatten. Effektiviteten i den senare processen är mycket viktig eftersom etylen är giftigt för plantorna.

Figur 6.1 visar en genomskärning av en större MAN Dual Fuel motor och figur 6.2 visar en Wärtsilä-maskin på cirka 3 MW.



Figur 6.1. Större MAN Dual Fuel motor i genomskärning



Figur 6.2. Wärtsilä-motor på cirka 3 MW

6.4 EXEMPEL PÅ KOMMERSIELLA MOTORER

I tabellerna 6.2 – 6.4 ges data för några på marknaden förekommande gas- och dieselmotorer vilka får anses representera det senaste vad gäller teknik och miljövänlighet. Utsläppsdata avser motorer utan yttre reningskretsar och uppgifterna kommer från respektive motorleverantör. I allmänhet baseras låga utsläpp på lean-burn-tekniken, i Jenbachers fall benämnd Leanox Control. Värdena gäller för en O_2 -halt på 5 %.

Tabell 6.2. Data för Jenbacher-motor på 143 kW

Modell		Jenbacher JMS156GS	
Bränsle		Naturgas	Biogas
Eleffekt, netto	kW _e	143	143
Varvtal	rpm	1 500	1 500
Avgastemp.	°C	120	120
η _{el} netto	%	35,8	34,4
η _{el+värme}	%	87,5	85,6
NO _x	mg/Nm ³	530	530
CO	”-	1 290	n.a.
THC	”-	n.a.	n.a.
NMHC	”-	150	n.a.

Förklaringar till tabellerna 6.2 – 6.4: η = verkningsgrad, THC = totalmängd oförbrända kolväten, NMHC = THC exkl. metan, n.a. = uppgift saknas

Tabell 6.3. Data för motorer i storleksområdet 3 – 3,5 MW

Leverantör		Rolls-Royce		Wärtsilä	Wärtsilä	
Modell		KVGS16G3		18V200	18V220SG	
Bränsle		Naturgas		Diesel	Naturgas	
Optimerad för		Max η	Min NO _x	-	Max η	Min NO _x
Eleffekt netto	kW _e	3 000	3 000	3 500	3 200	3 200
Varvtal	rpm	1 000	1 000	1 500	1 500	1 500
Avgastemp.	°C	465	450	n.a.	n.a.	n.a.
η _{el} netto	%	42,6	41,9	41,7	41,2	38,8
η _{el+värme}	%	92	92	85	85	85
NO _x	mg/Nm ³	850	250	1 350	185	93
CO	”-	850	850	128	372	671
THC	”-	300	330	105	891	1 710
Metan	”-	n.a.	n.a.	-	816	1 610
Partiklar	”-	n.a.	n.a.	5 140	0,1	0,1

Ur tabell 6.3 kan bl.a. följande utläsas:

- Minimering av kväveoxidutsläppen försämrar verkningsgraden
- Den dieseldrivna Wärtsilämotorn har avsevärt högre NO_x-utsläpp än motsvarande gasdrivna motorer
- Minimering av NO_x-utsläppen ger nära nog en fördubbling av utsläppen av CO och THC i Wärtsilämotorn medan ökningen är marginell i RR-motorn
- Utsläppen av kolväten från gasmotorerna är markant högre än för dieselmotorn. Dessa utgörs huvudsakligen av oförbränt metan.
- Partikelutsläppen från gasmotorerna är försumbara jämfört med dieselmotorn

Tabell 6.4. Data för MAN-motorer på cirka 3 och 19 MW.

Leverantör	MAN B&W			
Modell		16V28/32H	16V28/32SI	10K60MC
Bränsle		Diesellojla	Naturgas	Diesellojla
Eleffekt	kW _e	3 260	2 807	18 900
Varvtal	rpm	750	750	143
η_{el} netto	%	41,0	38,8	48 – 50
$\eta_{el+värme}$	%	83	81	n.a.
NO _x	mg/Nm ³	1 170	205	2 500
CO	”-”	28	2,4	117
THC	ppm C ₁ -ekv	109	2 990	100 (som CH ₄)
Partiklar	mg/Nm ³	n.a.	n.a.	173

Av tabell 6.4 kan man bl.a. se att utsläppen av NO_x och CO är större och utsläppen av THC mindre för dieselmotorerna jämfört med gasmotorn. För modellen 16V28/32 är såväl eleffekt som verkningsgrader högst vid drift med diesellojla vilket kan bero på att gasvarianten optimerats för låga NO_x-utsläpp

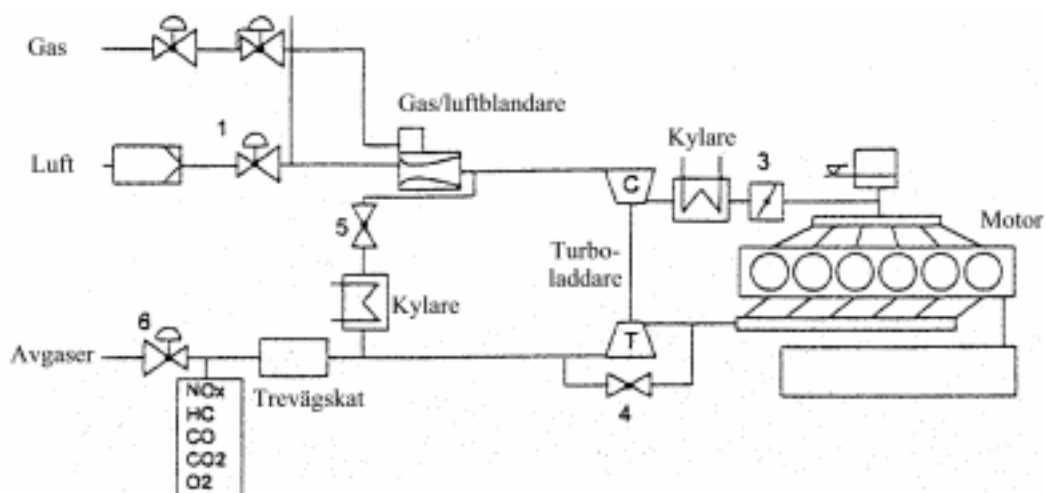
6.5 TEKNISK UTVECKLING

Motortekniska utvecklingsarbeten bedrivs hos motortillverkarna samt vid forskningsinstitut och tekniska högskolor. Ambitionerna är liksom tidigare att ytterligare höja verkningsgraden och minska de skadliga emissionerna.

Ofta är kraven på lägre emissioner och ökad verkningsgrad inkompatibla d.v.s. åtgärder för att minska t.ex. NO_x-emissionerna leder i allmänhet till försämrad verkningsgrad. Vi har tidigare sett exempel på detta hos motortillverkare som offererar en och samma motor i antingen ”låg-NO_x”- eller ”hög- η ”-utförande.

Vid motorlaboratoriet vid Swiss Federal Institute of Technology (ETH) i Zürich arbetar man med ett naturgasbaserat koncept som skall resultera i såväl hög verkningsgrad som extremt låga emissioner. Utgångspunkten är en konventionell överladdad dieselmotor på 260 kW som byggts om till tändstiftsmotor samt försetts med rökgasåtercirkulation (EGR), Millercykel och en trevägskatalysator i avgasstråket. Motorn drivs stökiometriskt d.v.s. med $\lambda = 1$. Normalt tål en stökiometrisk ottomotor med förblandat bränsle inte någon högre grad av överladdning utan att knacka men tack vare EGR reduceras knackningstendenserna radikalt.

Med simuleringsteknik har man optimerat dels förbränningskammarens utformning dels tändningsinställningen. I en provbänk har man sedan kört motorn under så realistiska förhållanden som möjligt och därvid bl.a. testat fyra olika trevägskatalysatorer och använt sig av sex olika naturgaskvaliteter. Uppställningen av motorn med bränsleinmatning, turboladdare, EGR och katalysator visas i figur 6.3.



Figur 6.3. Uppställning av experimentmotorn vid ETH

Vid proven har man även kört motorn som leanburnmotor utan katalysator men med EGR samt som leanburnmotor utan EGR men med oxidationskatalysator (för CO och HC). Resultaten av körningarna visas i tabell 6.5, där THC (Total Hydro Carbons) avser mängden totalcolväten (d.v.s. inklusive metan) och BMEP (Brake Mean Effective Pressure) är ett mått på det tryck som verkar på kolven.

Ett motsvarande projekt pågår vid LTH inom Kompetenscenter Förbränningsprocesser där en Volvo 10 liters gasmotor konverterats till stökiometrisk drift med EGR. En speciell kolvutformning säkerställer en snabb och stabil förbränning.

Tabell 6.5. Emissioner och verkningsgrad för experimentmotorn vid ETH.

Driftalternativ	Emission, mg/Nm ³			BMEP, bar	Verkn.grad %
	NO _x	CO	THC		
EGR, $\lambda = 1$, 3-vägs-katalysator	≈ 1	≤ 75	≤ 30	12/20	40/42
EGR, $\lambda > 1$, ingen katalysator	< 250	< 650	≈ 1000	12	36,5
Ingen EGR, $\lambda > 1$, oxidationskatalysator	250	100	1 500	12	38

Av tabellen framgår klart de förbättringar som uppnått för "huvudalternativet" gentemot andra driftalternativ för gasmotorer i den aktuella storleksklassen. Vid försöken konstaterades också att

- man kan öka BMEP till 23 bar utan att gå över de termiska och mekaniska påkänningar som normalt gäller för motsvarande dieselmotor
- emissioner och verkningsgrad är relativt oberoende av naturgaskvaliteten
- de fyra testade katalysatorerna var i stort sett likvärdiga avseende reningsgrad
- den utprovade tekniken kan användas på såväl större som mindre enheter än försöksmotorn dock att verkningsgraden kan bli något lägre för mindre motorer.

Ett annat exempel på ny teknik är den s.k. ATAC-motorn som utvecklas vid bl.a. Institutionen för Värme- och kraftteknik vid Lunds Tekniska Högskola. ATAC står för Active Thermo-Athmospheric Combustion men motorkonceptet betecknas även HCCI, Homogenous Charge Compression Ignition. Principen presenterades på en internationell konferens redan år 1979 av ett japanskt forskarteam.

Försöken i Lund sker på en ombyggd lastbilmotor. ATAC är en hybrid mellan ottomotorn och dieselmotorn såtillvida att en homogen förblandning av luft och bränsle antänds genom kompression (och inte med en gnista som i ottomotorn). Man får på så sätt en relativt långsam förbränning som startar över allt i gasblandningen samtidigt. I ottomotorn sprids förbränningen lokalt från en gnista och i dieselmotorn blir förbränningen ojämn därför att blandningen alltid är något ojämn.

Fördelarna med ATAC-motorn är jämn gång, hög verkningsgrad och mycket låga utsläpp av kväveoxider. Detta åstadkoms genom en sofistikerad reglerteknik som gör att bränsleblandningen tillförs i precis rätt ögonblick, vid rätt temperatur och rätt tryck. Kväveoxidutsläppen är av samma storleksordning som de från en ottomotor med trevägskatalysator men fördelen är att man slipper förse motorn med en sådan katalysator. Utsläppen av koloxid och kolväten renas i en oxiderande katalysator.

6.6 SAMMANFATTNING

Liksom för gasturbiner pågår omfattande utvecklingsarbeten inom motorområdet syftande till högre prestanda och lägre emissioner. Elverkningsgraden för större motorer med turbo ligger redan i dag upp mot 45 %.

Gasdrift erbjuder många fördelar framför oljedrift bl.a. när det gäller utsläpp av kväveoxider och partiklar. En nackdel med dagens gasmotorer är dock utsläppen av oförbränd metan som kan uppgå till 3 à 4 % av tillförd bränslemängd. Olika metoder finns för att komma tillrätta med detta problem och fortsatt utvecklingsarbete får visa vilka metoder som är praktiskt tillämpbara.

