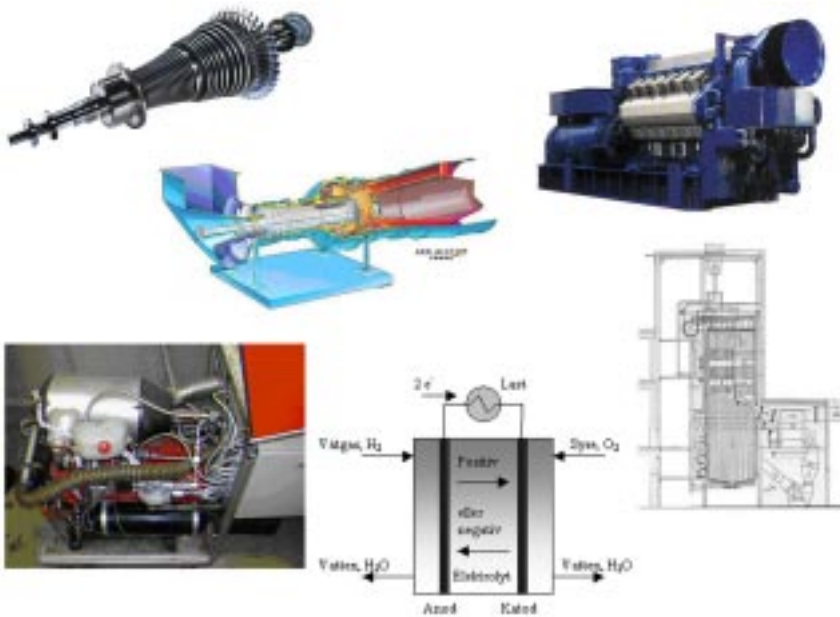


Jämförelse mellan olika kraftvärmeteknologier

©Svenskt Gastekniskt Center - Februari 2002



Christian Persson & Johan Olsson
MALMÖ HÖGSKOLA

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

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

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

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydkraft AB
Öresundskraft AB
Lunds Energi AB
Göteborg Energi AB
ALSTOM Power AB
Volvo Aero Corporation
Vattenfall Utveckling AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

Idag finns det ett stort antal metoder för att samtidigt producera el och värme. Många metoder är så långt utvecklade att de redan finns på den kommersiella marknaden, medan en del fortfarande är under utveckling.

För att aktörer och intressenter på den svenska energimarknaden ska ha tillgång till aktuell information om dagens och framtidens kraftvärmeteknologier, har en jämförande studie mellan olika kraftvärmeteknologier gjorts på uppdrag av Svenskt Gaskombi Center. Rapporten har genomförts som ett examensarbete.

De kraftvärmeteknologier som studerats är följande:

- Ångpanna med ångturbin
- Gasturbin med avgaspanna
- Mikroturbin
- Otto- och dieselmotor
- Stirlingmotor
- Bränsleceller
- Gaskombianläggning
- Bränslecell med gasturbin
- Hybridcykel för biobränsle och naturgas

De egenskaper som studerats för varje teknologi är teknisk beskrivning, totalverkningsgrad, alfavärde, teknisk mognad, utvecklingstendenser, drift- och regleregenskaper, bränslen och bränslekrav, miljöegenskaper och reningsutrustning, bemanningskrav, specifik investeringskostnad samt drift- och underhållskostnader. Detta har gjorts genom litteraturstudier, intervjuer samt med egna kunskaper och tolkningar.

Resultatet av rapporten har mynnat i att egna funderingar har delgivits och att slutsatser har dragits för de, i rapporten, behandlade teknologier.

Det kommer med största sannolikhet att byggas många ångturbinanläggningar i Sverige de närmsta åren. Framförallt beroende på det kommande förbudet om att deponera brännbart avfall. Trots att ångturbinen är en gammal teknologi satsas det fortfarande mycket på utvecklingen.

Det som talar för att det kommer att satsas mer på gasturbiner och då framförallt gaskombianläggningar i framtiden är den höga totalverkningsgraden och det höga elutbytet. Vid jämförelse av ångturbinanläggningar och gaskombianläggningar i samma storleksordning har gaskombianläggningen högre prestanda än den förstnämnda, både vad det gäller verkningsgrad och miljöegenskaper. Dessutom är den specifika investeringskostnaden för gaskombianläggningen mycket lägre än för t.ex. en avfallseldad ångpanna. Skillnaden i specifik investeringskostnad mellan en gaskombianläggning och en biobränsleeldad ångturbinanläggning är dock inte lika stor.

Trots låga investeringskostnader och höga verkningsgrader känns det idag inte lika aktuellt med nya investeringar i diesel- och ottomotorer för användning i stora kraft-

värmeanläggningar. Detta beror framförallt på dess dåliga miljöegenskaper då diesel används som bränsle. Däremot kan det kännas mer motiverat att satsa på naturgaseldade gasmotorer. Dessa har bättre miljöegenskaper samtidigt som de fortfarande har höga verkningsgrader och låga investeringskostnader.

För småskalig produktion av kraft och värme, t.ex. i flerbostadshus, finns det en rad intressanta alternativ. Mikroturbiner, naturgasmotorer, stirlingmotorer och bränsleceller har alla höga verkningsgrader. Dessutom har alla utom gasmotorer mycket låga emissioner vid användning av naturgas.

Abstract

Comparison of different heat and power generating technologies

Today there are different methods of combined production of power and heat. Some methods are very well developed and already available on the commercial market, while others still are under development.

To create a state-of-the-art material about heat and power generating technologies a comparing study has been done. The assignment was provided by the Swedish Gas Center in Malmö and was written as a degree project in Energy and Environment Technology at Malmö Högskola.

The following heat and power technologies has been studied:

- Steam turbine with steam generator
- Gas turbine with HRSG
- Micro turbine
- Otto and diesel engine
- Stirling engine
- Fuel cell
- Combined cycle
- Fuel cell with gas turbine
- Hybrid with bio fuel and natural gas

The properties studied for each technology are the following: technical information, total efficiency, alfa value, technical maturity, tendency of development, operation and regulation characteristics, fuel and fuel requirements, emissions and cleaning technology, man requirements, specific investment cost, operation and maintenance cost.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Målsättning.....	1
1.4	Metod	1
1.5	Avgränsningar	2
2	Ångpanna med ångturbin.....	3
2.1	Teknisk beskrivning	3
2.1.1	Avtappningsturbin.....	3
2.1.2	Mottrycksturbin.....	3
2.1.2	Mottrycksturbin.....	4
2.1.3	Ångpannan	4
2.2	Totalverkningsgrad och alfavärde.....	7
2.2.1	Kondenserande rökgaskylare	8
2.3	Teknisk mognad	8
2.4	Utvecklingstendenser	8
2.5	Drift- och regleregenskaper.....	9
2.6	Bränslen och bränslekrav	9
2.7	Miljöegenskaper	10
2.8	Reningsutrustning för att klara av emissionsgränser.....	11
2.8.1	Kondenserande rökgaskylare	11
2.9	Bemanningskrav	12
2.10	Specifik investeringskostnad.....	12
2.11	Drift- och underhållskostnader.....	13
3	Gasturbin med avgaspanna.....	14
3.1	Teknisk beskrivning	14
3.1.1	Gasturbin	14
3.1.2	Avgaspanna	16
3.1.3	Mikroturbiner	16
3.2	Totalverkningsgrad och alfavärde.....	17
3.3	Teknisk mognad	18
3.4	Utvecklingstendenser	18
3.5	Drift- och regleregenskaper.....	19
3.6	Bränslen och bränslekrav	20
3.7	Miljöegenskaper	20
3.8	Reningsutrustning för att klara av emissionsgränser.....	21
3.8.1	Förbränningstekniska åtgärder	21
3.8.2	Vatten- eller ånginsprutning.....	22
3.8.3	Katalytisk rening	22
3.9	Bemanningskrav	22
3.10	Specifik investeringskostnad.....	22
3.11	Drift och underhåll	23
3.12	Drift- och underhållskostnader.....	23
4	Otto- och dieselmotorer	24
4.1	Teknisk beskrivning	24
4.1.1	SenerTec mikrokraftvärmeverk.....	25
4.2	Totalverkningsgrad och alfavärde.....	25

4.2.1	Värme kraftanläggningar med dieselmotorer.....	26
4.3	Teknisk mognad	26
4.4	Utvecklingstendenser	27
4.5	Drift- och regleregenskaper.....	28
4.6	Bränslen och bränslekrav	28
4.7	Miljöegenskaper	28
4.8	Åtgärder för att minska emissioner av miljöpåverkande ämnen.....	29
4.8.1	Interna åtgärder	29
4.8.2	Externa åtgärder	30
4.9	Bemanningskrav	30
4.10	Specifik investeringskostnad.....	31
4.11	Drift- och underhållskostnader.....	31
5	Stirlingmotorer	32
5.1	Teknisk beskrivning	32
5.1.1	Stirlingmotorn i kraftvärmeproduktion	33
5.2	Totalverkningsgrad och alfavärde.....	33
5.3	Teknisk mognad	34
5.4	Utvecklingstendenser	34
5.5	Drift- och regleregenskaper.....	35
5.6	Bränslen och bränslekrav	35
5.7	Miljöegenskaper	35
5.8	Reningsutrustning för att klara av emissionsgränser.....	36
5.9	Bemanningskrav	36
5.10	Specifik investeringskostnad.....	36
5.11	Drift- och underhållskostnader.....	36
6	Bränsleceller	38
6.1	Teknisk beskrivning	38
6.2	Bränslecellstyper	39
6.2.1	Smältkarbonatbränslecellen (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells) ..	39
6.2.2	Fastoxidbränslecellen (SOFC, Solid Oxid Fuel Cells).....	40
6.2.3	Polymerelektrolytbränslecellen (PEMFC, Proton Exchange Membran Fuel Cells)	40
6.2.4	Fosforsyrabränslecellen (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells).....	40
6.3	Verkningsgrader	40
6.3.1	Smältkarbonatbränslecellen	41
6.3.2	Fastoxidbränslecellen	41
6.3.3	Polymerelektrolytbränslecellen.....	41
6.3.4	Fosforsyrabränslecellen.....	41
6.4	Teknisk mognad och utvecklingstendenser.....	41
6.4.1	Smältkarbonatbränslecellen	41
6.4.2	Fastoxidbränslecellen	42
6.4.3	Polymerelektrolytbränslecellen.....	42
6.4.4	Fosforsyrabränslecellen.....	42
6.5	Bränslekrav.....	42
6.5.1	Smältkarbonatbränslecellen	42
6.5.2	Fastoxidbränslecellen	43
6.5.3	Polymerelektrolytbränslecellen.....	43
6.5.4	Fosforsyrabränslecellen.....	43
6.6	Investeringskostnad	43
6.7	Drift- och underhållskostnader.....	43

7	Kombianläggningar	44
7.1	Gasturbin med avgaspanna och ångturbin	44
7.1.2	Teknisk beskrivning	44
7.1.3	Totalverkningsgrad och alfavärde	46
7.1.4	Teknisk mognad	46
7.1.5	Utvecklingstendenser	46
7.1.6	Drift- och regleregenskaper	47
7.1.7	Bränslen	48
7.1.8	Miljöegenskaper	48
7.1.9	Reduceringsteknik av emissioner	48
7.1.10	Bemanningskrav	48
7.1.11	Investeringskostnad	48
7.1.12	Drift- och underhållskostnader	49
7.2	Bränslecell med gasturbin (Hybrid SOFC/GT)	49
7.2.1	Teknisk beskrivning	49
7.2.2	Totalverkningsgrad	49
7.2.3	Teknisk mognad	49
7.2.4	Utvecklingsbehov	49
7.2.5	Drift- och regleregenskaper	50
7.2.6	Bränslekrav	50
7.2.7	Miljöegenskaper	50
7.2.8	Specifik investeringskostnad	50
7.3	Hybridcykel för biobränsle och naturgas	51
7.3.1	Teknisk beskrivning	51
7.3.2	Totalverkningsgrad och alfavärde	51
7.3.3	Teknisk mognad	52
7.3.4	Utvecklingstendenser	52
7.3.5	Drift- och regleregenskaper	52
7.3.6	Bränslen och bränslekrav	53
7.3.7	Miljöegenskaper	53
7.3.8	Reningsutrustning för att klara av emissionsgränser	53
7.3.9	Bemanningskrav	53
7.3.10	Specifik investeringskostnad	53
7.3.11	Drift- och underhållskostnader	53
8	Utsläpp och reningsutrustning	54
8.1	Utsläpp till luft	54
8.1.1	Partiklar	54
8.1.2	Vätskedimor	54
8.1.3	Gaser	54
8.2	Reningsutrustning för stoftavskiljning	55
8.3	Reningsutrustning för vätskedimor	55
8.4	Förbränning för energiproduktion	55
8.4.1	Åtgärder mot SO _x -utsläppen	55
8.4.2	Åtgärder mot NO _x -utsläppen	58
8.4.3	Åtgärder för lägre koldioxidutsläpp	60
8.4.4	Avfallsförbränning och rening	60
9	Bränslen	62
9.1	Naturgas	62
9.2	Biogas	62
9.3	Biobränslen	63

9.4	Eldningsolja.....	63
9.5	Diesel.....	63
9.6	Avfall.....	64
9.7	Gas från termisk förgasning.....	65
9.7.1	Atmosfärisk förgasning.....	65
9.7.2	Trycksatt förgasning.....	66
9.8	Bränslepriser.....	66
9.8.1	Naturgas.....	66
9.8.2	Biogas.....	66
9.8.3	Biobränslen.....	66
9.8.4	Olja.....	67
9.8.5	Avfall.....	67
9.9	Energiskatter.....	67
9.9.1	Miljöavgift för NO _x	68
9.10	Emissionsgränser.....	68
9.10.1	Emissionsgränser för svavel.....	68
9.10.2	Emissionsgränser för kväveoxider.....	68
9.10.3	Emissionsgränser för stoft.....	69
10	Slutsats och kommentarer.....	70
10.1	Ångpanna med ångturbin.....	70
10.2	Gasturbin med avgaspanna.....	70
10.3	Otto- och dieselmotor.....	71
10.4	Stirlingmotor.....	72
10.5	Bränsleceller.....	72
10.6	Gaskombianläggning.....	72
11	Referenser.....	73
11.1	Publicerat material.....	73
11.2	Muntliga referenser.....	75
11.3	Internetsidor.....	76
11.4	Företags-, produkt- och informationsbroschyrer.....	77

Bilagor

Bilaga 1 - Jämförelsetabeller över de olika kraftvärmeteknologierna

1 INLEDNING

Det finns ett stort antal metoder för att samtidigt producera el och värme. Dessa så kallade kraftvärmetekniker har en ljus framtid och är värda att satsa på, då de ger ett mycket högre energiutnyttjande än då endast el eller endast värme produceras. Det högre energiutnyttjandet innebär att totalverkningsgraden är högre, vilket i sin tur innebär att den energin som går till spillo i el- eller värmeproducerande anläggningar nästan kan utnyttjas till fullo.