6.7 REFERENSER

- 6.1. Allan Laursen
Emissionsforhold og forureningsreducerende teknikker for gasmotor- og turbineanlæg
Dansk Gasteknisk Center, Teknisk note nr. 3/1995
- 6.2. Ebbe Danielsson
Motorer och kraftvärmeaggregat för naturgasdrift
Nordisk Gasteknisk Center, juni 1991
- 6.3. Johan Andersson
Dieselmotorn – Aktuell utveckling och teknik
Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp 1999

- 6.4. D Stenersen
Gassmotorer for kraft/varmeproduksjon: Teknologier for
emisjonsbegrensninger
Nordisk Gasteknisk Center, februar 1991
- 6.5. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energiever-
brauch (ASUE)
BHKW-Kenndaten
Odaterad sammanställning av data för Blockheizkraftwerke-moduler med
gasottomotorer och gasdieselmotorer
- 6.6. C Nellen and K Boulouchos, ETH Zürich
Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero-
Emissions through Turbocharging, EGR and 3-Way Catalytic Converter
SAE Technical Paper Series 2000-01-2825, October 2000
- 6.7. Charlotte Dejfors och Göran Grimberger, ÅF-Energikonsult
Motorer för deponigas – Tillgänglighet och drifterfarenheter
Värmeforsk rapport 702, juni 2000
- 6.8. Jan Jensen og Jan de Wit, DGC
Gasmotorer, miljøforhold og metoder til emissionsbegrænsning
Fjernvarmen, nr 5 1992
- 6.9. Bent Karll m.fl.
Lean-Burn Engines UHC Emission Reduction
Energiministeriets Forskningsudvalg for produktion og fordeling af el og
varme
Project Report 1323/96-0002, Part 2, April 1999
- 6.10. Miljøstyrelsen (Danmark)
Emissionsforhold for gasdrevne kraftvarmeanlæg <25 MWe
Arbejdsrapport nr 17, 1997
- 6.11. Göran Frankel
Framtidens motor utvecklas av lundaforskare
Energimagasinet nr 7, 1998
- 6.12. Teknisk information från motorleverantörer via Internet och personlig
kommunikation

7. INDUSTRIPROCESSER

Till industriella processer räknas bl.a. vätskevärmning, ångproduktion, smältning och värmebehandling samt torkning av olika slag. Processerna kan i allmänhet drivas med fasta, flytande eller gasformiga bränslen samt med el. För processer som drivs med bränslen har de gasformiga bränslena, och då i första hand naturgas och gasol, successivt ersatt framför allt kol och olja. Orsaken härtill är främst gasens renhet vilket resulterar i störningsfri drift, lågt underhållsbehov och låga föroreningsutsläpp. Värden som ges i det följande avser förbränning med naturgas eller gasol om inte annat anges.

Av industriprocesser begränsar vi oss i denna rapport till högttemperaturugnar samt torkprocesser

7.1 HÖGTEMPERATURUGNAR

I en högttemperaturugn vill man, som namnet anger, åstadkomma en hög temperatur för att exempelvis smälta, värma eller värmebehandla ett material eller en produkt. Den höga temperaturen åstadkoms genom förbränning av ett bränsle eller på elektrisk väg genom motståndsuppvärmning eller induktion.

Högttemperaturugnar brukar indelas i följande huvudtyper:

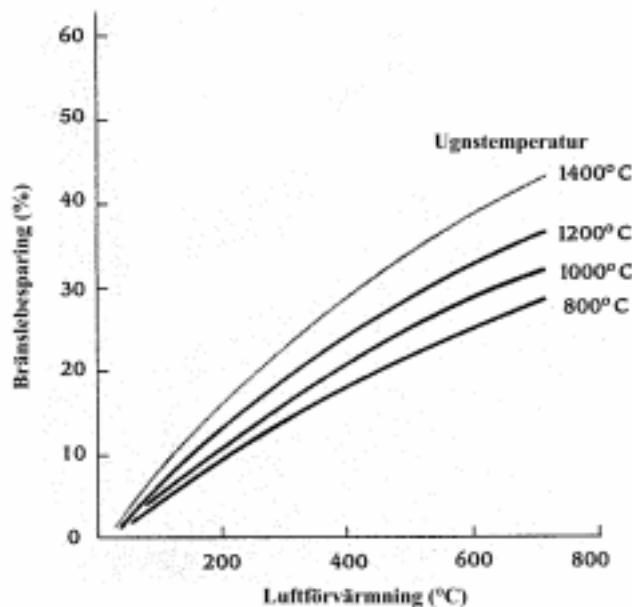
- Smältugnar
- Värmugnar
- Värmebehandlingsugnar

I en smältugn smälts material, t.ex. stål eller aluminium för vidare behandling såsom gjutning eller valsning. Av smältugnar behandlas i denna rapport endast aluminiumsmältugnar.

En värmugn värmer ett material inför t.ex. valsning eller en smidesoperation. Vanliga typer är *stegbalksugn*, där ämnena ligger med ett visst mellanrum och lyfts steg för steg genom ugnen av lyftbalkar (stegbalkar) och *genomskjutningsugn*, där ämnena skjuts i en obruten sträng genom ugnen av en inskjutningsanordning. Temperaturnivåer för värmugnar för stål ligger mellan 1050°C och över 1200°C. Valsverksugnarna i Sverige är i regel bränsleeldade (gasol, olja eller koksugns gas).

Värmebehandlingsugnarna har till uppgift att värma ett material eller en produkt enligt ett visst temperaturprogram så att materialets struktur och egenskaper förändras på önskat sätt. Dessa ugnar arbetar med lägre temperaturer än värmugnar och normala temperaturnivåer är 200°C till 1100°C. Ugnarna kan vara kontinuerliga eller satsvisa. En satsvis ugn kan ha utförande av en vagnugn, där materialet körs in i ugnen på en vagn. Den övervägande delen av svenska värmebehandlingsugnar är elvärmda.

Utan speciella åtgärder ger den höga förbränningstemperaturen i en högtemperaturugn även hög avgastemperatur och hög NO_x-produktion. Detta leder i sin tur till låg processverkningsgrad respektive stora NO_x-utsläpp. I moderna ugnar försöker man därför återvinna så mycket som möjligt av värmen i förbränningsgaserna samtidigt som man genom olika förbränningstekniska åtgärder försöker begränsa NO_x-produktionen.



Figur 7.1. Bränslebesparing vid luftförvärmning

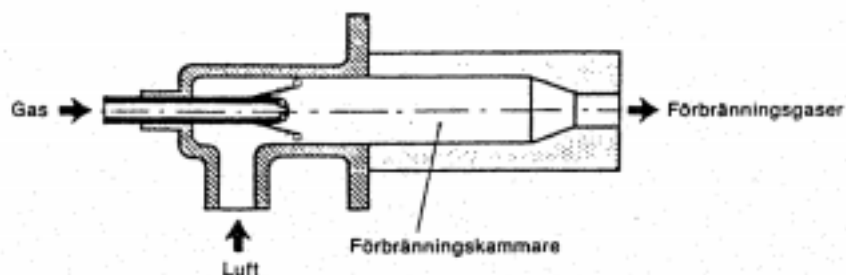
Värmeåtervinningens betydelse framgår av figur 7.1. Figuren visar den bränslebesparing som uppnås vid några olika processtemperaturer och olika grader av luftförvärmning med hjälp av förbränningsgaserna. Vid 1400°C ugnstemperatur och en luftförvärmning till 600°C uppgår således bränslebesparingen till nära 40 % jämfört med ingen luftförvärmning alls. Den ökade luftförvärmningen medför emellertid ökad NO_x-produktion varför någon form av låg- NO_x-brännare i allmänhet erfordras.

En annan metod för att öka verkningsgraden är att syreberika förbränningsluften vilket i ytterlighetsfallet innebär ren syrgas (oxy-fuel). Jämfört med luft blir flamtemperaturen högre och avgasförlusterna mindre eftersom det inte finns någon kvävgas som behöver värmas upp vid förbränningen. Om exempelvis verkningsgraden vid 1400°C ugnstemperatur, ingen värmeåtervinning och luft som oxidationsmedel är 30 %, så stiger den till ca 75 % om ren syrgas används i stället för luft. Vid låga tillsatser av syrgas medför den högre flamtemperaturen dock högre NO_x-produktion varför även här någon form av låg- NO_x-brännare kan visa sig erforderlig. För höga O₂-halter och vid förbränning med ren syrgas minskar dock NO_x produktionen med ökande O₂-halt. Generellt sett är oxy-fuel tekniken väsentligen dyrare än traditionell förbränningsteknik och det går inte att motivera oxy-fuel teknik enbart genom energibesparing. Det fall där oxy-fuel tekniken kan vara lönsam är som alternativ till att bygga ut den befintliga produktionskapaciteten

7.1.1 Brännarkonstruktioner

En vanlig brännartyp i ugnar är höghastighetsbrännare, se figur 7.2. Större delen av förbränningen sker i en förbränningskammare (tunnel) och de heta förbränningsgaserna strömmar ut ur kammaren genom en öppning vars geometri styr utströmningshastigheten. Utgångshastigheten i brännarmynningen varierar från 60 m/s till omkring 150 m/s.

Den höga hastigheten ger genom ejektorverkan en snabb sammanblandning av ugnsgaser och förbränningsgaser vilket sänker temperaturnivån så att avbränningen av material (= materialförlusten) inte blir för hög. Brännartypen används mest i schaktugnar och ugnar med smältplan (se senare avsnitt).



Figur 7.2. Principutformning av höghastighetsbrännare

Vid värmebehandlingsprocesser där direkt eldning är utesluten kan man använda sig av brännare i form av strålningsrör. I ett strålningsrör överförs energin från lågan och förbränningsgaserna via ett mantelrör till godset i tre steg:

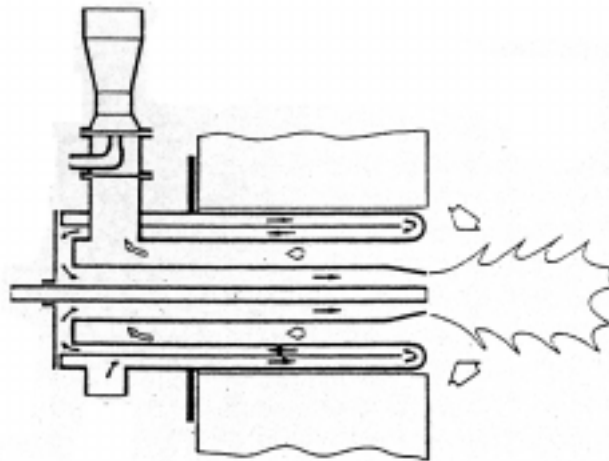
1. Strålning och konvektion på insidan av mantelröret
2. Ledning genom mantelrörets vägg
3. Strålning från mantelröret till ugnen/godset

Avgaserna kommer alltså inte ut i ugnen utan leds, oftast med värmeåtervinning, via separata kanaler ut till atmosfären. Med keramiska material kan idag arbetstemperaturer på ca 1500°C uppnås.