Vissa kraftvärmetekniker är så långt utvecklade att de redan finns på den kommersiella marknaden, medan andra fortfarande är under utveckling.

1.1 BAKGRUND

För att aktörer och intressenter på den svenska energimarknaden ska ha aktuell information om dagens och framtidens kraftvärmeteknologier till förfogande, har en jämförande studie mellan olika state-of-the-art-kraftvärmeteknologier gjorts på uppdrag av Svenskt Gastekniskt Center. Rapporten har genomförts som ett examensarbete på högskoleingenjörsutbildningen Energi- och Miljöteknik på Malmö Högskola.

1.2 SYFTE

Syftet med att göra denna jämförelse är att få fram ett aktuellt faktamaterial som kan användas av olika aktörer som ett av flera underlag för respektive aktörs planerade insatser inom kraftvärmeområdet.

1.3 MÅLSÄTTNING

Målsättningen är att kunna ge en klar bild av de kartlagda kraftvärmeteknologierna, både vad det gäller befintliga teknologier som teknologier under utveckling. Materialet skall ha disponerats så att jämförelser mellan de olika teknologierna lätt kan göras i fråga om t.ex. enskilda egenskaper.

1.4 METOD

Metodmässigt bygger rapporten främst på litteraturstudier inom de ämnen som behandlas i rapporten. Dessutom har intervjuer genomförts med forskarstuderande och doktorander med kunskap inom området kraftvärmeteknologi. Den skriftliga och muntliga informationen har sedan sammanställts och jämförts för att bilda ett aktuellt och brett faktamaterial. Rapporten består även bitvis av egna tolkningar och kommentarer. Avslutningsvis delges egna funderingar och slutsatser om de olika kraftvärmeteknologierna.

1.5 AVGRÄNSNINGAR

Rapporten avgränsas till att behandla de kraftvärmeteknologier som anses vara intressanta och lämpliga för den svenska kraftvärmemarknaden. De teknologier som behandlas är tidigare givna för uppdraget som står till grund för denna rapport.

För varje kraftvärmeteknologi presenteras dess specifika egenskaper. I den mån litteratur och tillgänglig information tillåter presenteras även egenskaper för särskilda kraftvärmeanläggningar och kraftvärmekomponenter från en viss tillverkare.

De bränslen som valts att studera är sådana som anses vara aktuella vid nybyggnation av kraftvärmeanläggningar i Sverige.

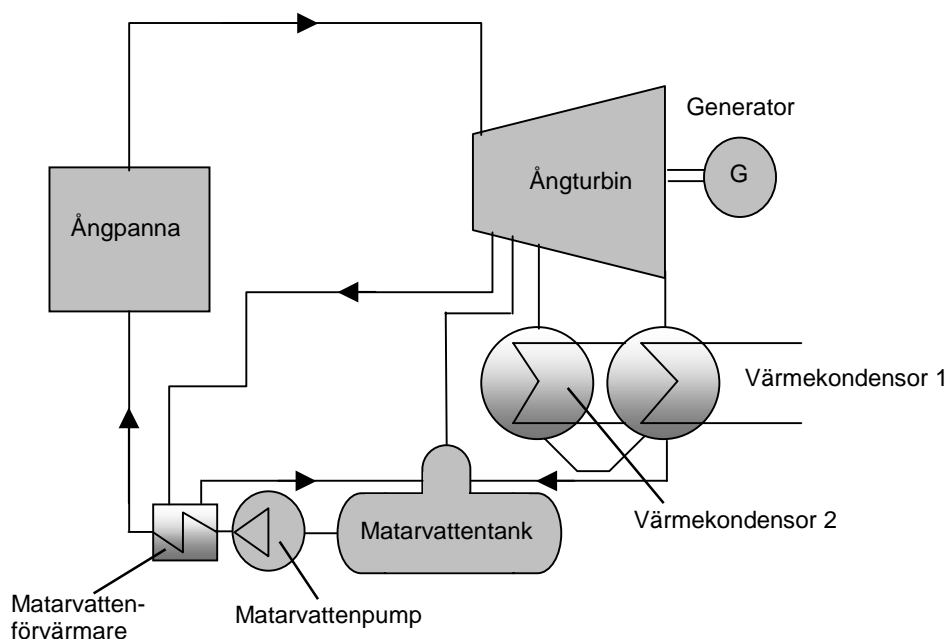
2 ÅNGPANNA MED ÅNGTURBIN

2.1 TEKNISK BESKRIVNING

2.1.1 Avtappningsturbin

I en anläggning med ångpanna och ångturbin kan både el och värme produceras. I ångpannan förångas det inmatade vattnet till torr mättad ånga med högt tryck. Ångan leds vidare till en ångturbin, där el genereras. Inne i ångturbinen avtappas ånga vid olika steg. Detta med syftet att bl.a. förvärma matarvattnet vid olika steg, hålla rätt tryck i matarvattentanken samt förvärma i "värmekondensator 2" (se figur 2.1). På så sätt höjs verkningsgraden för hela anläggningen.

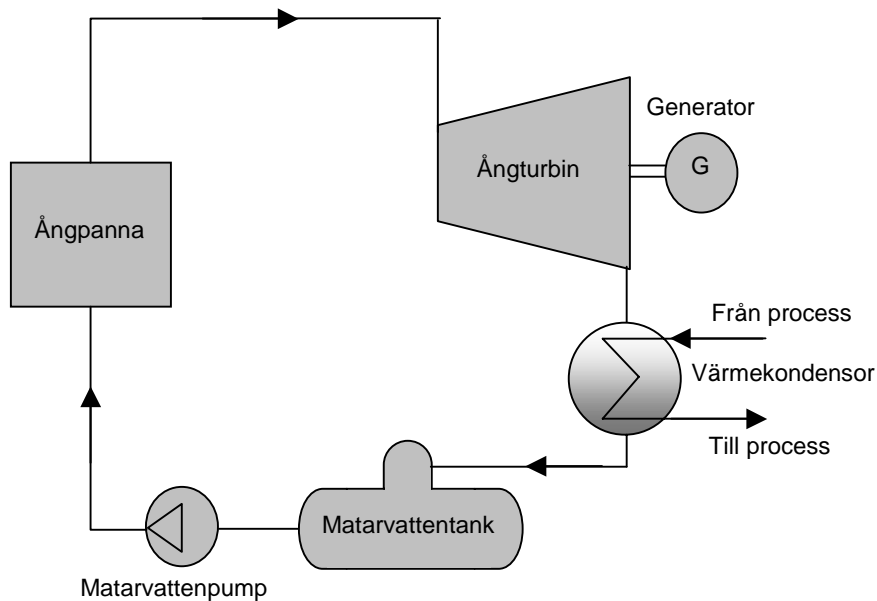
Då ångan passerat genom ångturbinen har den expanderat och ett arbete har utförts. Ångan lämnar ångturbinen i fuktigt tillstånd och leds till "värmekondensator 1" (se figur 2.1) där ångan/kondensatet från ångturbinen växlas mot en annan process, t.ex. mot vatten i ett fjärrvärmenät. Kondensatet leds vidare till matarvattentanken. I matarvattentanken hålls ett visst övertryck för att kunna avgasa eventuella lösta gaser i matarvattnet. Efter matarvattentanken är matarvattenpumpen placerad. Dess uppgift är att pumpa matarvattnet genom matarvattenförvärmaren och vidare till ångpannan, samtidigt som den ska höja trycket på matarvattnet till ett för pannan lämpligt tryck.



Figur 2.1 Ångturbinanläggning med avtappningsturbin

2.1.2 Mottrycksturbin

En anläggning med mottrycksturbin är i stort sett uppbyggd på samma sätt som anläggningen med avtappningsturbin. Det som skiljer de båda anläggningarna åt är just turbinerna. I en mottrycksturbin avtappas inte ånga från olika punkter i turbinen, utan ångans expansion avbryts vid ett högre tryck, vilket skall motsvara värmebehovet i en viss process. Huvudändamålet för denna typ av anläggning är att täcka det specificerade behovet för den specifika processen. Enkel principskiss kan ses i figur 2.2.



Figur 2.2 Ångturbinanläggning med mottrycksturbin



Figur 2.3 Rotor från en ångturbin

2.1.3 Ångpannan

Det finns olika typer av ångpannor. Då i princip vilket bränsle som helst kan användas vid generering av ånga till ångturbinen, är det pannan som sätter begränsningarna. I gaspannor förbränns vanligen naturgas, i oljepannor eldningsolja och i fastbränslepannor vanligtvis biobränslen.

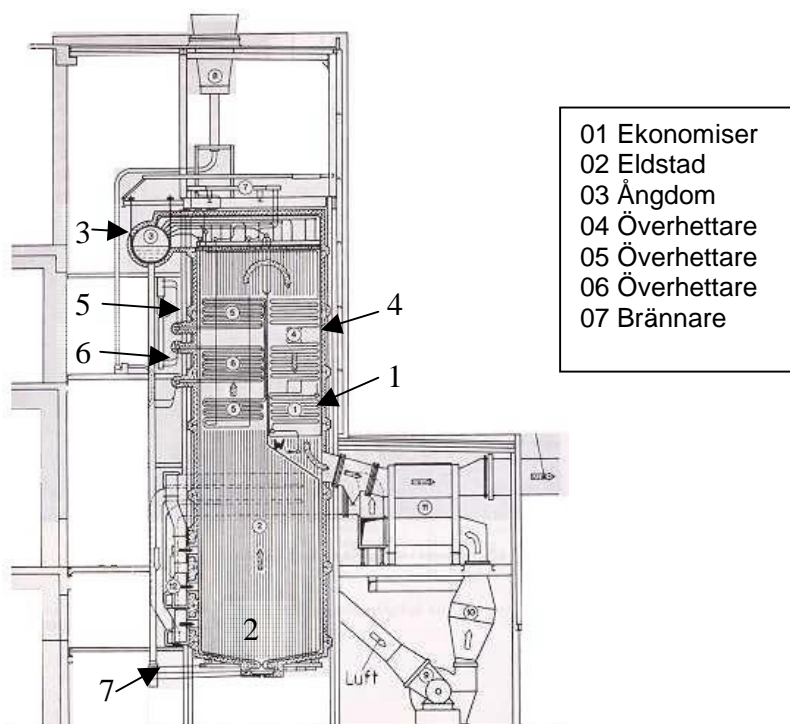
Olje- och gaspannor

För olje- och gaspannor som fungerar som ångpanna är det inte vanligt att effekten understiger 1 MW [19]. För effekter upp till cirka 10 MW går det att köpa standardbrännare komplett med fläkt och reglerutrustning. Effekter från 10–40 MW kräver ofta specialbyggda brännare som kunden själv får kombinera med lämplig fläkt och reglerutrustning.

I stora olje- och gaspannor är brännaren vanligtvis placerad centralt i den cylinderformade pannan. Rökgaserna växlas mot vatten som cirkulerar i tuber placerade runt brännaren. Se figur 2.4-1 och 2.4-2 för genomskärning av gas-/oljepanna.



Figur 2.4-1 Trestråks gas-/oljepanna för produktion av lågtrycksånga eller hetvatten, $P_{bränsle} < 15 \text{ MW}$



Figur 2.4-2 Själv-cirkulationsångpanna

Fastbränslepannor

Allmänt för fastbränslepannor är att bränslet, till skillnad från vid olje- och gaspannor, tillförs i fast form och förgasas. Fastbränslepannor delas upp i tre olika typer enligt följande:

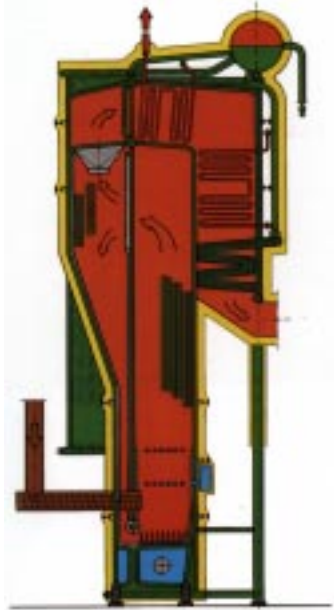
- Rostpannor
- Fluidbäddspannor
- Pannor med brännare (pulverpannor)

I rostpannor ligger bränslet på en rost där förbränningsluften tillförs genom rost och bränsle. Används idag vid förbränning av bland annat avfall. Figur 2.5 visar genomskärning på förugnen till en rostpanna.

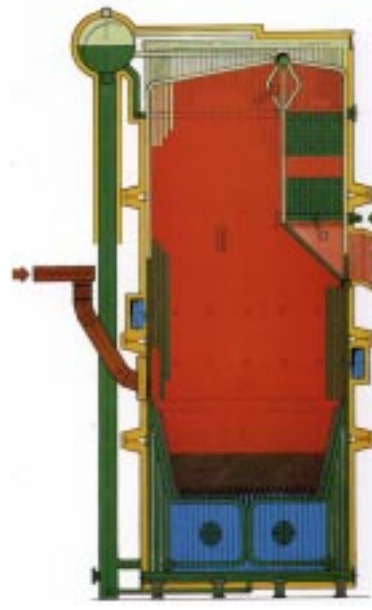


Figur 2.5 Genomskärning av förugn till rostpanna [68]

Fluidbäddspannor kan antingen vara av typen cirkulerande fluidiserande bädd (CFB) eller bubblande fluidiserande bädd (BFB). I figur 2.6 och 2.7 kan principskisser av fluidbäddspannor ses.



Figur 2.6 Genomsnitt av CFB



Figur 2.7 Genomsnitt av BFB

Pannor med brännare, eller s.k. pulverpannor, kan användas tillsammans med förädlade träbränslen, t.ex. pellets eller träpulver. Träpulver kan eldas direkt i brännaren. Om pellets ska kunna eldas i brännaren måste brännaren själv kunna sönderdela bränslet. Likaså kan en kvarn användas för att mala sönder bränslet.

2.2 TOTALVERKNINGSGRAD OCH ALFAVÄRDE

I genomsnitt ligger elverkningsgraden, η_{el} , mellan 20 och 30 %. Värmeverkningsgraden, $\eta_{värme}$, ligger oftast kring 50–65 %. Detta ger normalt en totalverkningsgrad på 80–85 %, beroende på pannverkningsgrad, övriga förluster och anläggningens storlek. Elutbytet eller alfavärdet ($\eta_{el}/\eta_{värme}$) brukar i snitt ligga kring 0,4–0,5 [19] I tabell 2.2 ligger snittet för α -värdet på 0,42 för de anläggningar som räknas upp.

Tabell 2.1 Verkningsgrader och alfavärde för ångturbinanläggningar

	η_{el}	$\eta_{värme}$	η_{total}	α -värde
Ångturbinanläggning	20–30 %	50–65 %	80–85 %	0,4–0,5

Tabell 2.2 Alfavärden för olika anläggningar [67, 77]

Anläggning	Eleffekt [MW _{el}]	Värmeeffekt [MW _{värme}]	Bränsletyp	Ångpanna	Alfavärde (α)
Lommaverket	4,3	11,4	Trä-/papperspill	Fluidbädd	0,38
Kuhmon Lämpö, Finland	5,1	13,0	Sågverksavfall	Fluidbädd	0,39
Kankaanpää, Finland	6,0	17,0	Torv	Fluidbädd	0,35
Vieska Energia, Finland	6,3	17,0		Fluidbädd	0,37
AB Falu Elverk	9,0	20,0	Bark/trä/flis	Fluidbädd	0,45
Pieksämäen Energia, Finland	9,4	26,0	Torv	Fluidbädd	0,36
Härnösand kraftvärmeverk	11,7	25,9	Biobränsle		0,45
Skellefteå Kraft	35,6	64,0	Skogsbränsle	Fluidbädd	0,56
Eskilstuna Energi & Miljö	37,0	70,0	Skogsbränsle	Fluidbädd	0,53
Heleneholmsverket, Malmö	130,0	400,0	Naturgas	Gaspanna	0,33

2.2.1 Kondenserande rökgaskylare

I en kondenserande rökgaskylare, eller rökgaskondensator, kyls rökgaserna ned så att vattenånga i avgaserna kondenserar. Rökgaskondensatorn kan med fördel användas för att ytterligare höja totalverkningsgraden på en anläggning. Denna höjning kan ge totalverkningsgrader på i princip över 100 %. Detta är möjligt genom att förvärma returvattnet från fjärrvärmesystemet i rökgaskondensatorn för att sedan slutvärma i själva pannan. Denna rökgaskondensator är lämplig att använda då pannorna eldas med bränslen med hög vatten- eller vätehalt, t.ex. träbränslen, torv, avfall och naturgas.

Exempel på hur rökgaskondensatorn påverkar totalverkningsgraden i en ångturbinanläggning kan ses i tabell 2.3.

Tabell 2.3 Data och totalverkningsgrad för ångturbinanläggning med rökgaskondensator [48]

Anläggning	Värmeeffekt utan rökgaskondensator	Värmeeffekt med rökgaskondensator	Totalverkningsgrad utan rökgaskondensator	Totalverkningsgrad Med rökgaskondensator
Eskilstuna kraftvärmeverk	70,7 MW	95,4 MW	88,5 %	109 %

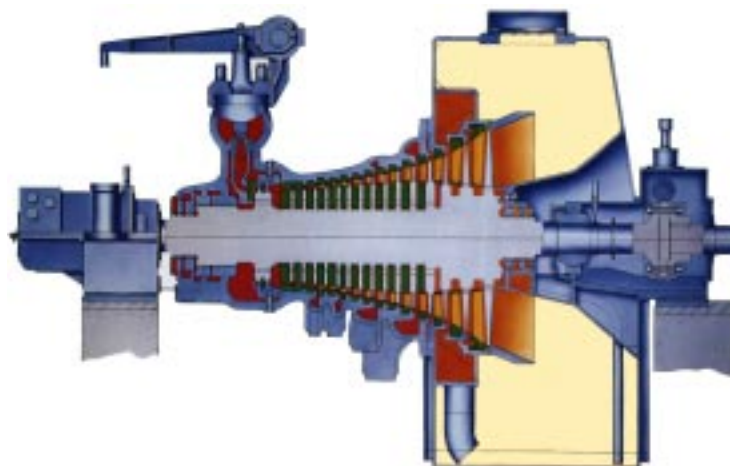
2.3 TEKNISK MOGNAD

Ångpanna med ångturbin är en välbeprövad teknik med mer än 100 års drift- och utvecklingserfarenheter och kan anses vara en tekniskt mogen kraftvärmeteknologi.

2.4 UTVECKLINGSTENDENSER

Med många års drifterfarenhet av dessa typer av anläggningar finns det inget direkt utvecklingsbehov. Ändå pågår det ständigt forskning och utveckling av tekniken. Denna forskning och utveckling inriktar sig främst på ångturbin teknik och på att höja totalverkningsgraden på anläggningen. Ångcykelns elverkningsgrad kan höjas genom högre ångdata, dvs. högre ångtemperatur och ångtryck. För att kunna höja ångdata för en anläggning ställs höga krav på materialens hållfasthet och korrosionstålighet. En stor del av utvecklingen ligger därmed vid test och utveckling av nya tänkbara material i ångturbinen och dess kringkomponenter.

Förbränning av avfall kommer uppskattningsvis att öka inom den närmsta tiden. Detta beror framförallt på de nya lagar som reglerar avfallsdeponering. Avfallsförbränningen beräknas därmed få större uppmärksamhet, vilket kommer att innebära att mer kraft läggs på utveckling av avfallsförbränningsteknik. Bland annat kan nämnas att den traditionella tekniken som används i rostpannor idag utvecklas och förbättras kontinuerligt. Även en ny generation fluidbäddspannor är på gång vilka kan bli ett alternativ till rostpannorna vid avfallsförbränningen. Fluidbäddspannorna ställer däremot krav på att avfallet sorteras och mals innan förbränning.



Figur 2.8 Genomskäring av ångturbin

Nyligen har Statens Energimyndighet (STEM) beviljat stöd till Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm för utvecklingen av effektiva små ångturbiner för mindre anläggningar. STEM har funnit projektet intressant framförallt då det finns krav på högre elverkningsgrader och lägre utsläpp av skadliga avgaser och mot en bakgrund av att de små ångturbinerna är en viktig beståndsdel i ett uthålligt energisystem. [79]

En annan utvecklingstendens är att göra så tekniken klarar av de allt hårdare ekonomiska kraven. Vidare forskas det mycket i hur olika typer av bränsle kan varieras för att uppnå bästa tänkbara lönsamhet.

2.5 DRIFT- OCH REGLEREGENSKAPER

Dellastegenskaperna för ångpanna med ångturbin är tillfredsställande ner till omkring 10 % av fullast. I regel är det ångturbinen som begränsar hur långt ner lasten kan regleras, men det är även beroende på vilket bränsle som används. För att exemplifiera hur ångpannan och ångturbinen förhåller sig till varandra kan nämnas att en biobränsleeldad panna kan regleras ned till ungefär 25 % last. Detta borde vanligtvis i sin tur motsvara ca 15 % last på ångturbinen.

Då avfall används som bränsle är det oftast tvärt om, dvs. då är det i regel avfallsförbränningspannan som begränsar hur långt ner lasten kan regleras utan att påverka verkningsgrader och förbränningsegenskaper nämnvärt. Detta beror framförallt på att förbränning av avfall ställer stora krav på specifika temperaturnivåer i eldstaden.

2.6 BRÄNSLEN OCH BRÄNSLEKRAV

Praktiskt taget kan alla bränslen användas för att producera ånga till en ångturbin. Biobränslen och avfall är de mest använda bränslena i Sverige idag, men även naturgas och olja används som bränsle i ångturbinanläggningar. Det är framförallt förbränning av avfall som ställer de stora kraven. Här måste avfallet blandas om för att få ett mer homogent bränsle innan förbränning. Annars kan avfallet ha väldigt stora variationer i egenskap av fukthalt, vilket i sin tur påverkar bränslets värmevärde.

2.7 MILJÖEGENSKAPER

Miljöegenskaperna från en ångturbinanläggning är i stort beroende av vilken typ av bränsle som används. Följande tabeller (tabell 2.4–2.6) visar utsläpp från anläggningar där naturgas, eldningsolja, biobränslen samt avfall förbränns.

Typiska emissionsvärden från nya större förbränningsanläggningar, vanligt förekommande i ångcykler, presenteras i tabell 2.4.

Tabell 2.4 Utsläpp från större förbränningsanläggningar [6, 33]

Panntyp	NO _x [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	S [mg/MJ]	Stoft [mg/MJ]
Gaspannor 2–80 MW	30–60	13	< 0,2	0
Oljepannor Utan SCR eller SNR Med SCR eller SNR	100–150 < 50	15 15	100 100	15 15
Biobränslepannor Rost Pulver	40–300* 75–100*	< 30 < 15	10 10	< 15 < 15
Avfallspannor	50**	n.a.***	30	5

* Med SNR-rening sänks nivån till < 50 mg/MJ

** Med SNR-rening

*** Uppgifterna ej tillgängliga

I fluidbäddspannor förbränns fastbränslen. I tabell 2.5 ges en översikt av emissionsvärden vid förbränning av biobränslen i BFB- och CFB-pannor.

Tabell 2.5 Utsläpp från fluidbäddspannor vid förbränning av biobränslen [33]

Panntyp	NO _x [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	S [mg/MJ]	NH ₃ [mg/MJ]	N ₂ O [mg/MJ]	Stoft [mg/MJ]
BFB	80–100	< 90	10	-	10–15	< 15
BFB med SNR	< 50	< 90	10	2	10–15	< 15
CFB	50–70	< 90	10	-	< 15	< 15
CFB med SNR	< 50	< 90	10	2	< 15	< 15

I VärmeForsk-rapporten, *Teknikinventering av biobränsleeldade pannor 0,5-10 MW* [32], presenteras miljö- och utsläppsdata för ett urval mindre, svenska biobränsleeldade anläggningar. Snittet för NO_x-utsläppen vid de uppräknade anläggningarna i tabell 2.6 ligger på ca 72 mg/MJ. Snittet för stoftutsläppen från de biobränsleeldade anläggningarna ligger kring 76 mg/Nm³.

Tabell 2.6 Anläggnings- och utsläppsdata för bibränsleeldade anläggningar [32]

Panneffekt [MW]	Bränsletyp*	Syrehalt	η_{panna}	NO _x [mg/MJ]	Stoft mg/m ³ n
1,0	F, P, B	6,5 %	89,5 %	85	100
2,7	P	5,3 %	90 %	59	99
3,2	B	6,7 %	91,4 %	51	54
3,2	B	5,2 %	91,4 %	50,8	54
4,0	F			120	150
4,2	R	5,7 %	90,4 %	56	28
5,1	S	6,1 %	88 %	50	94
5,7	F	5,2 %	85 %	37	16
8,0	S			115	50
15,0	BA, S	5,8 %		100	118

* P = pellets, B = briketter, F = flis, S = sågverksbränsle, R = rivningsvirke, BA = bark

2.8 RENINGSUTRUSTNING FÖR ATT KLARA AV EMISSIONS-GRÄNSER

För att klara av de satta emissionsgränserna för förbränning vid energiproduktion (se kapitel 9.10) krävs det en viss typ av reningsutrustning, beroende på vilket bränsle som används. Vid förbränning av naturgas bildas det en viss del NO_x (tabell 2.4). Det är det dock inte ovanligt att anläggningen körs orenad. Detta då NO_x-bildningen vid nya anläggningar ofta är mycket låg. Ifall NO_x-rening förekommer, vid t.ex. äldre anläggningar, används antingen SCR- eller SNR-metoden. Dessa metoder beskrivs mer ingående i kapitel 8.4.2.

Ifall eldningsolja används som bränsle krävs det extern reningsutrustning för både svavel och NO_x. Svavelrening, s.k. avsvavling, sker för eldningsolja med antingen våt- eller våt-torr metod (se kapitel 8.4.1). NO_x-reduktion sker med SCR- eller SNR-metoden.

Biobränslen behöver mer krävande reningsutrustning för att klara av dagens emissionsgränser (se kapitel 9.10). Liksom för eldningsolja krävs rening av NO_x och svavel. NO_x-rening sker med antingen SCR- eller SNR-metoden. Avsvavling sker antingen genom torr, våt-torr eller våt metod. Dessutom krävs även stoftrening. Denna stoftrening beskrivs närmare i kapitel 8.2.

Förbränning av avfall kräver den mest avancerade reningstekniken. Det är avfall, som bränsle, som har flest miljökrav att uppfylla. I kapitel 8.4.4 beskrivs hur reningsutrustningen på ett avfallseldat kraftvärmeverk kan se ut idag.

2.8.1 Kondenserande rökgaskylare

Som nämnts tidigare kan en kondenserande rökgaskylare medverka till att anläggningens totalverkningsgrad ökar. Rökgaskondensering bidrar även till att minska utsläppen av luftburna föroreningar, eftersom en del av dessa löses i kondensatet. Reduktionen av stoft, tungmetaller och organiska föreningar ligger i storleksordningen 40–80 %. Motsvarande siffror för svaveldioxid är 10–30 %. [42]

2.9 BEMANNINGSKRAV

Bemanningskravet är beroende på anläggningens säkerhet och i hög grad på dess komplexitet. Det finns ångturbinanläggningar som är godkända för obemannad drift, bland annat Lommaverket i Skåne. För andra anläggningar, t.ex. avfallsförbränningsanläggningar är bemanning nödvändigt, framförallt då avfallet blandas om och lastas manuellt. Däremot varierar tidsintervallen för bemanningen.

Används naturgas eller olja som bränsle är anläggningarna ofta mindre komplexa och kräver i regel mindre bemanning än då t.ex. biobränslen, som kräver en mer komplex anläggning, används. De biobränsleeldade anläggningarna automatiseras allt mer idag och kräver därmed inte lika stor bemanning som tidigare.

2.10 SPECIFIK INVESTERINGSKOSTNAD

Den specifika investeringskostnaden för en kraftvärmeanläggning med ångpanna och ångturbin varierar efter vilket bränsle som används. Specifik investeringskostnad för ångturbinanläggning inkl. naturgas- eller oljepanna ligger i runda tal runt 10 000–11 000 kr/kW_e [6, 41].

Biobränsleeldade anläggningar kräver en något högre investering, då fastbränslepannor är dyrare än gas- och oljepannor. Beroende på anläggningens storlek ligger investeringskostnaden för en biobränsleeldad ångturbinanläggning mellan ca 15 000 och 20 000 kr/kW_e (se tabell 2.7) [6].

Avfallsförbränningsanläggningar kräver betydligt större investeringar. Som exempel kan användas Sysavs nya anläggning i Malmö som beräknas tas i drift under början av 2003. Storleken på den nya anläggningen beräknas vara 16 MW_e och 65 MW_v. Anläggningen beräknas kosta drygt 800 Mkr. Detta kan räknas om till en specifik investeringskostnad på ca 50 000 kr/kW_e [41, 59]. I tabell 2.7 presenteras ytterligare specifika investeringskostnader.

Tabell 2.7 Specifik investeringskostnad för ångcykler med olika bränslen [6, 41, 59]

Anläggningstyp	Eleffekt [MW _e]	Specifik investeringskostnad* [kr/kW _e]
Naturgas	10–100	10 000–11 000
Biobränsle	10	19 100
Biobränsle	30	14 500
Avfall	16	50 000**
Avfall	30	40 000

* Specifik investeringskostnad anges här för hela anläggningen

** Kostnaden inkluderar reningsutrustning

2.11 DRIFT- OCH UNDERHÅLLSKOSTNADER

Drift- och underhållskostnaderna är i stort beroende på vilket bränsle som används. Ju mer homogent bränsle som används desto lägre blir underhållskostnaderna för anläggningen och desto färre driftpersonal krävs vid anläggningen. Detta innebär att om naturgas eller olja används krävs det relativt enkla system och dessa blir förhållandevis billiga att underhålla. Om avfall används krävs mer avancerade kringssystem, vilka blir förhållandevis kostsamma att underhålla.