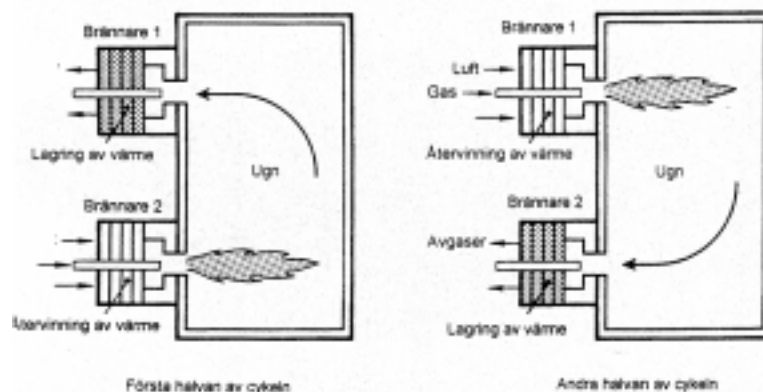
En annan brännartyp är den rekuperativa brännaren, se figur 7.3. I en sådan brännare förvärms förbränningsluften genom återvinning av en del av avgasenergin. Avgaserna lämnar nämligen ugnen genom brännaren där de avger energi till den inkommande förbränningsluften genom värmeväxling. Efter värmeväxlingen kan avgastemperaturen ligga vid 130-140°C vilket är avsevärt lägre än vid en konventionell brännare. De lägre avgasförlusterna innebär en ökning av verkningsgraden och därmed lägre bränsleförbrukning. Rekuperativa brännare används ofta i gaseldade degelugnar och själva brännardelen kan t. ex. vara en höghastighetsbrännare eller en strålningsbrännare. Genom en central rekuperator gemensam för flera brännare kan man ersätta värmeväxlarelementen i de enskilda brännarna.

Värmeåtervinning kan också ske i s.k. regenerativa brännare, se figur 7.4. Ett regenerativt brännarsystem består av två brännare och två värmeåtervinnande magasin, vanligen fyllda med ett keramiskt material, t.ex. aluminiumoxid. Brännarna eldas växelvis i cykler.

Under en cykel värmer avgaserna från brännare 1 först chargin (= materialet som skall värmas/smältas) och passerar därefter ut genom brännare 2:s magasin och värmer detta. Samtidigt värms förbränningsluften till brännare 1 av sitt magasin. Efter en viss tid (t.ex. 60 sekunder) reverseras systemet och körs i motsatt riktning. Dyson Hotwork i England är ett av pionjärföretagen vad gäller utveckling av kompakta regenerativa brännare.



Figur 7.3. Principutformning av rekuperativ brännare

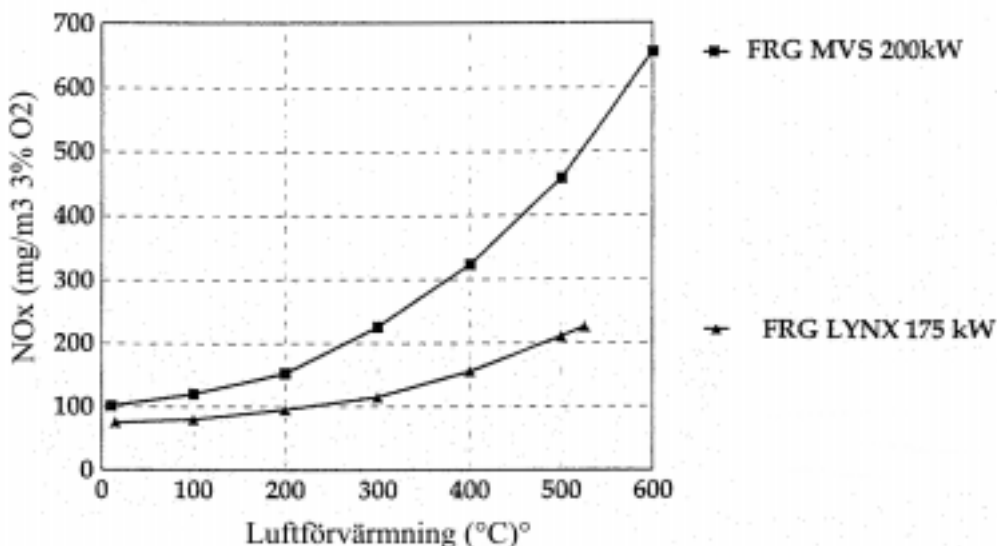


Figur 7.4. Principutformning av regenerativa brännare

En regenerativ brännare kan förvärma förbränningsluften till högre temperatur jämfört med den rekuperativa och är inte heller så känslig för beläggningar på de värmväxlande ytorna. Installation av ett regenerativt brännarsystem medför emellertid ett större ingrepp i ugnen och investeringskostnaden för en och samma brännarstorlek är högre än för en rekuperativ brännare.

7.1.2 Miljöaspekter

Ett av problemen i samband med bränslebaserade högtemperaturprocesser är, som tidigare nämnts NO_x -produktionen där speciellt förvärmning av förbränningsluften har en markant inverkan. I figur 7.5 kan ses hur NO_x -bildningen ökar med ökande luftförvärmning, speciellt gäller detta för 200 kW-brännaren där inga speciella NO_x -reducerande åtgärder vidtagits.



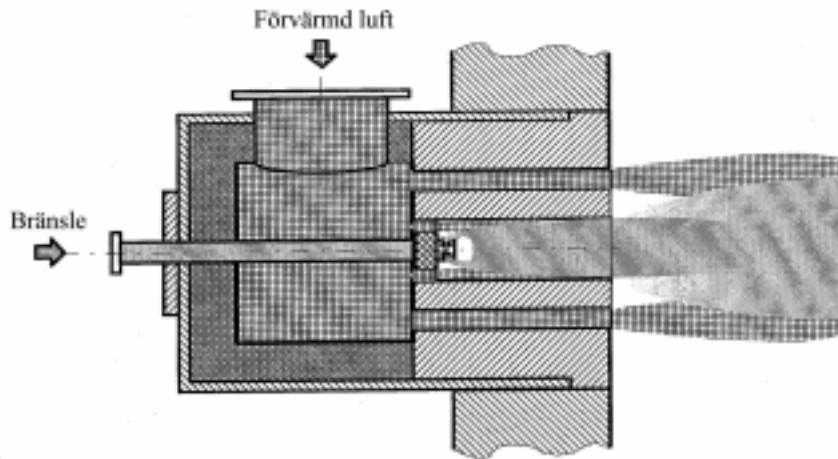
Figur 7.5. Luftförvärmningens betydelse för NO_x -bildningen

Två vanligt förekommande metoder för minskning av NO_x -bildningen är tvåstegsförbränning och avgasrecirkulation. Båda metoderna används även i vanliga pannor.

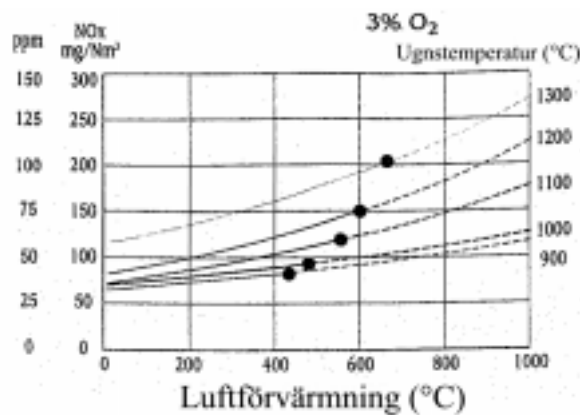
Tvästegsförbränning innebär att gasen förbränns i två zoner, se figur 7.6. I den första zonen sker förbränningen understökiometriskt och i den andra zonen fullbordas förbränningen genom tillförsel av sekundärluft. Den låga tillgången på syre i den första zonen ger låg temperatur och därmed låg NO_x -bildning. Även i den andra zonen, där förbränningen fullbordas, är temperaturen relativt låg eftersom primärzonen avgivit en del av sin värme till den omgivande ugnsatmosfären.

Ett exempel på hur tvåstegsförbränning kan reducera NO_x -bildningen visas i figur 7.7 som gäller för Stordys Nox Beta Ultra Low Nox Burner. Vi ser att vid 600°C luftförvärmning och 1100°C ugnstemperatur ligger NO_x -halten vid ca. 125 mg/Nm³ vilket kan jämföras med 650 mg/Nm³ för Stordys FRG MVS 200 kW Burner i figur 7.5.

Avgasrecirkulation kan vara intern eller extern. Vid intern recirkulation är brännaren utformad så att en del av avgaserna självrecirkulerar. Vid extern recirkulation återförs en del av de utgående avgaserna med hjälp av en fläkt till brännaren. Recirkulationsmängden brukar ligga vid 10 – 20 % av avgasmängden. Om alltför mycket avgaser recirkuleras finns risk för ofullständig förbränning. Figur 7.8 visar reduktionsgraden för NO_x -bildningen som funktion av andelen återcirkulerade avgaser.

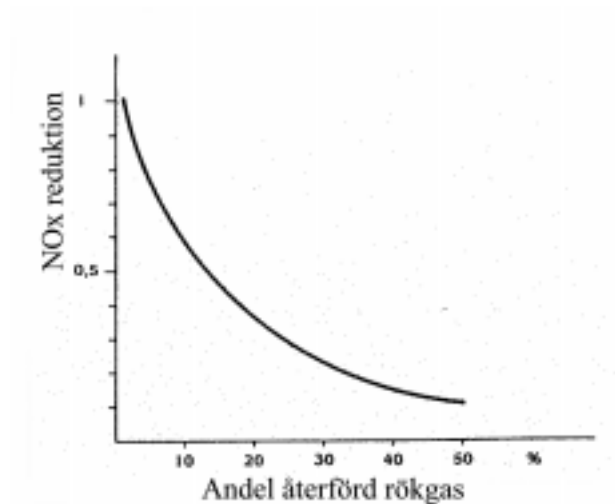


Figur 7.6. Brännare för tvåstegsförbränning

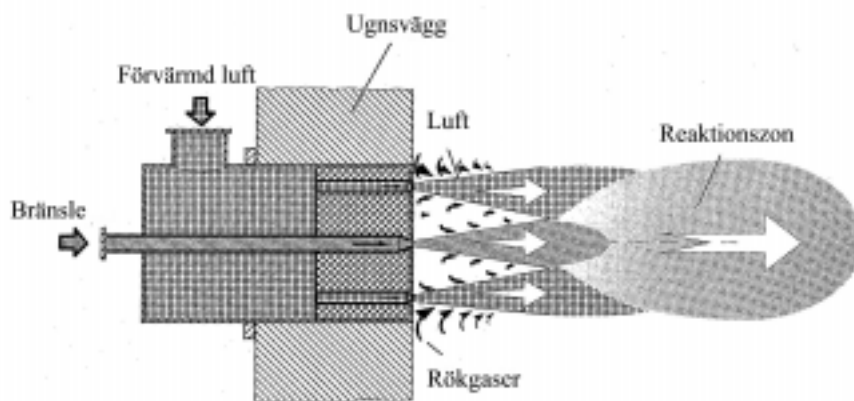


Figur 7.7. NO_x-bildning vid tvåstegsförbränning

En speciell form av avgasrecirkulation utnyttjas i den s.k. FLOX-tekniken (FlameLess OXidation). Som namnet antyder sker här förbränningen utan egentlig låga. Figur 7.9 visar exempel på en FLOX-brännare. I mitten finns ett munstycke som kan fungera som en vanlig brännare upp till en ugnstemperatur på omkring 850°C. Vid därefter ökande temperatur blåses förbränningsluften in i ugnen genom de intillsittande munstyckena samtidigt som lufttillförseln till den "centrala" brännaren stryps så att den enbart matar in gas. Detta arrangemang medför att man får en mycket kraftig inblandning av ugnsatmosfär i flaman.



Figur 7.8. Relativ NO_x-bildning som funktion av återcirkulationsgraden



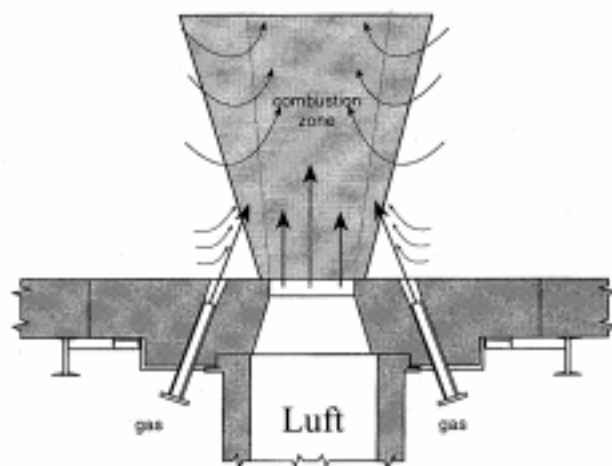
Figur 7.9. Exempel på FLOX-brännare

Typiska NO_x-värden vid FLOX-förbränning är

- 16 mg/MJ (30 ppm, 2 % O₂) vid 900°C ugnstemp. och 750°C lufttemperatur
- 55 mg/MJ (100 ppm, 2 % O₂) vid 1300°C ugnstemp. och 1000°C lufttemperatur

En variant av FLOX-tekniken används av brännartillverkaren North American Manufacturing Company i deras regenerativa brännare TwinBed II. Tekniken benämns LNI (Low NO_x Injection) och är ursprungligen utvecklad av Tokyo Gas.

Under självantändningstemperaturen 760°C fungerar brännaren som en vanlig regenerativ brännare. När temperaturen stigit till 760°C växlas bränsletillförseln till dysor vid sidan av brännaröppningen och endast luft blåses nu in via brännarmunstycket, se figur 7.10. Om en "vanlig" brännare ger 1000 ppm NO_x vid 1200°C så uppges TwinBed II ge mindre än 80 ppm vid samma temperatur.



Figur 7.10. North Americans LNI-brännare

Dyson Hotwork använder sig av stegvis förbränning i kombination med en egen metod för blandning av gas, luft och avgaser (Internally Induced Fuel Dilution System) i deras E-Jet-brännare. Förbränningen blir även här flamlös, vilket resulterar i låga NO_x-utsläpp, se tabell 7.1.

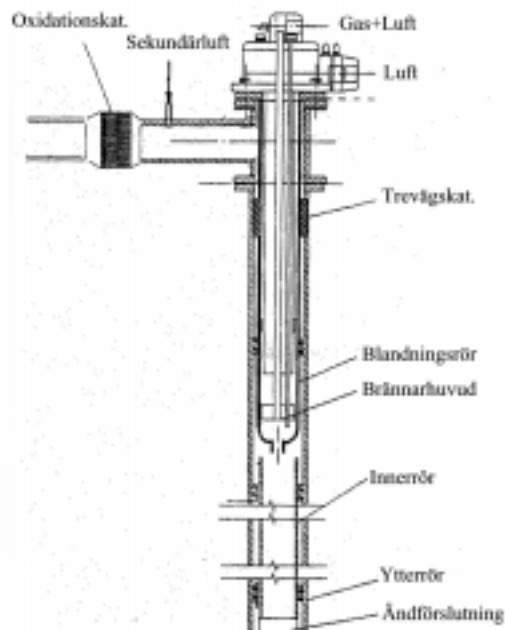
Tabell 7.1. Utsläpp av kvävedioxid från Dysons E-Jet-brännare

<u>Ugnstemp. °C</u>	<u>Lufttemp. °C</u>	<u>ppm vid 3 % O₂</u>	<u>mg/Nm³ vid 3 % O₂</u>
1000	800	43	88
1200	1000	88	180
1300	1100	122	250

En svensk NO_x-reduktionsmetod som är på väg att kommersialiseras är katalytisk rening av avgaserna inuti brännaren. En förutsättning är att förbränningen sker med en i det närmaste stökiometrisk bränsle/luftblandning vilket skapar gynnsamma förutsättningar för de katalytiska reaktionerna. Det låga luftöverskottet resulterar i en höjning av verkningsgraden med 4-5 procentenheter jämfört med ett luftöverskott på 30 procent.

Katalysatorn har formen av ett nät och är utvecklad av Catator AB i Lund. Nätet är belagt med palladium (Pd) och rhodium (Rh). Katalysatorn omvandlar kväveoxiderna till rent kväve och koldioxid. Nätutformningen ger en rad fördelar såsom lågt tryckfall, högt katalysatorutbyte och lätthet att anpassa till befintliga brännare. Tillämpningen på industribrännare har tagits fram av Kanthal AB, som kommer att lansera tekniken kommersiellt under namnet Kanthal GAS.

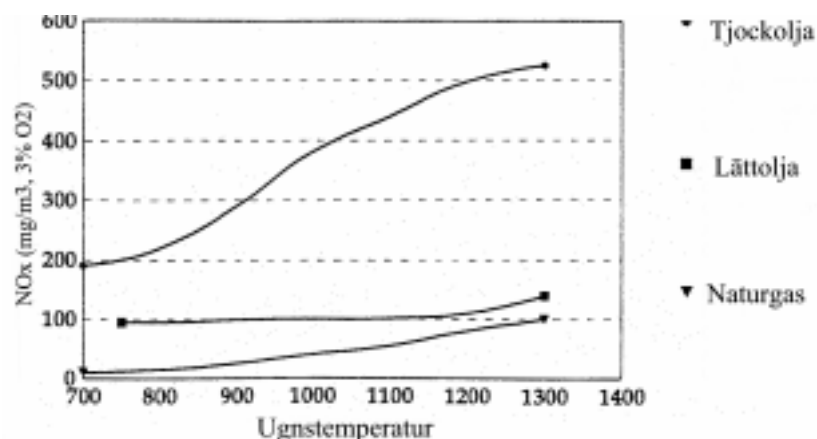
Katalysatorn placeras i brännarens rekuperator där temperaturen är lämplig för de katalytiska reaktionerna. Praktiska prov har utförts vid Tekniska Högskolan i Lund och vid Kanthal i Hallstahammar. Proven utfördes med rekuperativa brännare placerade i raka strålningsrör och monterade i testugnar. I brännarutloppet fanns dessutom en oxiderande katalysator av palladium för att oxidera kvarvarande kolmonoxid till koldioxid, se figur 7.11



Figur 7.11. Brännare med katalysatorer för avgasrening

Proven visar att NO_x -emissionen ligger vid i medeltal 62 ppm eller 30 mg/MJ vilket kan jämföras med ca 350 ppm för konventionella system. Beaktas även den höjda verkningsgraden ligger den totala minskningen i kväveoxidutsläpp i intervallet 71 – 78 %. Koloxidutsläppen ligger i området 10 – 100 ppm.

Som nämnts inledningsvis till detta kapitel har naturgas och gasol i allt större utsträckning ersatt olja som bränsle i högttemperaturugnar. Det tillverkas emellertid fortfarande oljedrivna industribrännare och ett exempel är Stordys NoxBeta-serie som kan drivas med naturgas, gasol, lätt brännolja eller tjock brännolja. Bränsleslaget påverkar dock brännaregenskaperna och i figur 7.12 visas NO_x -bildningen i en ugn utan luftförvärmning vid eldning med naturgas respektive olja. Även brännareffekten påverkas av bränsleslaget, så t.ex. är märkeffekten för brännaren relaterad till fig 7.12 610 kW vid naturgasdrift och 550 kW vid oljedrift. Man kan således konstatera att i det här fallet är naturgas fördelaktigare än olja beträffande såväl NO_x - bildningen som brännareffekten. Enligt tillverkarens uppgift påverkas inte CO-bildningen märkbart av bränsleslaget, den ligger under 5 ppm för alla bränslena.



Figur 7.12. NO_x-bildning vid naturgas, lätt eldningsolja och tjock eldningsolja

7.1.3 Aluminiumsmältugnar

Det finns i princip fyra huvudtyper av smältugnar för aluminium:

- Schaktugn; drivs med naturgas/gasol
- Ugn med smältplan; drivs med naturgas/gasol
- Degelugn; drivs med elenergi eller naturgas/gasol
- Rännugn; drivs med elenergi

Schaktugn benämns även tornugn eftersom ugnskroppen bildar ett torn. Inmatning av det material som skall smältas (chagering) sker i schaktets övre ända. Materialet passerar nedåt och möter de heta avgaserna som leds in i schaktets botten. Verkningsgraden är hög och den kan ökas ytterligare genom förvärmning av förbränningsluften i dubbelväggar i schaktet. En schaktugn visas i figur 7.13.

I ugn med smältplan finns ett sluttande plan innanför chageringsluckan på vilket materialet placeras. Brännarna sitter här på ömse sidor om planet vilket ger kortare uppehållstid för avgaserna vid chagen och därmed relativt låg verkningsgrad. Ugnen kan förses med rekuperator men det kräver att det ingående materialet är rent för undvikande av försmutsning. Alternativt kan ugnen utrustas med regenerativa brännare.



Figur 7.13. Schaktugn för aluminiumsmältning av fabrikat Stotek

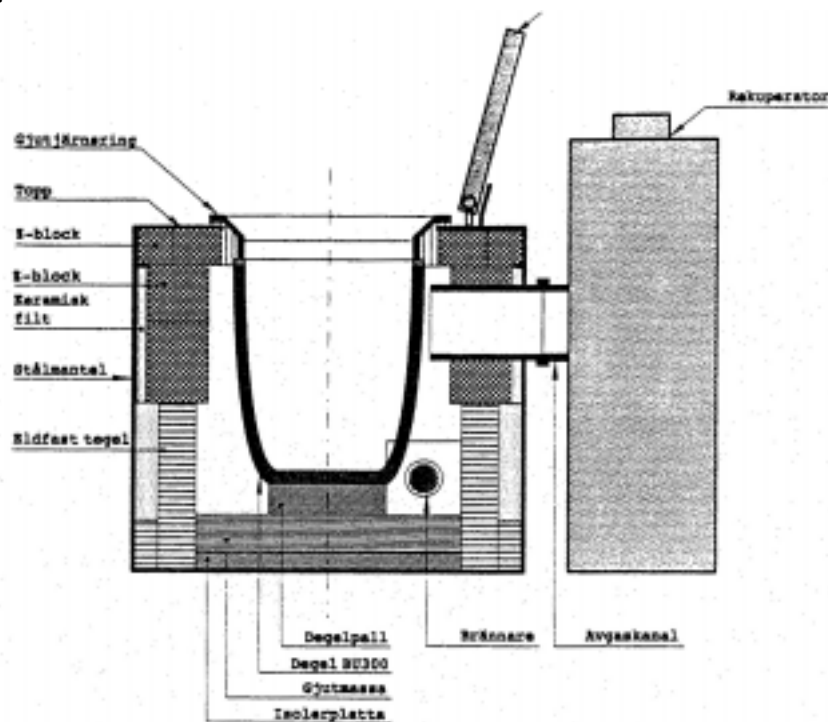
Degelugnen används både för smältning och varmhållning och kan vara gas- eller elvärmd. Exempel på en gasvärmd degelugn för aluminiumsmältning visas i figur 7.14. Ugnen har relativt hög verkningsgrad eftersom den har en god isolering och ett lock som täcker ugsöppningen.

Rännugnen behandlas ej här eftersom den enbart finns i eldriven version.

Några exempel på verkningsgrader och emissioner från aluminiumsmältugnar ges nedan.