Generellt för alla ångturbinanläggningar är att den fasta drift- och underhållskostnaden ligger kring 2 % av den specifika investeringskostnaden per år. [6, 41]

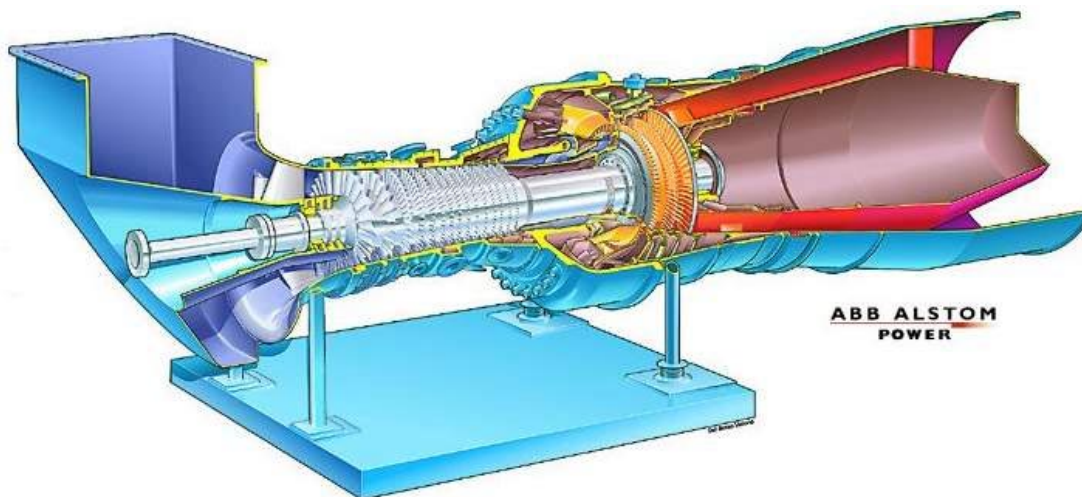
3 GASTURBIN MED AVGASPANNA

3.1 TEKNISK BESKRIVNING

3.1.1 Gasturbin

Det finns idag två olika huvudkategorier av gasturbiner. Dessa är flygderivat och industriella turbiner. Kännetecknen för ett flygderivat är att de har en lätt konstruktion, täta serviceintervaller och en hög verkningsgrad. Flygderivaten utnyttjas för små system eftersom de även är väldigt snabbstartade samt att gamla enheter snabbt kan ersättas med nya. De största flygderivaten ligger i effektområdet 45 MW_e med ca 40 % elverkningsgrad.

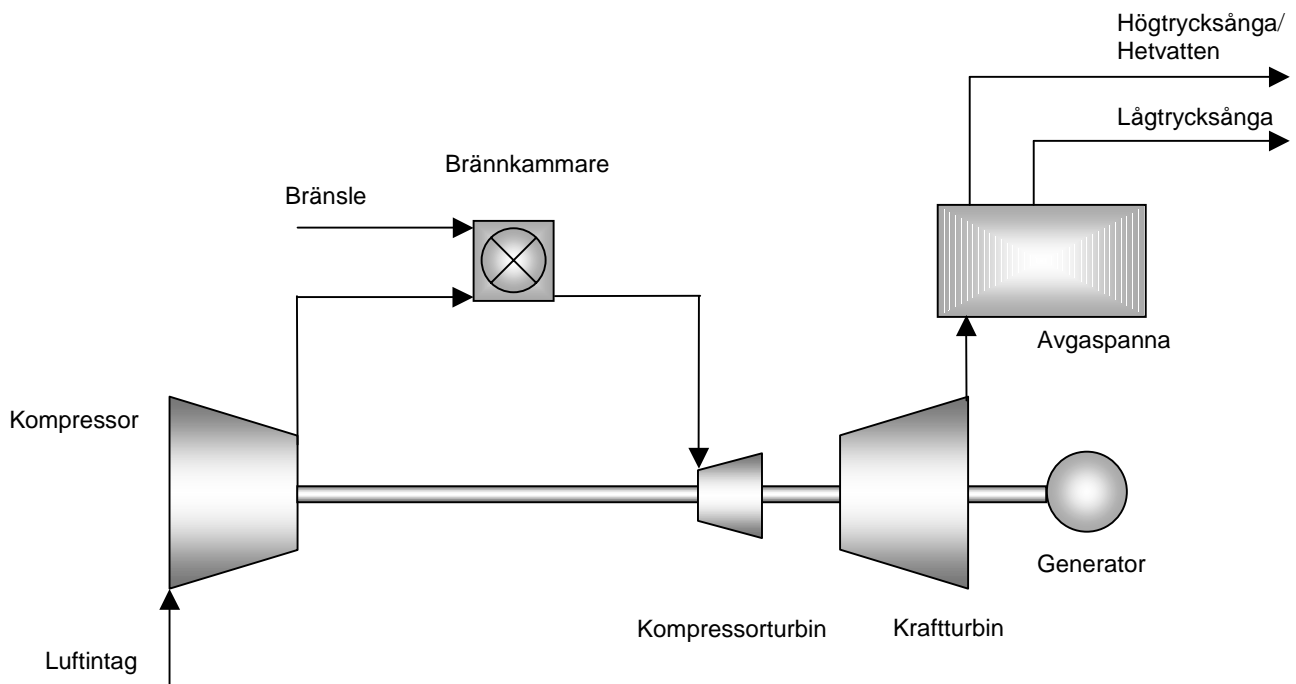
De industriella gasturbinerna kännetecknas av en lägre temperaturnivå, robustare konstruktion, längre serviceintervaller och mer toleranta mot tyngre (tjockare) oljebränslen. Det finns idag gasturbiner i storleksklassen från mikroturbiner på ca 30 kW_e till turbiner på 300 MW_e.



Figur 3.1 Genomsnitt av Alstoms GTX100

Gasturbiner har länge använts till spetslast- och reservkraftverk, men har under senare år även börjat användas till att producera både elkraft och värme, s.k. cogeneration, samt i kombianläggningar där gasturbiner kombineras med ångcykler. Istället för att, som i en öppen eller enkel gasturbincykel, släppa ut avgaserna direkt i luften via en skorsten utnyttjas energin i avgaserna för cogeneration och kombianläggningar genom att använda en värme- eller ångpanna (avgaspanna).

I figur 3.2 visas ett principschema för en gasturbin med avgaspanna som producerar högtrycks- respektive lågtrycksånga eller enbart hetvatten till t.ex. fjärrvärme.



Figur 3.2 Gasturbin med avgaspanna

Gasturbinen's prestanda, hög verkningsgrad och stor specifik effekt, beror på en rad olika komponenter. God prestanda fås huvudsakligen genom att

- kompressorn och turbinen har goda verkningsgrader
- hög Turbine Inlet Temperature (TIT)
- kompressorns tryckförhållande är högt

Av dessa berörs kompressorn av det först- och det sistnämnda, brännkammaren av det andra och turbinen av de två första. Gasturbinen's huvudkomponenter består således av en kompressor, brännkammare, turbin och en generator. Här följer en kort beskrivning av dessa komponenter.

Luftintag och kompressor

Kompressorns uppgift är att höja trycket på den inkommande förbränningsluften innan den kommer in i brännkammaren. Tryckhöjningen måste ske i många steg för att få en bra effektivitet. En låg temperatur på ingående luft gör att ett större luftflöde kan strömma genom kompressorn, vilket leder till ett lägre specifikt kompressorarbete. Två typer av turbokompressorer finns, axial- och radialkompressorer. Det som skiljer dessa från varandra är vilken strömningsriktning det komprimerade mediet har. De allra flesta stationära gasturbiner använder sig av axialkompressorer. Det är även viktigt att luftintaget förses med en filteringsanläggning om luften kan föra med sig sand eller andra partiklar. Om inte detta görs kan partiklarna blockera kylkanalerna i gasturbinen's skovlar, vilket kan medföra att skovlarna kan förstöras efter någon timmes drift.

Brännkammare

När luften har trycksatts till 15–25 bar, tillförs den till brännkammaren tillsammans med bränslet, som även det har trycksatts till samma tryck som förbränningsluften. Blandningen av bränslet och luften förbränns tillsammans i brännkammaren. Temperaturen brukar ligga mellan 900–1100°C i utloppet från brännkammaren. [19]

Kompressorturbin och kraftturbin

Efter brännkammaren expanderar avgaserna ned till atmosfärstryck och energin omvandlas till mekanisk energi, där de första turbinstegen används för att driva kompressorn och de sista stegen driver generatoren. När avgaserna lämnar kraftturbinen har de en temperatur på 400–650°C. [19]

3.1.2 Avgaspanna

För att höja verkningsgraden för den totala processen kan en avgaspanna anslutas och kopplas till gasturbinens utlopp för förbränningsgaserna. Avgaspannan kan utformas på en rad olika sätt. Den kan användas för att producera hetvatten eller för att producera ånga. Då ånga produceras kallas avgaspannan för HRSG (Heat Recovery Steam Generator). Ångan kan plockas ut vid olika tryck, där de höga temperaturerna på avgaserna begränsar ångtrycket. Högtrycksångan kan användas till att driva en ångturbin för ytterligare elgenerering. Den resterande energin i ångan kan vidare kondenseras i värmekondensator och växlas mot exempelvis fjärrvärmenätet. Ångan kan även tappas av till olika ångledningar till en process.

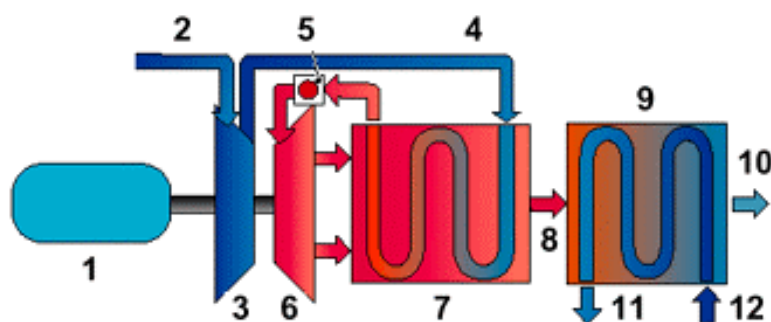
Högtryckspannan kan i sin tur utformas till en entrycks-, tvåtrycks- eller tretryckspanna. Fördelen med flera trycknivåer är att värmen kan återvinnas effektivare med en högre genomsnittstemperatur, vilket gör att t.ex. energiutbytet blir 3–6 % högre med en tvåtryckspanna än med en entryckspanna. [19]

3.1.3 Mikroturbiner

Mikroturbiner, som alternativ till småskalig kraftvärmeproduktion i t.ex. flerbostadshus, är i utvecklings- och driftprovstadiet.

En mikroturbin är en maskin som befinner sig i effektområdet 25–500 kW_e [42]. Dess funktion är huvudsakligen att producera el. Det finns även mikroturbiner som är byggda för samtidig el- och värmeproduktion. Ett bra exempel på en sådan turbin är det svenska företaget Turbecs mikroturbin T100. Den är en enaxlad konstruktion med luftkompressor, gasturbin och generator på samma axel.

Figur 3.3 visar en skiss av Turbecs mikroturbin. Luften sugas in i kompressorn och komprimeras till önskat tryck. Då luften komprimerats går den genom en förvärmare, en s.k. rekuperator, där luften förvärms med hjälp av utgående rökgaser innan den går in i brännkammaren för att blandas med bränslet och förbränns. Efter brännkammaren expanderar rökgaserna genom turbinen och utför därmed ett arbete. Generatoren omvandlar rörelseenergin till elenergi. De heta avgaserna passerar genom rekuperatorn och vidare genom en värmeväxlare där uppvärmning av vatten sker (till t.ex. när- eller fjärrvärme).



1. Generator
2. Luftintag
3. Kompressor
4. Luft till förvärmare
5. Brännkammare
6. Turbin
7. Rekuperator
8. Avgaser
9. Värmeväxlare
10. Avgasutlopp
11. Varmvattenutlopp
12. Vatteninlopp

Figur 3.3 Mikroturbin med rekuperator [61]

Även företaget Capstone har byggt en mikroturbin, Model 330, för samtidig produktion av el och värme. Denna turbin har en uteffekt på 30 kW_e men Capstone har tagit fram ett system som gör det möjligt att koppla ihop upp till tio stycken mikroturbiner till en enda enhet och kan därigenom uppnå en uteffekt på 300 kW_e.

3.2 TOTALVERKNINGSGRAD OCH ALFAVÄRDE

Verkningsgraden för gasturbinen varierar med storleken och ökar ju större effekt gasturbinen har. Utnyttjas värmen i avgaserna ökas totalverkningsgraderna avsevärt. Elverkningsgraden för de mindre gasturbinerna i storleksklassen upp till 1–6 MW kan generellt sägas vara mellan 25–35 %. För högre effekter kan elverkningsgraden överstiga 40 %. Nedan, i tabell 3.1, visas verkningsgrader för ett par olika gasturbiner från olika tillverkare. För samtliga turbiner gäller att naturgas används som bränsle. Används olja som bränsle sjunker verkningsgraden med någon procentenhet.

Tabell 3.1 Data, verkningsgrader och alfavärde för olika gasturbiner [39, 40, 53, 62, 70]

Tillverkare	Typ	Bränsleeffekt [MW _{bränsle}]	Eleffekt [MW _{el}]	Värmeeffekt [MW _{värme}]	η_{el} [%]	$\eta_{värme}$ [%]	η_{total} [%]	α -värde
Solar	Saturn 20	4,9	1,2	2,85	24,5	58	82,5	0,42
Centrax	501-KB3	10,6	2,6	6,6	24,3	62	86,3	0,39
Centrax	501-KB5	13,5	3,8	7,8	28,3	58,1	86,4	0,49
Centrax	501-KB7	16,7	5,1	9,3	30,5	56	86,5	0,54
Solar	Mars 90	29,4	9,3	15,5	31,6	53	84,6	0,6
ABB-Alstom	GT10		24,6		34,2			
Rolls-Royce	RB211-6761	78,5	29,9	40	38,1	51	80,9	0,74
ABB-Alstom	GTX100		43		37			
Rolls-Royce	Trent	123,6	51,4	46,6	41,6	37,7	79,3	1,1
Siemens	V 64.3		63*		35,2*			

* Växelförluster är inräknade

I tabell 3.2 presenteras data, såsom effekter, verkningsgrader och alfavärde för Turbecs T100.