Värnamo Pressgjuteri bytte i början av 1990-talet ut en gasdriven aluminiumsmältugn med kallluftbrännare mot en modernare ugn med en regenerativ brännare. Uppbyggnaden av den nya ugnen, som levererats av Schmitz+Apelt LOI, framgår av den tidigare figuren 7.14. Maximal chargevikt är 300 kg aluminium och smältkapaciteten är 150 kg/h. Mätningar av bl.a. energiåtgång och NO_x-emissioner gjordes både före och efter ugsbytet. Det visade sig att införandet av en regenerativ brännare innebar en energibesparing på cirka 50 % jämfört med kallluftbrännare. Genom luftförvärmningen i den regenerativa brännaren ökade emellertid NO_x-utsläppen från 55 mg/MJ till 150 mg/MJ, d. v.s. med drygt 170 %. Med hänsyn till den lägre energiförbrukningen för rekuperatorugnen stannar dock nettoökningen av NO_x-utsläppen vid cirka 40 %.

En aluminiumsmältugn vid ett smältverk i Norge är försedd med två par av North Americans regenerativa LNI-brännare. Ugnskapaciteten är 30 ton och smältkapaciteten 10 ton/h. Varje brännarpar är på 3,8 MW och bränslet är gasol. Vid smältverket finns även ugnar med kallluftbrännare och rekuperativa brännare. Mätningar har gjorts på alla tre brännartyperna och resultaten sammanfattas i tabell 7.2.



Figur 7.14. Uppbyggnad av degelugn för aluminiumsmältning

Tabell 7.2. Jämförande data för brännare vid norskt aluminiumsmältverk

Brännartyp	Temp.°C	CO, ppm	NO _x ppm	MJ/kg Al	g NO _x /kg Al
Kalluft	910	400	66	3,04	0,10
Rekuperativ	900	400	143	2,43	0,18
LNI	916	51	55	1,94	0,055

MJ/kg Al = energiåtgång per kilogram smält aluminium

Som framgår av tabellen är NO_x-utsläppen från kalluftbrännaren och LNI-brännaren av samma storleksordning men tack vare den högre verkningsgrad som åstadkommes av den regenerativa LNI-brännaren blir det specifika NO_x-utsläppet lägst för denna brännartyp. North American har uttryckt det som så att "we believe LNI to be the most powerful NO_x-inhibiting technology available today for high-temperature process furnaces"

7.1.4 Ugnar för värmning och värmebehandling

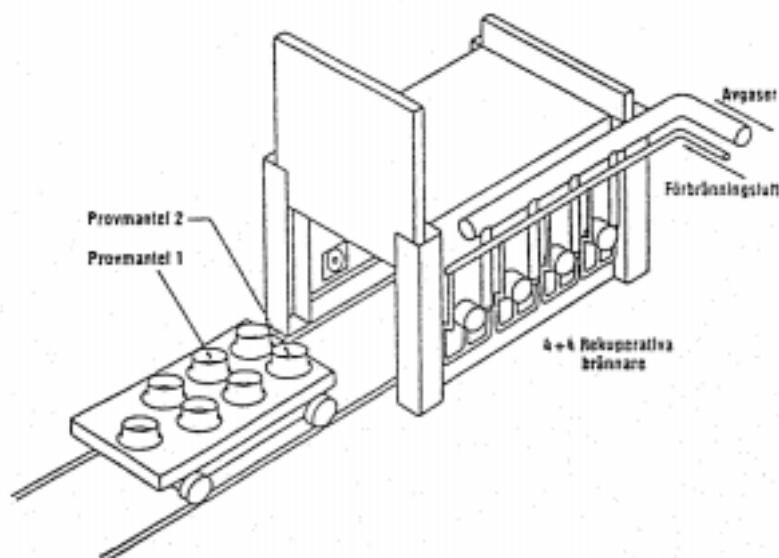
Den principiella funktionen hos en värm- eller värmebehandlingsugn är egentligen samma som för en smältugn d.v.s. det gäller att upphetta ett material till en viss temperatur. Temperaturområdet kan sträcka sig från några hundra°C (t.ex. lacktorkning) till mer än 1200°C (t.ex. släckglödning). Tillämpningar vid låg temperatur behandlas i avsnittet om torkprocesser medan här skall ges exempel på några tillämpningar vid högre temperaturer.

Brännarkonstruktionerna är samma som vid smältprocesser dock att speciell anpassning i allmänhet måste ske till den aktuella applikationen. Detta innebär bl.a. att i energibesparande syfte är rekuperativa och regenerativa brännare allmänt förekommande. Som tidigare nämnts medför luftförvärmning ökad NO_x-bildning men genom konstruktiva brännaråtgärder kan NO_x-halten i allmänhet hållas inom acceptabla gränser.

Det stora flertalet värme- och värmebehandlingsugnar i Sverige ligger utanför naturgasområdet. Alternativen för dessa ugnar är oljedrift, eldrift eller gasolldrift. På grund av lågt elpris är huvuddelen av de svenska ugnarna eldrivna. Utomlands är gasdrift förhärskande dels på grund av naturgasnätens stora utbredning dels på grund av fördelaktigt gaspris i förhållande till elpriset.

Ett exempel på en naturgaseldad värmebehandlingsugn är en vagnugn hos Svedala-Arbrå i Skåne. Företaget ingår i Svedala Industri AB som tillverkar kross- och sorteringsverk för gruv- och stenindustrin. I stålgiuteriet gjuts bl.a. maskindelar av manganstål och för värmebehandling av gjutgodset finns en stegbalksugn och en vagnugn. Den senare används för släckglödning av manganstål, vilket innebär att godset under 8 timmar värms till temperaturen 1050-1100°C och därefter under 5 timmar hålls vid denna temperatur. Maskindelarna tas sedan ut ur ugnen och sänks ned i ett vattenbad för härdning.

Vagnugnen var tidigare oljeeldad och var då utrustad med 8 st kalluftbrännare med en sammanlagd effekt på 2 000 kW. Under 1990-talet konverterades ugnen till naturgas och försågs då med 8 st rekuperativa brännare om tillsammans 1 440 kW, se figur 7.15. Den lägre installerade effekten möjliggjordes tack vare värmeåtervinningen i brännarna.



Figur 7.15. Schematisk bild av vagnugnen hos Svedala-Arbrå

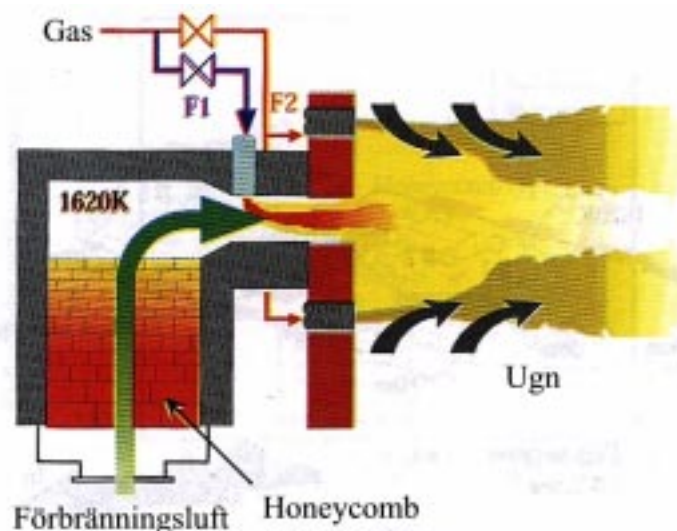
Den verkningsgradsförbättring som uppnås genom brännarutbytet är beroende av aktuell ugnstemperatur och körsätt för ugnen. I detta fall förväntades en förbättring med cirka 25 % vilket är ett medelvärde av några få procent under uppvärmningen från kall till varm ugn och 35 à 40 % vid ugnstemperaturen 1100°C.

Brännarna är av höghastighetstyp med över 100 m/s som utgångshastighet för förbränningsgaserna. Genom lufttillförsel i flera steg och en viss återcirkulation av avgaserna in i flaman hålls NO_x-halten på en rimlig nivå. Med de i brännarna inbyggda luft/avgas-värmeväxlarna uppnås en luftförvärmningstemperatur på 600 – 700°C och en verkningsgrad på ca 80 %.

För ett noggrannare studium av hur värmningsgodhet, verkningsgrad, emissioner m.m. påverkades av konverteringen till naturgas genomfördes ett särskilt utvärderingsprojekt i SGC's regi. Bl.a. försågs några provmantlar med inborrade termoelement för noggrann registrering av godstemperaturen.

Utvärderingen visade att

- temperaturjämnheten i ugnen och i mantlarna blev betydligt bättre efter konverteringen till naturgas
- energianvändningen minskade med (förväntade) 25 %, från 2,9 till 2,2 GWh/år vilket motsvarar en minskning från 1 770 till 1 330 kWh/ton gods
- glödskaiförlusten blev samma, mindre än 2,5 %
- NO_x-halten efter konverteringen låg inom intervallet 40 – 100 mg/MJ vilket kan jämföras med 40 – 60 mg/MJ vid oljeeldning och kalluftbrännare.



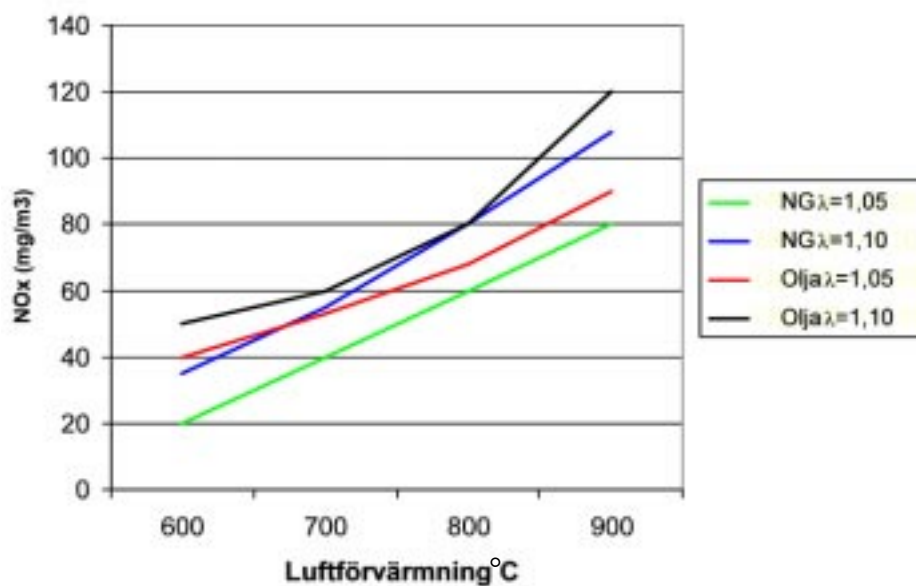
Figur 7.16. Regenerativ brännare med keramiskt värmemagasin av "bikaketyp"

I Japan har utvecklats en teknik med regenerativa brännare där värmemagasinen utgöres av keramiska "bikakeceller" (honeycomb cells), figur 7.16. Jämfört med de traditionella keramiska kulorna är den värmeupptagande specifika ytan (m^2/m^3 regeneratorvolym) sex gånger större samtidigt som vikten per ytenhet är tio gånger mindre. Detta har medfört att man bl.a. genom kortare cyklingstider (30 sekunder mot normalt 120 sekunder) kan uppnå förvärmningstemperaturer kring 1300°C vilket är obetydligt under förbränningstemperaturen. Så hög temperatur ger mycket stabil förbränning varför den interna återcirkulationsgraden av förbränningsgaserna kan göras mycket hög vilket ger låg syrgaskoncentration som i sin tur ger låga NO_x -halter.