Tabell 3.2 Data för Turbec T100 [61]

	Bränsleeffekt [kW _{br}]	Eleffekt [kW _e]	Värmeeffekt [kW _v]	η_{el}	$\eta_{värme}$	η_{total}	α -värde [$\eta_{el}/\eta_{värme}$]
Turbec T100	333	100	167	30 %	50 %	80 %	0,60

3.3 TEKNISK MOGNAD

1939 togs den första industriella gasturbinen i drift. Denna turbin hade en uteffekt på 4 MW och en elverkningsgrad på 17,4 %. Sedan dess har gasturbinen utvecklats och efter att mest ha använts som reservkraft har gasturbinen i dagsläget utvecklats till en ledande kraft(värme)teknologi. Det finns idag en rad olika aktörer på marknaden och dessa jobbar mycket med att förbättra gasturbinernas prestanda och miljöegenskaper. Många av dem samarbetar med varandra, små- eller storskaligt och de jobbar även tillsammans med näringsliv och högskolor för att hitta den bästa tekniska lösningen och möjligheten till att hela tiden förbättra sig inom området.

3.4 UTVECKLINGSTENDENSER

För att göra förbättringar och höja verkningsgraden på gasturbincykeln görs idag många insatser av tillverkare inom alla de områden som berör gasturbinen. Till exempel kan det vara nya skovelmaterial, effektivare skovelkylning, förbättrad förbränningsteknik, högre inloppstemperatur till turbinen och högre kompressionsförhållanden.

I USA pågår ett utvecklingsprogram som kallas för ATS (Advanced Turbine Systems). Detta initierades av USA:s Department of Energy (DOE) 1992. Tanken är att högskolor, naturgasdistributörer och gasturbintillverkare ska utveckla moderna gasturbinsystem som ska vara tillgängliga på marknaden år 2002. Målsättningen är att höja turbinverkningsgraden med 15 % i en enkel cykel för industriella applikationer och elverkningsgraden till över 60 % för en kombicykel. Samtidigt ska elproduktionskostnaden sänkas med 10 % och NO_x-emissionerna minska till mindre än 9 ppm (18 mg/Nm³). Även emissioner av CO och UHC ska sänkas till mindre än 20 ppm. Det bränsle som studeras är mestadels naturgas, men även studier med kol och biomassa förekommer. [2]

I ABB-Alstoms nya gasturbin GT24/26 används s.k. sekventiell förbränning, vilket har visat sig ge en högre verkningsgrad vid både full- och dellast. Vid sekventiell förbränning sker förbränningen i två separata brännkammare. Efter första brännkammaren har rökgasen en temperatur på ca 1 260°C och den expanderar sedan i den första delen av gasturbinen. Efter denna expansion värms avgaserna återigen till 1 260°C i den andra brännkammaren och avgaserna expanderar slutligen helt i gasturbinens sista steg. Detta har även visat sig ge lägre emissioner, en hög effekttäthet. Tack vare den låga ingångstemperaturen kan även redan beprövade skovelmaterial användas.

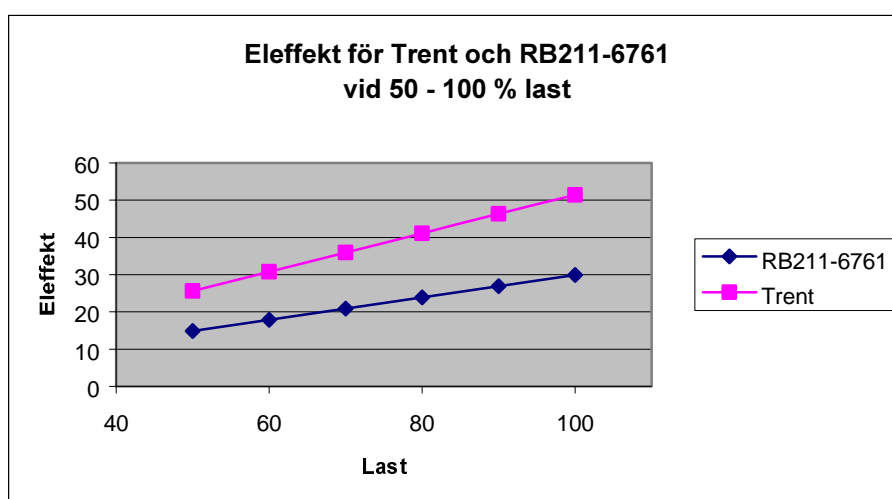
För att höja verkningsgraden på gasturbinen satsas det också mycket på att höja temperaturen innan turbinen, vilket leder till att en mer avancerad kylning av gasturbin-skovlarna krävs. Detta leder i sin tur till högre kostnader och den höjda verkningsgraden prioriteras oftast när bränslekostnaden är hög. Avancerad kylning tillsammans med bättre skovelmaterial, främst keramiska material, gör att inloppstemperaturen in till turbinen idag kan vara 1 350–1 400°C [42]. Här används luft från kompressorns olika steg används för att kyla skovlarna. Denna kylluftstemperatur är på grund av det höga kompressionstrycket för hög för att direkt kunna användas och utnyttjas därför till förvärmning av bränslet. Denna kylning leder till vissa förluster.

Om gasturbinen används i en kombianläggning kan istället ånga från ångprocessen användas till att kyla skovlarna.

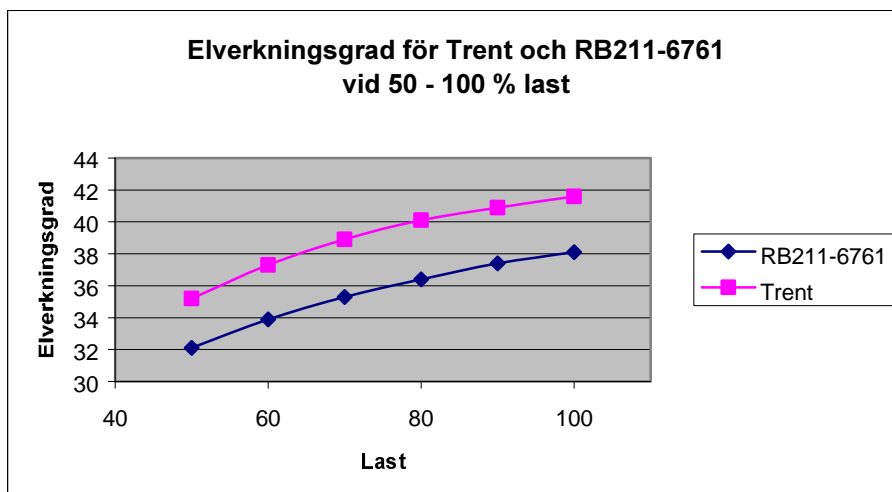
Vid Lunds Tekniska Högskola (LTH) pågår ett projekt kallat HAT-cykeln (Humid Air Turbine) där den trycksatta luften efter kompressorn befuktas genom en massiv insprutning av vatten i ett befuktningstorn innan den leds in i brännkammaren. Denna teknik har visat sig leda till en högre uteffekt och högre verkningsgrader. Pilotanläggningen är på 600 kW. En konceptstudie har visat att en elverkningsgrad på cirka 55 % och en totalverkningsgrad på cirka 94 % kan uppnås vid en anläggning i storleksordningen 60–80 MW.

3.5 DRIFT- OCH REGLEREGENSKAPER

En gasturbins prestanda förändras vid olika laster. I diagrammen nedan visas delastegenskaperna för två stycken gasturbiner, båda från Rolls-Royce. I figur 3.4, kan eleffekten utläsas för olika driftsfall och i figur 3.5 kan elverkningsgraden ses. För laster under 50 % fungerar inte gasturbiner tillfredsställande.



Figur 3.4 Eleffekt för olika driftsfall för två gasturbiner [39]



Figur 3.5 Elverkningsgrad för olika driftsfall för två gasturbiner [39]

3.6 BRÄNSLEN OCH BRÄNSLEKRAV

De bränslen som anses vara av betydelse i kraftvärmesammanhang är naturgas, lättolja och i vissa fall deponigas. Deponigas samkörs ofta med naturgas. Om naturgas används som bränsle krävs det ofta för de flesta gasturbiner att kompressorn höjer gastrycket till 30-40 bar, vilket medför en effektminskning totalt sett för gasturbinen.

3.7 MILJÖEGENSKAPER

Emissioner från gasturbiner varierar för olika turbiner. Storleksordningen på emissionerna kan bero på en rad olika faktorer såsom tillverkare, vilket bränsle som används och storleken på gasturbinen.

Tabell 3.3 Emissioner från olika gasturbiner [39, 42, 53, 62, 70]

Tillverkare	Typ	Bränsle	Eleffekt [MW _{el}]	NO _x [mg/MJ]	CO [mg/Nm ³]	UHC [mg/Nm ³]	Metan [mg/Nm ³]
Solar	Saturn 20	Gas	1,20	69	64	n.a.	-
Solar	Saturn 20	Olja	1,15	104	318	n.a.	n.a.
Solar	Titan 130	Gas	13,5	16	64	52	n.a.
Solar	Titan 130	Olja	12,2	50	64	52	-
Rolls-Royce	RB211-6761	Gas	29,9	<16	<30	<2	<1
Rolls-Royce	RB211-6761	Olja	29,9	<30	<180	<10	-
ABB-Alstom	GTX100	Gas	43,0	9	13	0,7	n.a.
ABB-Alstom	GTX100	Olja	41,4	13	19	2,1	-
Rolls-Royce	Trent	Gas	51,4	<16	<30	<2	<0,7
Siemens	V 64.3 A	Gas	67,0	22	<13	2,5	n.a.
Siemens	V 64.3 A	Olja	65,0	75	25	n.a.	-

n.a.= uppgift saknas

Anledningen till att Solars minsta turbin, som presenteras i tabell 3.3, har så höga emissionsvärden är att Solar inte använder någon reduceringsteknik på sina minsta gasturbiner. För sina större turbiner använder Solar sig av förbränningstekniken mager förbränning, vilken förklaras närmare i kapitel 3.8.1. Rolls-Royce använder sig av samma teknik, men med en annan konstruktion och ett annat namn. Detta gäller även för ABB-Alstom.

I tabell 3.4 presenteras garanterade emissionsdata från mikroturbinen, Turbec T100.

Tabell 3.4 Emissionsdata för Turbec T100 [61]

	NO _x [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	UHC* [mg/MJ]
Turbec T100	25,5	15,5	6

*UHC som CH₄-ekvivalenter

3.8 RENINGSUTRUSTNING FÖR ATT KLARA AV EMISSIONS-GRÄNSER

Reducering av emissionerna från gasturbinerna koncentreras mest till att minska utsläppen av kväveoxider, eftersom utsläpp av CO och oförbrända kolväten alltid varit relativt låga. Kväveutsläppen varierar för olika turbiner och storleken på gasturbinen har en viss betydelse för kväveutsläppen eftersom det läggs ner mer kraft på utveckling av större och dyrare gasturbiner. I regel är det dock brännkammarens konstruktion som bestämmer hur mycket kväveoxider som bildas. Leverantörerna satsar därför på nyare och bättre brännkammare till sina gasturbiner.

Det finns idag tre metoder för att minska emissionerna av kväveoxider. Dessa metoder är följande:

- Förbränningstekniska åtgärder
- Vatten- eller ånginsprutning
- Katalytisk rening av avgaserna.

3.8.1 Förbränningstekniska åtgärder

Den teknik som används idag kallas mager förbränning och skiljer sig lite beroende på vilket bränsle som används. Om bränslet är naturgas blandas denna och förbränningsluften till en homogen blandning. Då dieselolja används måste den först förångas. Genom att göra detta sänks temperaturen i flamman och NO_x-bildningen minskar kraftigt.

En annan metod som fortfarande är på utvecklingsstadiet är katalytisk förbränning. Här finns vissa problem och ett av dessa är att katalysatorn har för kort livslängd eftersom den lätt förgiftas om bränslet är förorenat. De tester som gjorts har dock visat att NO_x-utsläppen blir väldigt låga.

Ytterligare en metod som kan användas för att minska kväveoxidutsläppen är en tvåstegsförbränning (Rich Burn Quick Quench) där det första steget innebär att det kol och väte som finns i bränslet förbrukar allt syre vid förbränningen.

Därmed bildas ingen NO_x eftersom att kolet och vätet reagerar snabbare med syret. I detta första steg bildas istället mycket CO och oförbrända kolväten. I det andra steget sker en snabb nedkylning med hjälp av luft och sedan sker en slutförbränning med tillsats av ytterligare utspädningsluft.

3.8.2 Vatten- eller ånginsprutning

Förbränningen av bränslet sker vid en lägre temperatur än vad som är brukligt, vilket gör att NO_x -emissionerna får en reduktion på upp emot 80 %. Däremot ökar CO-halterna och utsläppen av oförbrända kolväten med en faktor 2 vid en vatten/bränsleknot på 1. Den termiska verkningsgraden skiljer sig beroende på vilken typ av insprutning som används. Vid vatteninsprutning fås en lägre verkningsgrad medan ånginsprutning ger en högre verkningsgrad om ångan genereras i en avgaspanna som är kopplad till turbinen. Båda teknikerna kräver en kondenserande rökgaskylare. [42]

3.8.3 Katalytisk rening

Tekniken katalytisk rening, eller SCR, förklaras närmare i kapitel 8.4.2.1. De katalysatorer som finns idag tål inte temperaturer högre än 300–400°C och avgastemperaturen från dagens gasturbiner är oftast högre. Avgaserna måste därför kylas och detta fungerar bäst där gasturbinen har en avgaspanna som kan kyla ner avgaserna.

3.9 BEMANNINGSKRAV

Mindre gasturbiner kräver oftast ingen bemanning, medan gasturbiner i större anläggningar, t.ex. kombianläggningar, övervakas från ett kontrollrum via en monitor.

3.10 SPECIFIK INVESTERINGSKOSTNAD

Investeringskostnaden för en gasturbin varierar naturligtvis från tillverkare till tillverkare, men för gasturbiner som är större än 1 MW_e är en specifik investeringskostnad på cirka 3 000 kr/kW_e och över rimlig. För gasturbiner under 1 MW_e är investeringskostnaden nästan den dubbla, alltså 6 000 kr/kW_e . I tabell 3.5 kan den specifika investeringskostnaden för några olika gasturbiner från olika tillverkare ses. Tabellen visar att den specifika investeringskostnaden sjunker efterhand som eleffekten stiger. Detta kan ses både för Rolls-Royce och ABB-Alstoms gasturbiner.

Tabell 3.5 Specifika investeringskostnad för olika gasturbiner [12, 39, 40, 41]

Tillverkare	Typ	Eleffekt [MW_e]	Investeringskostnad [kkr]	Specifik investeringskostnad [kr/kW_e]
Turbec	T100	0,1		6 000
Centrax		2,6-6,3		3 150-3 670
ABB-Alstom	EGT	7	20 000	2 860
ABB-Alstom	GT 35	15	85 000*	5 670*
ABB-Alstom	GT 10	24	120 000*	5 000*
Rolls-Royce	RB211-6761	30	99 750	3 330
Rolls-Royce	Trent	51,4	160 650	3 130

* Inklusive avgaspanna

I tabell 3.6 kan även specifika investeringskostnader för gasturbiner presenterade i *Cogeneration On-site Power Production* ses. Även här kan ses att investeringskostnaden sjunker.

Tabell 3.6 Specifik investeringskostnad för gasturbiner [42]

Eleffekt [MW _{el}]	Specifik investeringskostnad [kr/kW _e]
1–2	6 300–6 800
2–5	4 200–4 700
5–50	2 900–3 200
50–150	1 900–2 000
> 250	1 850–1 950

3.11 DRIFT OCH UNDERHÅLL

Mindre inspektioner av gasturbinerna sker i intervaller av 2 000 timmar medan större inspektioner sker i intervaller av 8 000 timmar. Efter cirka 30 000 timmar sker en översyn av kompressor- och kraftturbinen och efter 50 000–60 000 timmar sker en totalöversyn av hela gasturbinen, där den plockas ner helt och undersöks. [39, 40]

3.12 DRIFT- OCH UNDERHÅLLSKOSTNADER

Drift- och underhållskostnader för gasturbiner är svåra att ange och är beroende på i vilket sammanhang gasturbinen används. Fungerar den som reservkraft, vilket många gasturbiner gör i dagsläget, kommer underhållskostnaden säkert att vara lägre än för en gasturbin som är i drift en längre tid. För gasturbiner brukar en procentsats på 2–4 % per år av gasturbinanläggningens specifika investeringskostnad anges. [6, 41]

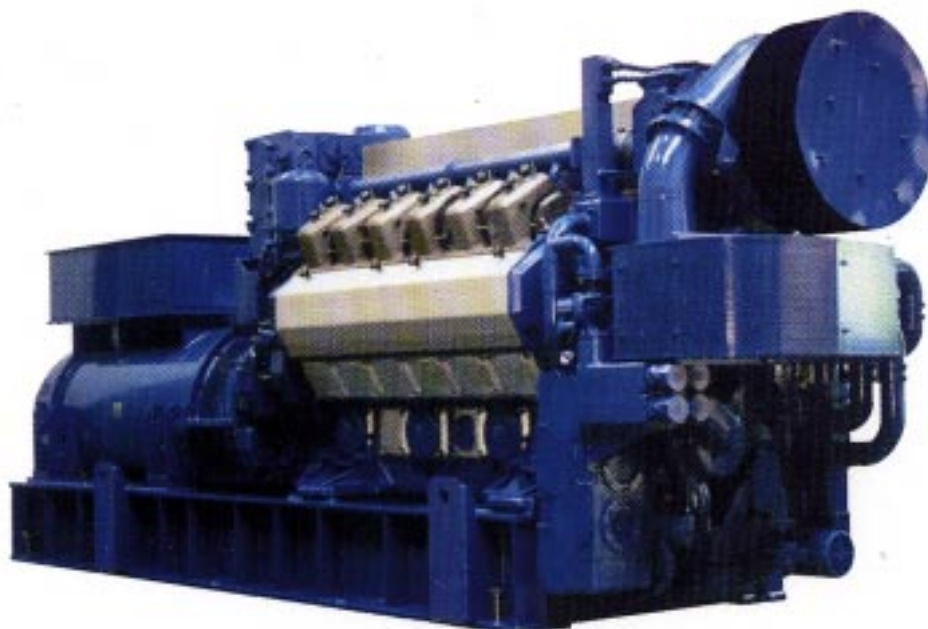
4 OTTO- OCH DIESELMOTORER

4.1 TEKNISK BESKRIVNING

Det finns två huvudtyper av förbränningsmotorer i kraftvärmesammanhang. Den första är ottomotor och används till mindre anläggningar med ett lägre effektbehov. Stationära ottomotorer brukar förekomma från 2 kW_e upp till 2 MW_e. Till större anläggningar med ett högre effektbehov används dieselmotorn och det finns dieselmotorer som klarar av att producera upp till 50 MW_e.

Den stora skillnaden mellan de båda motorerna är förbränningstekniken. I en ottomotor antänds en blandning av luft och bränsle med hjälp av ett tändstift. I en dieselmotor självantänds bränslet av den höga temperaturen på luften i cylindern när det sprutas in. Ottomotorns förbränningsteknik innebär en viss begränsning eftersom självantändning, knockning, inträffar om temperaturen blir för hög under kompressionen. Detta problem elimineras i dieselmotorn eftersom bränslet först tillförs vid förbränningstillfället. Den mekaniska verkningsgraden i en dieselmotor är normalt högre än i en ottomotor.

En kolvmotor kan konstrueras som en tvåtakts- eller fyrtaktsmotor. Bland ottomotorerna är det de fyrtaktiga som dominerar medan det är en jämnare fördelning mellan de två- och fyrtaktiga dieselmotorerna. Stora dieselmotorer är oftast tvåtaktare och går med låga varvtal. Dessa motorer har högre effekt än medel- och högvarviga fyrtaktsmotorer.



Figur 4.1 Dieselmotor

4.1.1 SenerTec mikrokraftvärmeverk

På senare tid har mikrokraftvärme med diesel- och gasmotorer studerats som ett intressant alternativ för småskalig kraftvärmeproduktion till t.ex. flerbostadshus.

Under hösten 1997 installerade Sydgas AB två stycken mikrokraftvärmeverk, Sachs HKA 5,5 från SenerTec GmbH. Dessa enheter är idag placerade i Malmö och Svedala.

Sachs-motorn är en 1-cylindrig 4-takts gasmotor. Som bränsle används naturgas, men även diesel och gasol är möjliga att använda. Beteckningen 5,5 anger att dess givna eleffekt är 5,5 kW_e.

4.2 TOTALVERKNINGSGRAD OCH ALFAVÄRDE

Verkningsgraden för motorerna beror på en rad olika faktorer såsom motortyp, motorstorlek, bränsle och hur motorn är optimerad dvs. om den är optimerad för maximal verkningsgrad eller för minimala emissioner.

Någon skillnad i verkningsgrad hos två- och fyrtaktsmotorer är inte märkbar men motorstorleken spelar en stor roll när det gäller verkningsgraden och ju större motorn är desto högre verkningsgrad har den. Följande tabell visar höjningen av verkningsgraden i takt med större uteffekt. Används även en turbogenerator kan elverkningsgraden uppgå till 55 % för de större motorerna.

Tabell 4.1 Elverkningsgrad för dieselmotorer där elutbytet gäller vid generatorklämmorna och utan turbogenerator. [42]

Effektområde [MW]	Motortyp	η_{el} [%]
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

Dieselmotorer för naturgas kan vanligen köras med enbart olja och kallas då "dual fuel"-motorer. När en "dual fuel"-motor övergår från olja till naturgas som bränsle sjunker vanligtvis verkningsgraden och uteffekten en aning.

Tidigare hade dieseln en betydligt högre verkningsgrad, men idag är verkningsgraden för naturgasdrivna motorer och oljedrivna motorer ungefär samma då motorerna är konstruerade för just ett av dessa bränslen.

För att öka den totala verkningsgraden tas värmen från dieselmotorns spillvärme tillvara från huvudkylsystemet, avgaserna, smörjoljekylaren och från kylaren till turbokompressorn.

I tabell 4.2 kan den totala verkningsgraden och alfavärdet ses för ett par olika motorer som drivs med antingen diesel eller naturgas.

Tabell 4.2 Totalverkningsgrad och alfavärde för olika motorer [39, 42]

Tillverkare	Motortyp	Bränsle	Eleffekt [MW]	η_{el} [%]	$\eta_{värme}$ [%]	η_{total} [%]	α -värde
Jenbacher	JMS156GS	Naturgas	0,143	35,8	51,7	87,5	0,69
MAN B&W	16V28/32SI	Naturgas	2,8	38,8	42,2	81	0,91
Rolls-Royce	KVGS16G3	Naturgas	3	42,6	49,4	92	0,86
Wärtsilä	18V220SG	Naturgas	3,2	41,2	43,8	85	0,94
Wärtsilä	18V200	Diesel	3,5	41,7	43,3	85	0,96
MAN B&W	10K60MC	Diesel	18,9	48-50	n.a.	n.a.	n.a.

n.a.=uppgifter saknas

Under en tidsperiod omfattande drygt två år utfördes mätningar på mikrokraftvärmeverk från SenerTec. Nedanstående tabell, tabell 4.3, visar effekter, verkningsgrader och alfavärde uppmätta under mätperioden.

Tabell 4.3 Effekter, verkningsgrader och alfavärde för SenerTec mikrokraftvärmeverk [9]

Bränsleeffekt [kW _{br.}]	Eleffekt [kW _{e.}]	Värmeeffekt [kW _{v.}]	η_{el}	$\eta_{värme}$	η_{total}	α -värde [$\eta_{el}/\eta_{värme}$]
21,1	5,24	12,7	24,8 %	60,9 %	85,6 %	0,41

4.2.1 Värmekraftanläggningar med dieselmotorer

Vid användning av "dual-fuel"-motorer i kraftvärmeanläggningar kan följande verkningsgrader fås enligt tabell 4.4. Dessa värden gäller för naturgasdrivna motorer med en inblandning av 5 % pilotolja.

Tabell 4.4 Verkningsgrader och α -värde i olika kraftvärmeanläggningar med dieselmotorer [76]

P_{el} [MW]	$P_{värme}$ [MW]	η_{el} [%]	$\eta_{värme}$ [%]	η_{total} [%]	α -värde
5,1	5,6	42	46	88	0,91
7,7	8,3	42,7	45,9	88,6	0,93
23,1	24,4	40,7	42,9	83,6	0,95

4.3 TEKNISK MOGNAD

För att öka verkningsgraden på dieselmotorerna kan en turbokompressor och en turbogenerator användas. Denna teknik är sedan länge beprövad. Turbokompressorn ökar medeltrycket i cylindrarna genom tillförsel av förbränningsluft under förhöjt tryck. Själva turbokompressorn drivs av de utgående rökgaserna.

Ännu ett sätt att öka verkningsgraden kan vara att låta rökgaserna driva en turbogenerator. På detta sätt kan verkningsgraden öka med 1-2 % och huvudgeneratoreffekten med 5 %. För större dieselmotorer kan verkningsgraden öka med så mycket som 5 %.

4.4 UTVECKLINGSTENDENSER

Motortillverkare, forskningsinstitut och högskolor fortsätter att utveckla motorerna för att få högre verkningsgrad samtidigt som emissionerna ska minskas.

Ett exempel på ny utveckling inom motortekniken är ATAC-motorn vid LTH (Lunds Tekniska Högskola). ATAC står för Active Thermo-Athmospheric Combustion och är en hybrid mellan en otto- och dieselmotor där en homogen bränsleblandning antänds genom kompression. Detta ger upphov till en långsam förbränning som startar samtidigt i hela gasblandningen. Genom att reglera bränsletillförseln fås mycket låga NO_x -utsläpp. CO- och kolväteemissioner renas med en oxiderande katalysator.

Ett annat exempel på ny utveckling är ett naturgasbaserat koncept i Zürich vid Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Detta koncept ska resultera i högre verkningsgrad och mycket låga emissioner. Det är en konventionell överladdad dieselmotor på 260 kW som byggts om till tändstiftsmotor samt försetts med avgasåterföring (EGR) och en trevägskatalysator i avgasstråket. Motorn drivs stökiometriskt och använder sig av Millercykeln. Normalt klarar en ottomotor med förblandat bränsle inte någon högre grad av överladdning utan att knacka, men med EGR reduceras knackningstendenserna radikalt. Förbränningskammarens utformning och tändningsinställningen har optimerats med simuleringsteknik och motorn har provkörts under så realistiska förhållanden som möjligt med ett par olika trevägskatalysatorer och olika naturgaskvaliteter. Motorn har även körts som leanburnmotor utan katalysator men med EGR, samt som leanburnmotor utan EGR men med oxidationskatalysator. I tabell 4.5 kan emissioner och verkningsgrader ses för de olika försöken med experimentmotorn.

Tabell 4.5 Emissioner och verkningsgrader vid testkörning vid ETH [42]

Driftalternativ	NO_x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]	UHC [mg/Nm ³]	BMEP [bar]	η_{et}
EGR, $\lambda=1$, trevägskatalysator	n.a.	75	30	12/20	40/42
EGR, $\lambda>1$, ingen katalysator	< 250	< 650	$\approx 1\ 000$	12	36,5
EGR, $\lambda=1$, oxidationskatalysator	250	100	1 500	12	38

n.a.= uppgift saknas

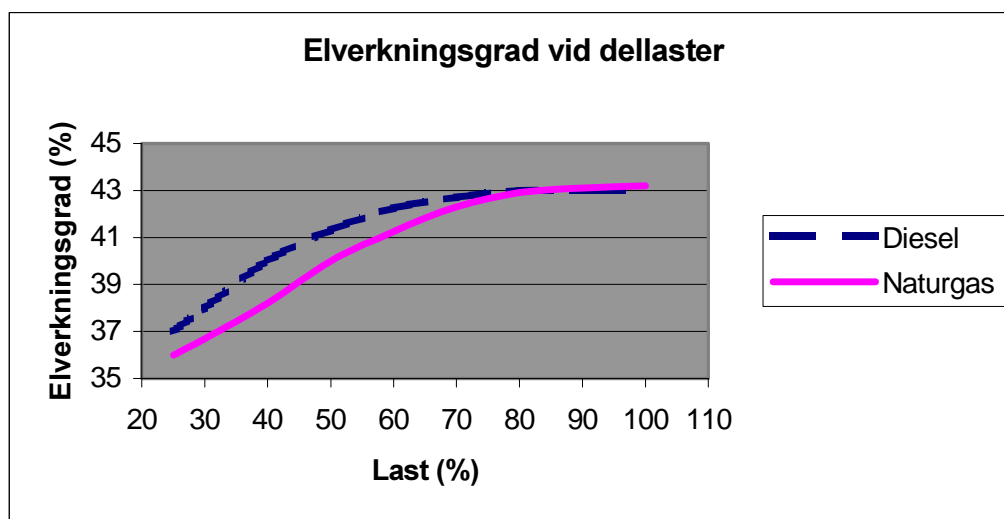
BMEP= Det tryck som verkar på kolven

Dessa resultat är avsevärda förbättringar gentemot andra gasmotorer i samma storleksordning. Försöken har även visat att

- BMEP kan ökas till 23 bar utan att gå över de termiska och mekaniska påkänningar som normalt gäller för motsvarande dieselmotorer
- Emissioner och verkningsgrad är relativt oberoende av naturgaskvaliteten
- De fyra testade katalysatorerna var i stort sett likvärdiga avseende reningsgrad
- Tekniken kan användas på större och mindre enheter

4.5 DRIFT- OCH REGLEREGENSKAPER

Vid dellaster sjunker elverkningsgraden och i figur 4.2 kan verkningsgraderna för en enskild "dual fuel"-motor ses vid olika dellaster. Motorn drivs med antingen naturgas eller diesel. När motorn drivs med diesel fås en högre verkningsgrad vid lägre laster jämfört med den naturgasdrivna motorn. [76]



Figur 4.2 Elverkningsgrad vid dellaster för en "dual fuel"-motor

Diagrammet visar tydligt att elverkningsgraden sjunker med 3–5 % vid 50 % dellast och detta gäller för alla effekter. Värmeverkningsgraden sjunker inte lika mycket, utan kan ibland även öka vid dellast. [23]

4.6 BRÄNSLEN OCH BRÄNSLEKRAV

De bränsletyper som kan användas till otto- och dieselmotorerna kan vara flytande eller i gasform. Vid användandet av naturgas i en dieselmotor kan en liten mängd av dieselolja tillsättas, eftersom naturgasen har en så hög självantändningstemperatur att en stabil tändning inte kan ske. Denna olja brukar kallas för "pilotolja" och injiceras med hjälp av en bränslepump vid ca 250 bars tryck.