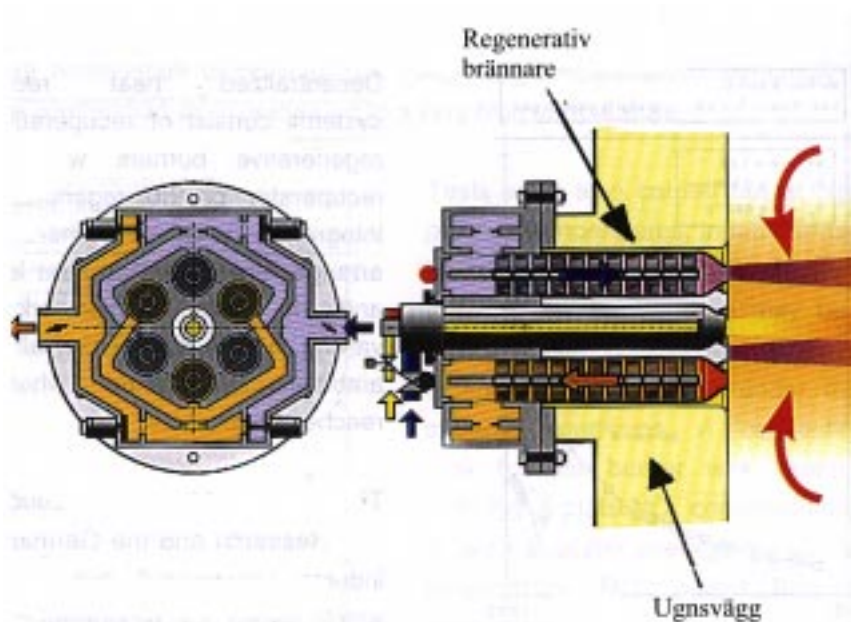
Tekniken tillämpas bl.a. vid Fukuyama Steel Works där en värmugn vid ett valsverk försetts med 76 st av de nya regenerativa brännarna. Energibesparingen anges till 25 % jämfört med en central rekuperator och 10 % jämfört med konventionella regenerativa brännare. NO_x -utsläppen uppgår till 40 ppm vilket är en tredjedel av det japanska gränsvärdet.

Vid British Steel har man byggt upp en värmebehandlingsugn för stål i pilotskala för att testa olika moderna, regenerativa brännare. En av brännarna kunde eldas med både naturgas och eldningsolja och resultatet avseende NO_x -utsläpp visas i figur 7.17. Skillnaden i utsläpp (till naturgasens fördel) är mest märkbar vid låg luftförvärmningstemperatur, vid högre temperaturer är utsläppen ungefär lika. För båda bränslena ligger utsläppsnivån långt under det engelska gränsvärdet, som för exempelvis 900°C förvärmning ligger vid 950 mg/Nm^3 .

Vid ett valsverk tillhörande Acciai Speciali i Terni i Italien finns en härdugn för kontinuerlig härdning av bandstål i rostfritt stål. Ugnen är utformad som två horisontella, parallella tunnlar och efter ugnspassagen sker snabbkylning och betning av bandstålet. Ugnen var ursprungligen försedd med konventionella brännare utan värmeåtervinning men försågs år 1996 med 60 st. REGEMAT-brännare. Dessa brännare är regenerativa men till skillnad från vanliga sådana, som består av två separata stråkar, så är de båda stråken här integrerade i en enhet, se figur 7.18.



Figur 7.17. NO_x-utsläpp från gaseldad och oljeeldad regenerativ brännare



Figur 7.18. Integrerad regenerativ brännare av märke REGEMAT

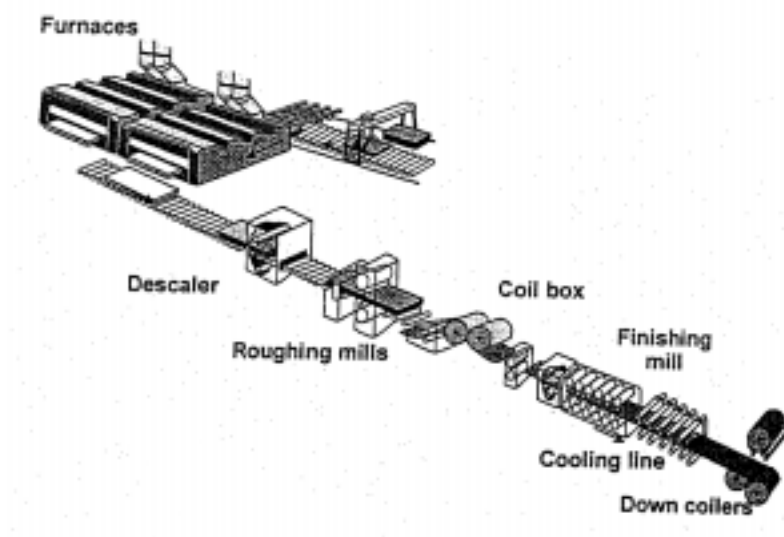
Inom ramen för ett THERMIE projekt gjordes en utvärdering av ugnsprestanda före och efter brännarbytet. Man hade dessutom möjlighet att jämföra dessa data med data från en intilliggande ugn med ett centralt rekuperativt värmeåtervinningssystem. Resultatet vad avser specifik bränsleförbrukning och NO_x-emissioner visas i tabell 7. 3. I tabellen är A = ursprungliga brännare utan värmeåtervinning, B = ugn med centralt rekuperatorsystem och C = REGEMAT-brännare.

Tabell 7.3. Data för härldugnar med tre olika brännartyper

Koncept	Specifik bränsleförbrukning $\text{Nm}^3/\text{ton stål}$	NO_x -emission mg/Nm^3 vid 3 % O_2	NO_x -emission g $\text{NO}_x/\text{t stål}$
A	65	300	234
B	36	500	216
C	27	80	26

Tabell 7.3 talar sitt tydliga språk när det gäller prestanda för de olika brännartyperna. Den regenerativa REGEMAT-brännaren är således överlägsen de övriga två i fråga om såväl energieffektivitet som miljövänlighet.

Svenskt Stål AB (SSAB) har ett stålvalsverk för tunnplåt i Borlänge. Råmaterial i form av järnplåtsämne levereras från SSAB:s anläggningar i Oxelösund och Luleå. Järnplåtsämnet upphettas i två värmugnar (stegbalksugnar) och passerar därefter ett förvalsverk och ett finvalsverk, se figur 7.19.



Figur 7.19. Principbild av SSAB:s stålvalsverk i Borlänge

Stegbalksugnarerna har vardera en kapacitet på 300 t/h och uppvärmningen sker till 1250°C . Den ena ugnen (ugn 302) är oljevärmad medan den andra (ugn 301, se figur 7.20) värms med gasol (LPG). Ugnarna är försedda med rekuperativa brännare.

Några data för de båda stegbalksugnarerna ges i tabell 7.4.

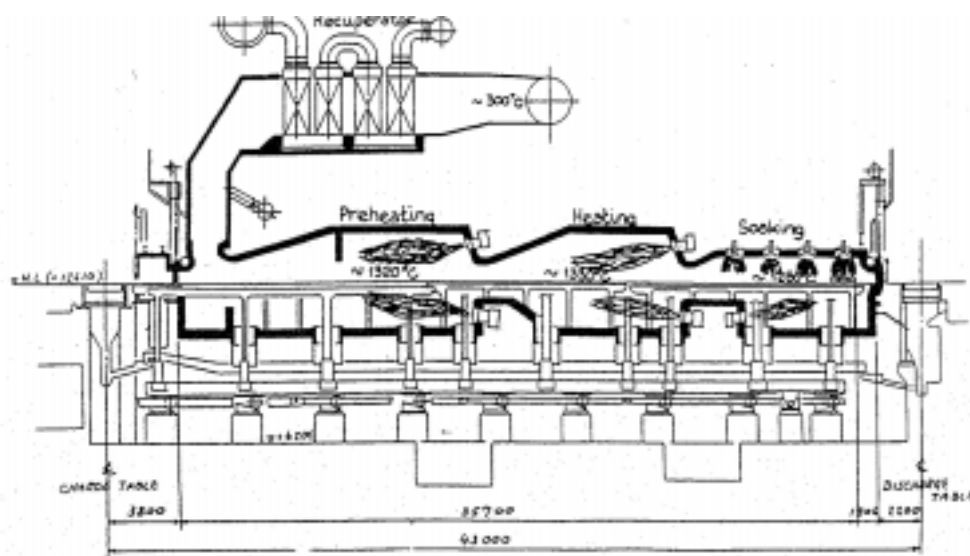
Slutsatser som kan dras av data för de båda stegbalkssugnarerna är att den gasoeldade ugnen

- kräver färre brännare för en och samma värmningskapacitet
- har lägre specifik energiförbrukning och
- ger lägre emissioner

jämfört med den oljeeldade ugnen.

Tabell 7.4. Data för stegbalksugnarna vid SSAB Tunnplåt i Borlänge

Parameter	Enhet	Ugn 302 (tjockolja)	Ugn 301 (gasol)
Tillverkare		Italimpianti	Chugai Ro
Invändig ugnslängd	m	36,7	35,7
Invändig ugnsbredd	m	12	12
Invändig ugnshöjd	m	4	4,4
Antal brännare		118	75
Bränsleförbrukning	kWh/ton	395	365
Förbränningsluft	Max°C	510	700
Tillåtna månadsutsläpp			
NO _x	mg/MJ	180	105
Stoft	g/kg olja	1,0	-
Verkliga utsläpp			
NO _x	mg/MJ	117	80
Svavel	% av oljemängd	0,8	-



Figur 7.20. Gasolvärmd stegbalksugn vid SSAB Tunnplåt i Borlänge

7.2 SAMMANFATTNING

Problemet vid högtemperaturugnar är att åstadkomma hög verkningsgrad samtidigt med låga NO_x-emissioner.

Hög verkningsgrad åstadkommes främst genom förvärmning av förbränningsluften i rekuperativa eller regenerativa brännare. Effektiva värmeväxlare i sådana brännare gör att skillnaden mellan luftförvärmningstemperatur och ugnstemperatur kan vara mindre än 50°C.

Låg NO_x-emission åstadkommes i första hand genom förbränningstekniska åtgärder. Exempel är tvåstegsförbränning, avgasrecirkulation och flamlös förbränning (FLOX) samt kombinationer och varianter av dessa. En ny teknik med katalytisk avgasrenare placerad inuti en rekuperativ brännare är under utveckling av Catator AB och Kanthal AB.