Tabell 4.6 Aktuella bränsletyper för otto- och dieselmotorer.

Flytande bränslen	Gasformiga bränslen
Dieselolja	Naturgas
Tjocka eldningsoljor	Gasol
	Röttgas och deponigas

4.7 MILJÖEGENSKAPER

I tabell 4.7 kan emissioner för olika motorer ses och tabellen visar att en minimering av kväveoxider ger sämre elverkningsgrad för motorn. Tabellen visar även att utsläpp av kolväten är högre för gasmotorn än dieselmotorn.

Tabell 4.7 Emissioner för olika motorer. Inga externa reningsåtgärder. [39, 42]

Tillverkare	Motortyp	Bränsle	Eleffekt [MW]	η_{el} [%]	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]	UHC [mg/Nm ³]	Metan [mg/Nm ³]
Jenbacher	JMS156GS	Naturgas	0,143	35,8	530	1 290	n.a.	n.a.
MAN B&W	16V28/32SI	Naturgas	2,8	38,8	205	2,4	n.a.	n.a.
Rolls-Royce	KVGS16G3	Naturgas	3 / 3*	42,6 / 41,9*	850 / 250*	850 / 850*	300 / 330*	n.a. / n.a.
Wärtsilä	18V220SG	Naturgas	3,2 / 3,2*	41,2 / 38,8*	185 / 93*	372 / 671*	891 / 1 710*	816 / 1 610*
Wärtsilä	18V200	Diesel	3,5	41,7	1 350	128	105	-
MAN B&W	10K60MC	Diesel	18,9	48-50	2 500	117	n.a.	n.a.

n.a.= Uppgiften saknas

* Optimerad för minsta NO_x-utsläpp

Under fyra olika tillfällen har emissionsmätningar gjorts på de båda SenerTec-maskinerna. Dessa har visat att samtliga emissioner ligger under de gränsvärden som är angivna enligt den tyska anvisningen TA-luft (se kapitel 9.2 för givna gränsvärden). Aggregaten är utrustade med oxidationskatalysator, vilken effektivt reducerar emissioner av brännbara föreningar. I tabell 4.8 presenteras resultatet från emissionsmätningarna.

Tabell 4.8 Emissioner från SenerTec mikrokraftvärmeverk [9]

Anläggning	NO _x [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	UHC [mg/MJ]
Malmö	56	< 2	20
Svedala	83	< 2	31

4.8 ÅTGÄRDER FÖR ATT MINSKA EMISSIONER AV MILJÖPÅVERKANDE ÄMNER

Tillverkare av motorer avsedda för elproduktion försöker minska emissioner av skadliga ämnen genom en rad olika tekniker. Det finns både interna och externa metoder. Gemensamt för dessa är att de flesta metoderna har tagits fram för att minska emissionerna av NO_x.

På senare tid har även utsläppen av metan, som utgör den största delen av de oförbrända kolvätena, från gasmotorer uppmärksammas. Genom att metan är en starkare växthusgas än koldioxid kan även små utsläpp leda till stora konsekvenser för växthuseffekten. Det finns ett par olika reningsmetoder för att minska metanutsläppen och även dessa kommer att presenteras.

4.8.1 Interna åtgärder

De interna metoderna för att åstadkomma lägre emissioner görs genom motortekniska åtgärder. En motorteknisk åtgärd är den s.k. leanburn-tekniken. Här sker förbränningen under ett stort luftöverskott ($\lambda=1,8-2,3$), vilket sänker förbränningstemperaturen. Detta medför att NO_x-bildningen reduceras. Eftersom motorn arbetar med en mager bränsleblandning medför detta att misständning och ofullständig förbränning kan uppstå, vilket ger högre kolväteemissioner. För att minska dessa emissioner förses motorn ofta med en oxiderande katalysator.

En annan åtgärd är, precis som för gasturbiner, att sänka förbränningstemperaturen genom vatten/ång-insprutning, vilket leder till mindre NO_x-bildning.

Den viktigaste av de motortekniska åtgärderna är påverkan av förbränningsförloppet. Här kan NO_x-bildningen minimeras med hjälp av noggranna beräkningar av tändningspunkt och tändningsenergi, en homogen bränsle/luftblandning, samt ett optimerat reglersystem för tändning, bränsleinsprutning, turbotryck och belastning.

För att minska NO_x-bildningen används även rökgascirkulation (EGR), där en del av avgaserna kyls och leds in till insugningsluften, vilket medför att förbränningstemperaturen sänks.

För att komma tillrätta med metanutsläppen kan motorn byggas om till en motor med en öppen förbränningskammare (open chamber motor) eller helt ersättas med en ny. Detta leder till att metanutsläppen blir 50–60 % lägre än en motor med förkammare (pre chamber motor). Denna metod är dessvärre kostsam eftersom motorerna får en lägre uteffekt och måste då ersättas med en eller flera motorer. [42]

4.8.2 Externa åtgärder

Användning av de externa åtgärder som presenteras nedan leder till lägre emissioner genom att rena avgaserna.

En av de externa metoderna är selektiv katalytisk rening (SCR) och denna metod beskrivs närmare i kapitel 8.4.2.1. Denna metod används framförallt på större anläggningar där reningskraven är höga och den specifika kostnaden inte blir så hög.

En tresvägskatalysator (NSCR) reducerar NO_x, HC och CO. Reduceringsgraden är hög men är beroende av driftförutsättningarna och för att erhålla en hög reduceringsgrad krävs också rätt luftöverskott. Är luftöverskottet för litet minskas reduceringsgraden kraftigt och för en dåligt inställd trevägskatalysator är emissionen högre än för en dåligt inställd leanburn-motor. För att trevägskatalysatorn ska fungera tillfredsställande krävs en λ -sond, som placeras i avgaskanalen och styr inställningen av bränslesystemet. [42]

En oxiderande katalysator renar bara avgaserna från koloxid och oförbrända kolväten. Reningen av kolvätet metan är dock begränsad eftersom metanmolekylen är så stabil att den är svårare att oxidera än övriga kolväten. Detta är ett problem eftersom metan står för den större delen av oförbrända kolväten.

Den oxiderande katalysatorn kan med fördel användas när naturgas används som bränsle eftersom förgiftningen av katalysatorn bara sker från den lilla mängd svavel som tillsätts naturgasen som luktämne.

Metanutsläppen kan reduceras genom att avgaserna förbränns i en förbränningsväxlare. Denna kan rena avgaserna från metan med en reduceringsgrad av cirka 95 %.

4.9 BEMANNINGSKRAV

Mindre motorer behöver ingen bemanning. Det är först i större kraftvärmeanläggningar som bemanning krävs genom övervakning av motorerna från t.ex. kontrollrum.

4.10 SPECIFIK INVESTERINGSKOSTNAD

Investeringskostnaden för en dieselmotor ligger runt 4 miljoner kronor för 1 MW_e diesel i kraftvärmesammanhang. Detta ger en specifik investeringskostnad på 4 000 kr/kW_e. [41]

Nyinstallation av SenerTec mikrokraftvärmeverk kostar 160 kkr, vilket innebär en specifik investeringskostnad av 29 000 kr/kW_e. Detta kan anses som mycket högt, vilket gör att det i dagsläget är svårt att ekonomiskt motivera installation av mikrokraftvärmeverk av denna typ. [9]

4.11 DRIFT- OCH UNDERHÅLLSKOSTNADER

Drift- och underhållskostnaderna för mindre motorer är generellt ganska höga i jämförelse med andra kraftvärmeteknologier, om jämförelsen beaktar de specifika investeringskostnaderna.

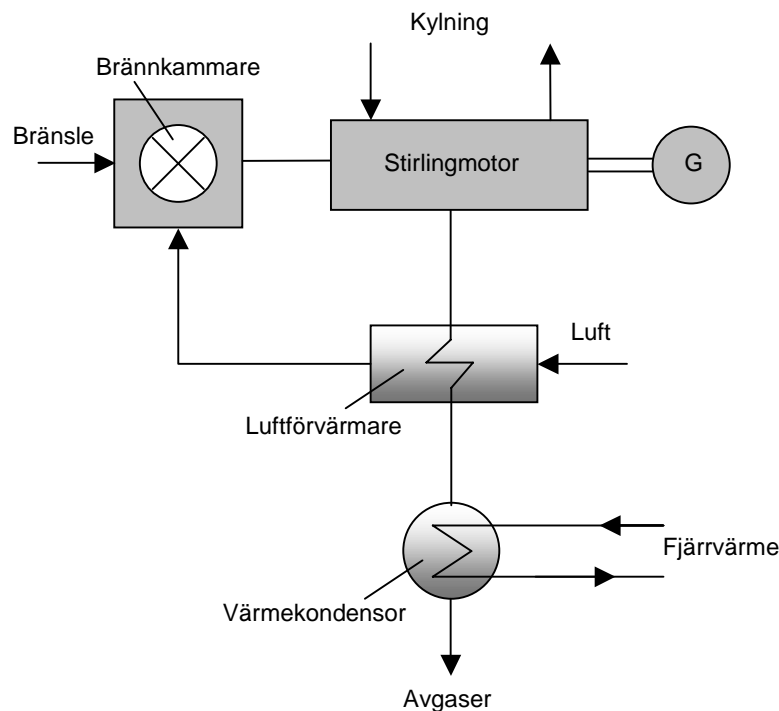
5 STIRLINGMOTORER

5.1 TEKNISK BESKRIVNING

Stirlingmotorn, som även kallas varmluftsmotorn, har använts och utvecklats under snart ett och ett halvt sekel. Funktionen kan enkelt beskrivas som ett slutet system i vilket en arbetsgas omväxlande värms upp och kyls ned. Stirlingmotorn består huvudsakligen av två stycken motliggande kolvar (arbets- och deplacerkolv) med en regenerator, som fungerar som en värmeväxlare, emellan placerade i en cylinder. Principen med stirlingmotorn är att värmeförseln till motorn sker utifrån. Det innebär att t.ex. bränslets förbränning sker utanför cylindern.

Vätgasen är den absolut bästa arbetsgasen i stirlingmotorn. Då det är relativt små mängder det handlar om föreligger det i regel ingen fara trots att vätgasen är högexplosiv. Helium fungerar i princip lika bra, men är en mycket dyrare gas än vätgasen. Luft fungerar men är mycket sämre i egenskap av att bära värme än de två övriga arbetsgaserna och anses inte heller vara något alternativ som arbetsgas i Sverige idag.

Vidare kan stirlingmotorns kringutrustning och komponenter beskrivas (se figur 5.1). Värmeförseln till stirlingmotorn sker, som nämnts tidigare, utifrån. Bränsle förbränns i brännkammaren där luft tillsätts för att förbättra förbränningen. De heta gaserna som bildas vid förbränningen värmer upp stirlingmotorn samtidigt som den kyls ned, antingen med hjälp av vatten eller t.ex. omgivande luft. Vatten är helt klart att föredra då stirlingmotorn ska användas i kraftvärmesammanhang. På väg ut värmer avgaserna upp inkommande luft till brännkammaren i en luftförvärmare. Vidare växlas ytterligare värme från avgaserna över till t.ex. fjärrvärme i en värmekondensator.



Figur 5.1 Stirlingmotorn och dess kringssystem

5.1.1 Stirlingmotorn i kraftvärmeproduktion

För att en teknik ska lämpa sig i både kraft- och värmeproduktion måste den kunna leverera el vid en viss verkningsgrad samt kunna leverera värme i en form som kan vara till nytta. T.ex. bör värmen levereras i form av varmt vatten, vilket i sin tur måste ha en viss temperatur för att kunna utnyttjas vidare i t.ex. fjärrvärmenätet. Som nämnts tidigare kyls stirlingmotorn företrädesvis med vatten. Dessutom kan ytterligare energi i form av värme överföras till vatten i en värmekondensator där de varma avgaserna passerar, vilket visas i figur 5.1.

Vid kylning av stirlingmotorn växlas kylvattnet i en vanlig värmeväxlare som är kopplad till motorns kylkrets.

Stirlingmotorn har svårt att nå de verkningsgrader som man kan nå med traditionella kraftvärmeteknologier. Däremot står sig stirlingmotorn väl i hänseende till verkningsgrad om den jämförs med otto- och dieselmotorer i samma storlek.

5.2 TOTALVERKNINGSGRAD OCH ALFAVÄRDE

Elverkningsgraden ligger vanligtvis runt 25% i kraftvärmesammanhang. Totalverkningsgraden ligger runt 90%. Om vatteninnehållet i avgaserna kondenseras ut helt kan totalverkningsgrader på över 100% nås. Elutbytet, α -värdet, ligger på ca 0,38–0,39. [45]

Förlusterna, eller rättare sagt värmen, går mestadels till kylvattnet. Denna värme kan växlas över till vatten i en extern krets. Som tidigare klargjorts är den vattenburna värmen en klar fördel då värme skall utvinnas.

Verkningsgraderna beror på kylvattentemperaturen. En lägre kylvattentemperatur ger en högre totalverkningsgrad. Fjärrvärmevattnets returtemperatur ligger vanligtvis kring 40–70°C, vilket kan anses som något högt för stirlingmotorn. Däremot krävs dessa temperaturer på kylvattnet för att kunna producera nyttig värme. Dessutom förändras verkningsgraderna marginellt då kylvattentemperaturen skiftar. Ovanstående siffror gäller vid normala förhållanden och vid en avgastemperatur runt 200°C.

För stirlingmotorn, SOLO Stirling 161, är $\eta_{el} = 24\%$ och $\eta_{värme} = 65\text{--}75\%$ och därmed $\eta_{total} = 89\text{--}99\%$ i kraftvärmesammanhang. Arbetsgasen som används i SOLO Stirling 161 är helium. Dess uteffekt 4–9 kW_e samt 12–25 kW_v. Enligt SOLO ligger α -värdet på 0,32–0,37. [54]

Tabell 5.1 Verkningsgrader och alfavärde för stirlingmotorer

	η_{el}	$\eta_{värme}$	η_{total}	α -värde
Stirlingmotor	24–25 %	65–75 %	89–99 %	0,32–0,39

Då el- och värmebehovet varierar från fall till fall är det svårt att fastställa ett generellt α -värde för alla stirlingmotorer.