I tabell 7.5 sammanfattas i kapitel 7 angivna NO_x-värden för ett antal olika brännarkonstruktioner och brännarfabrikat. För jämförelsens skull har alla värden räknats om till mg/MJ tillförd bränsleenergi. Omräkning har skett enligt:

$$\text{mg/Nm}^3 = 2,07 \times \text{ppm}$$

$$\text{mg/MJ} = 0,56 \times \text{ppm} (3 \% \text{ O}_2)$$

Tabell 7.5. NO_x-emissioner från ett antal olika brännare

Brännare	Bränsle	Ugnstemp°C	Lufttemp°C	NO _x , mg/MJ
Konventionell	Gas	1100	20	28
Konventionell	Gas	1100	600	180
Stordy NO _x Beta (Tvåstegsbränn.)	Tjockolja	1200	20	140
Dito	Gas	1200	20	28
Dito	Gas	1100	600	35
FLOX typvärde	Gas	900	750	16
Dito	Gas	1300	1000	55
N.A. Twin Bed (LNI-brännare)	Gasol	916	n.a.	31
Dito	Gas	1200	1100	45
Dyson, E-Jet (tvåstegsbränn.)	Gas	1000	800	24
Dito	Gas	1300	1100	68
REGEMAT (Integr. reg.)	Gas	1000	n.a.	22
Japansk ”bikake-modell”	Gas	1300	1250	22

Ur tabellen kan bl.a. följande utläsas:

- Oljedrift ger väsentligt högre NO_x-utsläpp än gasdrift
- NO_x-emissionerna utan luftförvärmning är relativt låga; 28 mg/MJ redovisas för såväl en ”vanlig” brännare som en tvåstegsbrännare
- NO_x-emissionerna ökar med ökande ugnstemperatur och värdena är ungefär samma för alla låg- NO_x-brännarna oberoende av fabrikat
- Ett undantag till föregående slutsats är den japanska ”bikake”-brännaren som vid 1300°C ugnstemperatur ger 22 mg/MJ mot 55 – 68 mg/MJ för FLOX- och Dysonbrännare

7.3 REFERENSER

- 7.1. Mats Holmgren
Naturgasanvändning inom gjuteriindustrin
Svenska Gjuteriföreningen
Oktober 1989

- 7.2. Dan Creutz m. fl.
Smältugnar för aluminium — en tekniköversikt med nyckeltal och LCC-kalkyler
Gjuteriföreningen
Juni 2000

- 7.3. Mikael Näslund
Låg- NO_x- teknik för gasdrivna processer — dagsläge
Svenskt Gastekniskt Center, rapport SGC 076
Oktober 1996

- 7.4. Michael Flamme
New Opportunities for Improvement of Energy Efficiency in Process Technology
2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces
Stockholm, January 17 – 18, 2000

- 7.5. Bruce Cain m.fl.
The Development and Application of Direct Fuel Injection Techniques for Emissions
Reduction in High Temperature Furnaces
2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces
Stockholm, January 17 – 18, 2000

- 7.6. M. Holmes
Process-friendly NO_x Reduction Techniques
2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces
Stockholm, January 17 – 18, 2000

- 7.7. A Milani
Mild Combustion Techniques Applied to Regenerative Firing in Industrial Furnaces
2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces
Stockholm, January 17 – 18, 2000

- 7.8. T Hasegawa
Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System
2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial
Furnaces
Stockholm, January 17 – 18, 2000
- 7.9. Mikael Näslund och Nils Lindskog
Katalytisk rening av NO_x i industribrännare
Gasnytt, nr 1, 2001
- 7.10. Teknisk information från ugn- och brännartillverkare via Internet och
personlig kommunikation

8 TORKNING

Tack vare naturgasens och gasolens renhet i kombination med låga emissioner är båda dessa bränslen utmärkta för olika torkprocesser. Begreppet torkning är dock oerhört brett. För att begränsa omfattningen av föreliggande studie visas endast på ett par olika tillämpningar. Exempel på material och produkter som är aktuella för torkning är:

- Textiler
- Papper
- (Bio)bränsle
- Livsmedel & spannmål
- Tegel och keramik
- Lack



Figur 8-1 Bl.a. tegel, spannmål och papper kan torkas med gasbränslen.

8.1 IR-TORKNING

Såväl gasdrivna som elektriska IR-strålare kan användas för att torka papper eller textil samt för lacktorkning. Strålningsverkningsgraden är högre för elektriska IR-strålare eftersom en avsevärd del av energin går förlorad i avgaserna från den gaseldade IR-strålaren. I gengäld absorberar vatten mer energi i det våglängdsområde som gaseldade IR-strålare arbetar inom. Ekonomin för gaseldade IR-strålare kontra elektriska avgörs av rådande el- och gaspriser samt anläggningens storlek. Typiska data för en IR-brännare är [8.1]:

Effekt	Max 125 kW/m
Reglerområde	10:1
CO	< 5 mg/MJ
NO _x	< 3 mg/MJ

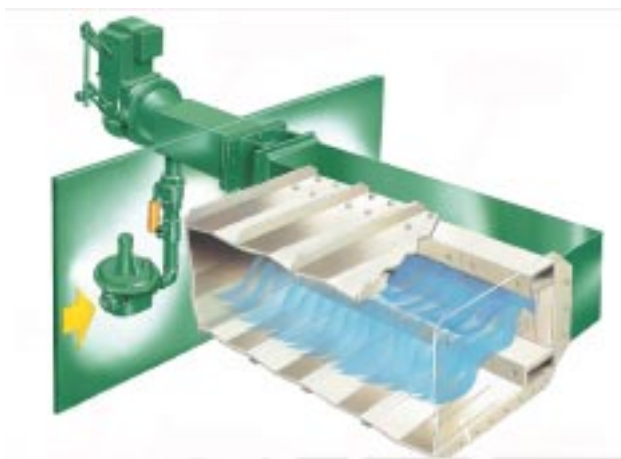
Sannolikt kan både verkningsgraden höjas och emissionerna sänkas genom att använda IR-strålare med katalytisk förbränning, SGC kommer troligen att genomföra ett pilotprojekt vid LTH under 2001.

8.2 TORKNING MED VARMLUFT ELLER AVGASER

Rökgaser från naturgas- och gasolförbränning kan användas till torkning av livsmedel och spannmål. För direkteldade livsmedelsprocesser är det ofta ett lagkrav att avgaserna innehåller mycket låga halter av SO_2 , NO_x och partiklar. Naturgas och gasol ger tillräckligt låga emissioner för att kunna användas för direkttorkning.

Om det inte krävs mycket höga temperaturer eller extremt hög renhet på torkluften, kan avgaserna från t.ex. en gasmotor eller en gasturbin användas för torkning. I Danmark utnyttjas detta i en tegelfabrik där avgaserna från en gasmotor leds in och används för att torka tegelstenar. Denna process kräver ej höga avgastemperaturer vilket medför att energiutnyttjandet för hela processen blir över 98% [8.2].

Ett tredje alternativ är att späda avgaserna från en vanlig brännare med luft så att önskad temperaturnivå erhålls. Sådana brännare arbetar vanligen med höga luftöverskott vilket ger låga emissioner av NO_x . Samtidigt innebär dock det höga luftöverskottet att det finns risk för höga CO emissioner. Eclipse Combustion har utvecklat MINNOX[®] brännaren som arbetar med 80% luftöverskott och detta innebär mycket låga emissioner, se Figur 8-2 [8.3]:



Figur 8-2 MINNOX brännare.

Effekt	125-7500 kW
Reglerområde	10:1
NO_x	<5 ppm vid 3% O_2 ($\approx 2,9$ mg/MJ)
CO	<10 ppm vid 3% O_2 ($\approx 3,5$ mg/MJ)

Större ångdrivna torktumlare kan konverteras till naturgas genom att ångbatteriet ersätt med en naturgasbrännare där torkning sker med avgaserna direkt. Det finns även naturgaseldade torktumlare för hushåll på marknaden men i Sverige finns endast något fåtal demonstrationsobjekt installerade, tekniken är vanligare i Japan och USA [8.4].



Figur 8-3 Naturgasdriven torktumlare (t.v).

8.3 TORKPROCESSER MED ÅNGA [8.5]

I princip kan de flesta bränslen användas för att producera överhettad ånga som används för olika torkprocesser:

- Keramisk industri
- Textilindustrin
- Pappersindustrin
- Träindustri

Produktionen av ånga kan ske med pannor (se avsnitt 4) som kräver ett omfattande distributionssystem om ångproduktionen sker centralt i anläggningen. Genom att distribuera naturgas eller gasol till decentraliserade mindre anläggningar kan behovet av stora centrala anläggningar reduceras samtidigt som man erhåller en mindre risk för allvarigare driftstörningar till följd av ett stort haveri.

8.4 LEVERANTÖRER AV TORKUTRUSTNING

Nedan upptas några exempel på leverantörer av delar för eller hela torkutrustningar. För ytterligare information om leverantörer hänvisas till Industribrännarkatalogen från Dansk Gasteknisk Center som innehåller såväl postadresser som www-adresser [8.1].

IR-strålare

- Sunkiss
- Kanthal
- Solaronics
- Stordy Combustion Engineering B.V.
- Babcock Textilmaschinen GmbH
- N.V. Acotech S.A. (Belgien)
- Vulcan Catalytic Systems Ltd.

För ytterligare leverantörer av IR-strålare se t.ex. Avdelningen för Kemisk Apparattekniks hemsida [8.6].

Torktumlare

- Crosslee
- Danube International
- Fischer & Paykel

Brännare för uppvärmning av luft

- Eclipse Combustion Inc.
- LOI
- Weishaupt
- Flameco Eclipse

8.5 SAMMANFATTNING

Torkning som begrepp är alltför brett för att här kunna analyseras i detalj men författarna hoppas att avsnittet har gett en viss inblick i de möjligheter som finns att använda olika bränslen för torkning i olika tillämpningar. Möjligheterna att använda gasbränslen i torkprocesser är mycket goda och för vidare läsning rekommenderas de angivna referenserna.

8.6 REFERENSER

- 8.1 Industribränderkatalogen, <http://www.dgc.dk>.
- 8.2 CHP plant supplies heat for brick production. CADDET Energy Efficiency Technical Brochure R361, oktober 1999.
- 8.3 P. de Gooijer. Entwicklung MINNOX® Ultra Low NO_x Kanalfächenbrenner. GASWÄRME International 48 (1999) Heft 11, november s. 635-638.
- 8.4 Handbok för naturgas. Applikationer. Installation. Miljö. Utrustning. Sydkraft, Malmö 2000.
- 8.5 Asgar N. Myken, Michael Andersen, Sammenligning av tørreknologier. Dansk Gasteknisk Center a/s, Hørsholm 2000.
- 8.6 <http://www.kat.lth.se/res/drying/drying.htm>

9 SLUTSATSER

Gasformiga bränslen kan användas i alla de tillämpningar som redovisas i föreliggande rapport samt i ytterligare ett flertal andra tillämpningar. I de flesta tillämpningar som redovisats är gasbränslen det bästa alternativet om hänsyn tas till energi- och miljöprestanda. Även om naturgas och gasol är fossila bränslen som ger upphov till CO₂ emissioner kan de bidra till att reducera utsläppen av flertalet föroreningar samt att höja produktivitet och verkningsgrad.

Tidigare var gasbränslenas roll som det mest miljöriktiga alternativet självskriven eftersom energi- och miljöegenskaperna var överlägsna de andra bränslenas. Bl.a. skedde teknikutvecklingen för gasbränslen snabbare och tidigare än för övriga bränslen. Skillnaden i miljö- och energiprestanda mellan olika bränslen har dock minskat under den senaste 10-års perioden men fortfarande har gasbränslen ofta klart bättre energi- och miljöegenskaper. Andra fördelar med gasbränslen är:

- Ett samhälle kan fungera till sin helhet baserat på gasbränslen. De kan användas för transporter, elproduktion, direkt i industrin, matlagning uppvärmning och klimatisering m.m. Inga andra bränslen kan visa upp en sådan mångfald bland användningsområdena.
- Gasbränslen har en självskriven roll i ett energisystem som baseras på en mångfald av bränslen. Genom att gasbränslen utgör en del av den svenska energitillförseln undviks sårbarheten i ett samhälle där större delen av energitillförseln utgörs av ett och samma bränsle. Detta gäller i första hand vägburna transporter.
- De ledningsbundna energigaserna naturgas och biogas innebär att behovet av lastbilstransporter elimineras. Därmed reduceras miljöbelastningen inte bara av att vägtransporterna elimineras utan även av att transportsäkerheten är mycket högre. Naturgas har en mycket hög leveranssäkerhet.
- I några applikationer kan det också konstateras att det mest realistiska alternativet till el är gasformiga bränslen, t.ex. i fallet med smält- och värmebehandlingsugnar där t.ex. biobränslen är otänkbara.
- Ämnen för vilka det saknas gränsvärden och/eller skatter eller avgifter kallas ofta för oreglerade ämnen. Litteraturstudier över oreglerade emissioner från olika bränslen indikerar att gasbränslen har stora fördelar gentemot övriga bränslen. Underlaget är dock gammalt och ganska litet och det finns ett behov av att uppdatera kunskapen kring oreglerade emissioner.

Det som kan begränsa introduktionen av dagens bästa gasteknik är:

- Liksom för övriga bränslen är tyvärr dagens bästa teknik för gasbränslen ofta dyrare än traditionell teknik. De bästa gasapplikationerna kräver högre investeringar än traditionell teknik, dock med bättre energi- och miljöprestanda till följd av den högre investeringen.

- Natur- och biogas är ledningsbundet och når idag bara en förhållandevis liten del av Sverige där användningen dock är hög. Många andra bränslen har den stora fördelen att infrastrukturen är utbyggd på ett helt annat sätt än för gasbränslena, inte minst inom fordonssektorn. Dock är natur- och biogas som fordonsbränsle ganska brett använt längs med den befintliga naturgasledning samt på andra orter med biogasproduktion. Den privata användningen är ännu mycket liten men relativt stor för fordonsflottor (taxi, buss, lastbilstransporter).

9.1 FORDON

Gasbränslen i fordon är ett gott komplement till bensen och diesel, med dagens bästa teknik kan man uppnå mycket låga emissioner för gasmotorer även om verkningsgraden är lägre än för de bästa dieselmotorerna. Om sedan biogas kommer att användas som bränsle i stor skala kan även CO₂ emissionerna reduceras mycket kraftigt. Idag är marknaden, speciellt för lätta fordon, mycket begränsad i Sverige men för tunga fordon har gasfordonen tagit marknadsandelar för trafik inom närområdena, distributionslastbilar och framför allt stadsbussar. Gasdrift av bussar innebär kraftigt reducerade emissioner av NO_x, CO och partiklar jämfört med diesalbussar.

En av de absolut miljövänligaste bilarna är ett dedicerat naturgasfordon (Honda Civic GX CNG) som ännu inte finns på den svenska marknaden. Det pågår en snabb utveckling även för bensenmotorer men miljöprestanda för dagens bästa experimentella bensinteknik är inte bättre än för den idag bästa kommersiella gastekniken. Prototypen för BMW 523g har dock emissionsdata som är mycket bättre än för något annat existerande fordon.

9.2 PANNOR OCH BRÄNNARE

Även teknikutvecklingen inom brännarområdet har gått mycket fort de senaste åren och emissionerna från pannor eldade med alla typer av bränsle har reducerats kraftigt. De bästa gaspannorna och -brännarna uppvisar mycket låga emissionsnivåer. Den kvarvarande utvecklingspotentialen för gaspannor och gasbrännare är liten, troligen kan dock den katalytiska tekniken innebära ännu lägre emissioner och bättre reglerbarhet.

Gasbränslen har dessutom fördelen att behovet av kringutrustning är lågt och att rökgaserna är mycket rena, exempelvis måste biobränslen och olja förvaras i lager i anslutning till pannan och biobränsleledning ger upphov till aska som måste tas ur pannan vid behov. Dessutom kan man enkelt ta tillvara energiinnehållet som finns bundet i form av vattenånga i rökgaserna genom att kondensera rökgaserna. Då uppnår man mycket höga verkningsgrader. Det låga svavelinnehållet i gasol och naturgas gör att man i allmänhet inte får några korrosionsproblem i samband med kondensering, vilket är fallet för övriga bränslen.

9.3 GASTURBINER

Tack vare att verkningsgraden för gasturbiner ökat kraftigt under senare år har deras användning för elproduktion också ökat markant. I Sverige med sina relativt låga elpriser måste dock elproduktionen kombineras med värmeproduktion för att lönsamhet skall kunna uppnås.

Kombikraftverk baserade på gasturbiner har stora fördelar såsom relativt låg byggkostnad och kort byggtid. Detta i kombination med mycket hög elverkningsgrad gör att marknaden för denna typ av kraftverk ter sig mycket ljus.

Trots redan i dag förnämliga drift- och emissionsdata för gasturbiner fortsätter utvecklingsarbetet för att göra dem ännu bättre. Som exempel kan nämnas ett utvecklingsarbete vid Lunds Tekniska Högskola där man befuktar förbränningsluften innan den leds in i brännkammaren. Med denna teknik förväntas gasturbinen uppnå en verkningsgrad på 55 % vid ren elproduktion och 94 % vid kombinerad el- och värmeproduktion. Uppnås dessa värden får man en maskin i klass med eller bättre än motsvarande gaskombianläggning.

9.4 KOLVMOTORER

Liksom för gasturbiner pågår omfattande utvecklingsarbeten inom motorområdet syftande till högre prestanda och lägre emissioner. Elverkningsgraden för större motorer med turbo ligger redan i dag upp mot 45 %.

De stationära motorer i Sverige som används för kombinerad el- och värmeproduktion drivs med naturgas, rötgas eller deponigas. Gasdrivna motorer lämpar sig väl för mindre, decentraliserade kraftvärmeanläggningar och deras antal kommer med all sannolikhet att öka kraftigt, speciellt vid en fortsatt utbyggnad av naturgasnätet.

Gasdrift erbjuder många fördelar framför oljedrift bl.a. när det gäller utsläpp av kväveoxider och partiklar. En nackdel med dagens gasmotorer är dock utsläppen av oförbränd metan som kan uppgå till 3 à 4 % av tillförd bränslemängd. Olika metoder finns för att komma tillrätta med detta problem och fortsatt utvecklingsarbete får visa vilka metoder som är praktiskt tillämpbara.

9.5 HÖGTEMPERATURUGNAR OCH TORKNING

De numera dominerande uppvärmningsmetoderna för högtemperaturugnar är elektrisk uppvärmning och uppvärmning med gas. Även uppvärmning med olja förekommer men minskar stadigt i omfattning.

Orsaken till att gas dominerar som bränsle är dess renhet vilket resulterar i störningsfri drift, lågt underhållsbehov och låga föroreningsutsläpp.

Tekniken för att tillvarata avgasvärmen för att förvärma förbränningsluften har kommit mycket långt och lufttemperaturer som endast ligger 50 à 100°C under ugnstemperaturen är inget ovanligt.

Tekniken för att hålla nere NO_x- produktionen trots hög förbränningstemperatur är också väl utvecklad och det föreligger idag inga svårigheter att hålla gällande gränsvärden. I den tidigare texten har det t.ex. visats på värmebehandlingsugnar vid British Steel som vid 900°C luftförvärmning emitterar ca. 100 mg/Nm³ NO_x att jämföras med det i England gällande gränsvärdet på 950 mg/Nm³.

Sammanfattningsvis kan man säga att gasteknik för högtemperaturugnar nu är så väletablerad och självklar att det mycket sällan är fråga om ett val mellan olja och gas som bränsle.

För direkteldade livsmedelsprocesser krävs att avgaserna innehåller mycket låga halter av SO₂, NO_x och partiklar. Naturgas och gasol ger tillräckligt låga emissioner för att kunna användas för direkttorkning. Om det inte krävs mycket höga temperaturer eller extremt hög renhet på torkluften, kan avgaserna från t.ex. en gasmotor eller en gasturbin användas för torkning. Totalt sett är möjligheterna att använda gasbränslen i torkprocesser mycket goda och energigaserna är ett bra alternativ till el för torkprocesser.

Bilaga 1

OMRÄKNINGSFAKTORER

Omräkning från ppm till mg/Nm³

<u>1 ppm av ämnet</u>	<u>Motsvarar mg/Nm³</u>
SO ₂	2,93
NO	1,34
NO ₂	2,05
CO	1,25
CO ₂	1,96
CH ₄	0,71

Omräkningar vid olika syrgashalt i avgaserna för dansk naturgas (Syrgashalten anges i procent)

Ämne	ppm → mg/m ³	ppm → mg/MJ	mg/MJ → ppm	ppm → ppm x% O ₂ → y% O ₂
Koloxid, CO	ppm · 1,25	$\text{ppm} \frac{6,2}{21 - O_2}$	$\text{mg} \frac{21 - O_2}{6,2}$	—
Kväveoxider, NO _x som NO ₂	ppm · 2,07	$\text{ppm} \frac{10,2}{21 - O_2}$	$\text{mg} \frac{21 - O_2}{10,2}$	$\text{ppm} \frac{21 - O_2(y)}{21 - O_2(x)}$
Kolväten, C _n H _m som CH ₄	ppm · 0,72	$\text{ppm} \frac{3,6}{21 - O_2}$	$\text{mg} \frac{21 - O_2}{3,6}$	—
Kolväten, C _n H _m som C ₄ H ₁₀	ppm · 2,71	$\text{ppm} \frac{13,4}{21 - O_2}$	$\text{mg} \frac{21 - O_2}{13,4}$	—

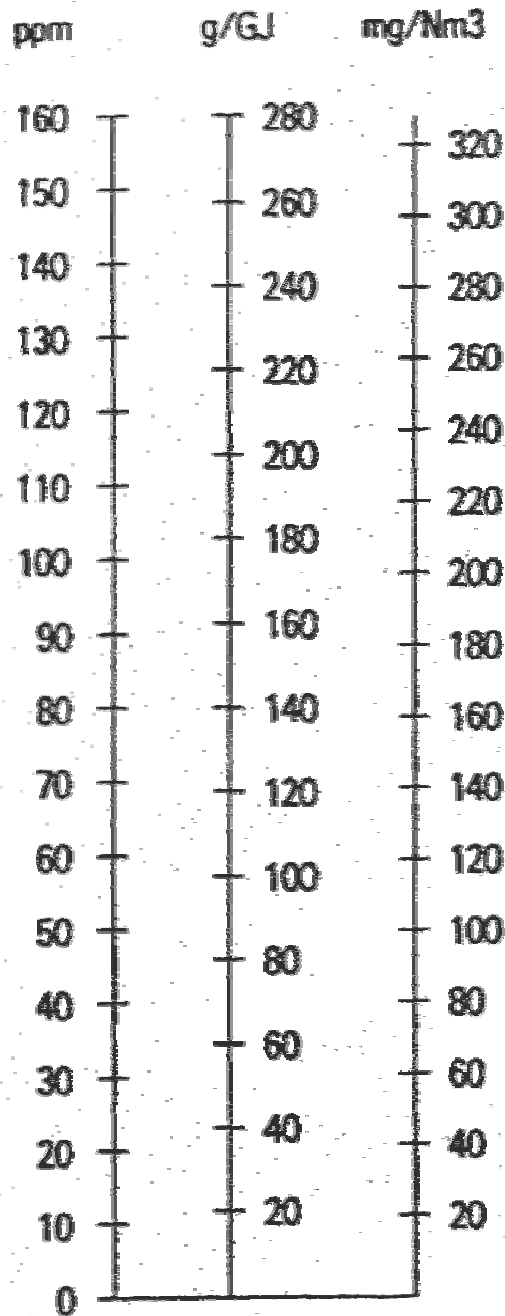
Gäller vid:

$$H_u = 39,179 \text{ MJ/Nm}^3 \approx 10,879 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$CO_{2,max} = 12,12\%$$

Omräkningar vid syrgashalten 15 %

Direkta jämförelser mellan NO_x (som NO_2) angivet i ppm, g/GJ och mg/Nm^3 vid 15 % syrgashalt och torra avgaser kan göras i nedanstående nomogram. Observera att g/GJ är samma som mg/MJ. Omräkningen mellan ppm och mg/Nm^3 är giltigt för alla typer av naturgas. Omräkningen mellan ppm eller mg/Nm^3 och g/GJ med är giltigt med en felmarginal på $\pm 5\%$ för naturgas med undre värmevärde mellan 30 och 40 MJ/Nm^3 .





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