5.3 TEKNISK MOGNAD

I kraftvärmesammanhang kan stirlingmotorn sägas vara tekniskt mogen för en kommersiell marknad. Det finns idag ett fåtal tillverkare som inom det närmsta året kommer att sälja sina stirlingmotorer för kommersiellt bruk.

För att stirlingmotorn ska slå igenom helt inom kraftvärme måste dock fler erfarenheter från anläggningar dokumenteras. Det är denna typen av erfarenheter som saknas för att få riktigt många finansiärer intresserade. Värt att nämnas är att SGC idag driver ett projekt i Göteborg där en stirlingmotor, utvecklad av SOLO Kleinmotoren, Intersol och Lunds Tekniska Högskola, satts i drift. Detta med målsättningen att demonstrera och utvärdera driften av stirlingaggregatet försett med ett nyutvecklat värmarsystem med väldigt låga emissioner. Projektet som startade vintern 1998 och fortfarande pågår, skall resultera i dokumenterade data avseende investerings-, underhålls- och driftskostnader, verkningsgrader, emissioner samt driftegenskaper. Se figur 5.2 för SOLO Stirling 161.



Figur 5.2 SOLO Stirling 161

5.4 UTVECKLINGSTENDENSER

Det finns idag färdigutvecklade stirlingmotorer och koncept som skulle kunna passa på den kommersiella marknaden. Däremot är intresset för stirlingmotorer i kraftvärmesammanhang fortfarande något svalt. Det känns därför viktigt att få till stånd flera fungerande anläggningar för att öka intresset för stirlingmotorer i kraftvärmeproduktion.

Det forskas mycket om alternativa bränslen för stirlingmotorn. Idag görs försök där gas från termisk förgasning används som bränsle till stirlingmotorn. I Danmark finns en testanläggning där brännkammaren ersatts med en biobränsleeldad panna. Denna anläggning består av en stirlingmotor med effekten 35 kW_e. Elverkningsgraden ligger runt 19 % och totalverkningsgraden på 87 %. [7, 8]

Även Lunds Universitet leder ett utvecklingsprojekt med en biobränsleeldad (träpulver) stirlingmotor och har nyss beviljats stöd ifrån Statens Energimyndighet. [78]

Det utvecklas även allt större stirlingmotorer, d.v.s. stirlingmotorer över 100 kW_e. Den amerikanska stirlingmotortillverkaren STM Power säger sig kunna tillverka stirlingmotorer mellan effekterna 2–500 kW_e, där samtliga storlekar baseras på deras grundmotor på 25 kW_e. [55]

5.5 DRIFT- OCH REGLEREGENSKAPER

Det är svårt att fastställa en generell max uteffekt för stirlingmotorer av samma typ. Oftast bestäms stirlingmotorns uteffekt antingen efter maximal kapacitet att producera elektricitet eller efter ett visst värmebehov. På så vis kan max uteffekt variera något beroende på vilket behovet är. Fullasten brukar läggas något lägre än maximal kapacitet för att minska på slitage i motorn. Det innebär alltså att livslängden på motorn är viktig. Dellastegenskaperna är bra ner till en last kring 50 %.

För att reglera motorns effekt vid varierande last minskas luftflöde och bränsletillförsel till förbränningen. På så sätt fås ett minskat gasflöde in i motorn. Det minskade gasflödet medför en temperatursänkning i stirlingmotorns expansionsutrymme. För att behålla egenskaperna i expansionsdelen regleras i sin tur trycket inne i kolven och man får på så sätt en reglerad effekt. Då trycket inne i cykeln förändras, förändras även verkningsgraden. Ju högre tryck, desto högre verkningsgrad.

Att seriekoppla flera stirlingmotorer är ett mycket bra alternativ. Vid seriekoppling kan man nå högre effekter och dessutom få bättre dellastegenskaper, i form av högre verkningsgrader. En gemensam generator kan också användas för bästa utnyttjande av den genererade elektriciteten från de seriekopplade motorena.

5.6 BRÄNSLEN OCH BRÄNSLEKRAV

Då förbränningen sker utanför motorn kan i princip vilket bränsle som helst användas. Det är lätt att anpassa förbränningen efter stirlingmotorns effekt och kapacitet. Det mest använda bränslet är naturgas. Andra exempel på bränslen är, som nämnts tidigare, gas från termisk förgasning samt biobränslen.

För naturgas ställs krav på t.ex. gastyck. Gastycket är beroende på stirlingmotorns modell, fabrikat och/eller brännartyp. Vanligen ligger trycket mellan 100–200 mbar för en gasbrännare. För biobränslen är fukthalten avgörande. Biobränslet bör hålla samma fukthalt för att stora variationer i värmevärde skall kunna undvikas. Förbränningstemperaturerna brukar vanligtvis ligga kring 600–700°C.

5.7 MILJÖEGENSKAPER

Stirlingmotorns miljöegenskaper är relativt bra. Vid hög temperatur och stökiometrisk förbränning, dvs. då luftfaktorn (λ) är 1, är NO_x-bildningen mycket låg. Möjligtvis måste katalytisk rening användas för att rena bort den koloxid (CO) som bildas vid stökiometrisk förbränning. Idag klarar stirlingmotorn av de miljökrav som är satta (se kapitel 9.2 och 9.10).

Tester vid Lunds Tekniska Högskola har visat att en stirlingmotor med storleken 10 kW_e som använder det mest använda bränslet, naturgas, släpper ut i genomsnitt 15 ppm NO_x vid λ=1,4. Detta motsvarar ca 10 mg/MJ NO₂. Vid samma luftfaktor är CO-halterna och UHC-halterna mycket nära noll. [45]

I tabell 5.2 kan utsläppsdata vid förbränning av naturgas studeras. De data som presenteras är angivna av SOLO Kleinmotoren för deras SOLO Stirling 161.

Tabell 5.2 Utsläppsdata för SOLO Stirling 161 [54]

Stirling 161	NO_x [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	UHC [mg/MJ]
Dagens brännare	24	15	0
Vidareutvecklad brännare	4,5	1,5	0

5.8 RENINGSUTRUSTNING FÖR ATT KLARA AV EMISSIONS-GRÄNSER

Som nämnts i kapitel 5.7 kan det vid stökiometrisk förbränning vara nödvändigt att använda en katalysator för att rena bort koloxid. Men då luftfaktorn kan optimeras ska det rimligtvis inte behövas någon reningsutrustning för att klara dagens emissionsgränser (se kapitel 9.2 och 9.10).

5.9 BEMANNINGSKRAV

Då stirlingmotorn är helt automatiserad och relativt okomplicerad krävs ingen bemanning.

5.10 SPECIFIK INVESTERINGSKOSTNAD

På SOLOs hemsida presenteras ett beräkningsexempel för komplett kraftvärmeuppställning med Stirling 161. Där visas att den specifika investeringskostnaden för ett komplett mikrokraftvärmeverk ligger runt 18 000 kr/kW_e. Då SOLO Kleinmotoren inom kort börjar serietillverka sin stirlingmotor kommer den specifika investeringskostnaden att kunna reduceras drastiskt.

5.11 DRIFT- OCH UNDERHÅLLSKOSTNADER

Den tekniska livslängden är lång. I LTHs testlab har stirlingmotorer varit i drift i flera tusen timmar. Det som kan behövas bytas ut är slitna kolringar. Dessa behöver kontrolleras och bytas ut i snitt en gång om året. De långa service- och underhållsintervallen ger goda förutsättningar för att stirlingmotorns underhållskostnader ska bli låga.

Utöver de kolringar som behövs bytas ut krävs det även att arbetsgas fylls på då och då eftersom att det förekommer läckage av arbetsgas. Åtgärder att vidta för att minska läckage kan vara att tillsätta CO eller CO₂. På så vis kan läckaget av arbetsgas minska, då CO och CO₂ i viss mån kan "täta" materialet.

SOLO Kleinmotoren presenterar även drift- och underhållskostnader för komplett mikrokraftvärmeverk med SOLO Stirling 161. Kostnaderna uppgår till ca 6 % av total investeringskostnad per år, vid en drifttid på 6000 h/år. Detta innebär en kostnad på ca 18 öre/kWh_e. Då SOLO Kleinmotoren inom kort börjar serietillverka sin stirlingmotor kommer dessa kostnader att kunna reduceras. [54]

6 BRÄNSLECELLER

Bränslecelltekniken har ansetts vara en mycket intressant teknik under de senaste 20 åren, men har aldrig riktigt slagit igenom. Detta håller långsamt på att förändras och forskningen har gått framåt. Bränslecellsutvecklare runt om i världen satsar nu på framförallt småskaliga stationära anläggningar för kraftvärmeproduktion och inom fordonssektorn satsas det också enormt mycket på bränslecellstekniken. En bidragande orsak till att bränslecellsutvecklarna inriktar sig på småskaliga applikationer är att tillverkarna tänker mer marknadsmässigt och de försöker att utveckla bränslecellerna för olika behov och marknader. De börjar även se konkurrensmöjligheter med andra kraftvärmeteknologier. De fördelar som bränslecellerna kan komma att konkurrera med i framtiden gentemot andra teknologier är bl.a. följande:

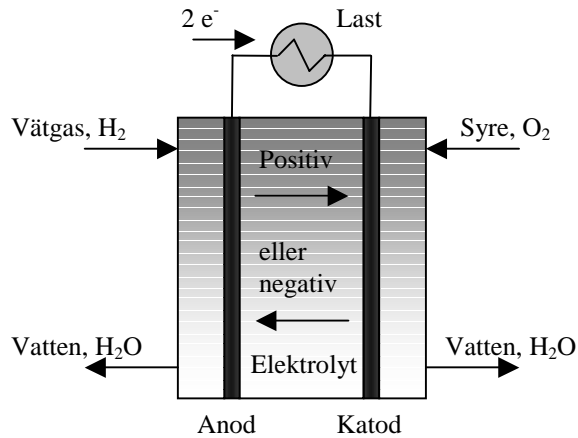
- Tystgående (inga rörliga delar)
- Kräver ingen bemanning
- Låga emissioner och höga verkningsgrader
- Bra dellastegenskaper

I dagens läge finns det för tillfället flera nackdelar med stationära bränsleceller som gör att de har långt kvar för att kunna komma ut och etablera sig på den kommersiella marknaden. Dessa nackdelar är t.ex. följande:

- Höga material- och tillverkningskostnader
- Låg effekttäthet
- Hög investeringskostnad, som kommer att minska, men inte till samma nivå som konkurrerande tekniker såsom motorer och gasturbiner

6.1 TEKNISK BESKRIVNING

En bränslecell är en elektrokemisk apparat som producerar elektricitet och värme. Detta sker genom en kombinerad kemisk reaktion och elektrisk laddningstransport i bränslecellen och det sker ingen förbränning. Det finns idag en mängd olika bränsleceller, men den principiella uppbyggnaden är densamma. Bränsleceller använder vätegas och syre som bränsle, där syret oftast tas ur luften medan vätegasen oftast tas från naturgas via en s.k. reformer. I figur 6.1 kan en principiell uppbyggnad av en bränslecell ses.



Figur 6.1 Principiell uppbyggnad av en bränslecell.

Bränslecellen består av två elektroder (anod och katod) och en elektrolyt. Vid anoden splittras vätgasen till 2 H^+ joner (protoner) och 2 elektroner. Elektrolytens uppgift består av att göra det möjligt att transportera protonerna till katoden och även för att överföra jonladdningarna mellan elektroderna så att en cellspänning kan uppstå. Elektronerna färdas dit via en yttre krets och därmed får man ström. Vid katoden reagerar protonerna och elektronerna med syre från luften och bildar vatten.

Bränslecellens drifttemperatur varierar kraftigt mellan 80°C till runt 1000°C beroende på vilken typ av bränslecell som används. Även elektrodmaterialen skiljer sig från bränslecell till bränslecell, men den största skillnaden är ändå vilken sorts elektrolyt som används och det är utifrån dessa som bränslecellerna delas in i olika grupper.

6.2 BRÄNSLECELLSTYPER

Bränslecellen kommer antagligen att vara en teknik för småskaliga anläggningar och de bränsleceller som är mest intressanta i kraftvärmesammanhang är smältkarbonat- och fastoxidbränslecellen. Det som gör dem intressanta är deras höga arbetstemperaturer. Det finns ytterligare två stycken bränslecellstyper, polymer- och fosforsyra-bränslecellen, som kan vara intressanta i kraftvärmesammanhang i framtiden, men deras drifttemperaturer gör att de för tillfället inte är lika intressanta som de båda förstnämnda. De senare kommer ändå att presenteras och jämföras med de övriga. I tabell 6.1 visas de olika drifttemperaturerna för bränslecellstyperna.

Tabell 6.1 Drifttemperaturer för bränslecellerna

Celltyp	Arbetstemperatur [$^\circ\text{C}$]
Smältkarbonatbränslecellen (MCFC)	600-700
Fastoxidbränslecellen (SOFC)	800-1 000
Polymerelektrolytbränslecellen (PEMFC)	70-90
Fosforsyra-bränslecellen (PAFC)	150-220

6.2.1 Smältkarbonatbränslecellen (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells)

Smältkarbonatbränslecellens elektrolyt är en smält karbonatblandning och sammansättningen varierar, men består oftast av litiumkarbonat. Anodelektroden är en porös nickel-krom-legering med små tillsatser av aluminiumoxid.

Katoden består av porös nickel-litiumoxid. Bränslecellens arbetstemperatur ligger omkring 650°C och den höga temperaturen gör att potentialförlusten reduceras så mycket att dyra katalysatorer av ädelmetall inte är nödvändiga. En annan stor fördel med den höga temperaturen är att naturgas kan omvandlas direkt till vätgas inne i bränslecellen.

6.2.2 Fastoxidbränslecellen (SOFC, Solid Oxid Fuel Cells)

I en fastoxidbränslecell används en fast elektrolyt av en ickeporös metalloxid, vanligen zirkoniumdioxid. Anoden består av nickel-zirkonium och nicklet leder elektroderna och fungerar som katalysator. Katoden har hög porösitet och här används lantanmanganit som också har en god elektrisk ledningsförmåga. Drifttemperaturen ligger mellan 800–1000°C och kan därför användas till att öka den totala verkningsgraden. En fördel med den höga temperaturen är att den blir mindre känslig för föroreningar.

6.2.3 Polymerelektrolytbränslecellen (PEMFC, Proton Exchange Membran Fuel Cells)

Elektrolyten består av ett polymermembran som är utformat så att det leder vätejoner bra. Elektrolyten är sammanpressat mellan två porösa platinakatalyserande elektroder och dessa elektroder är samma som i fosforbränslecellen. Membranet har i stort samma egenskaper som en syra och dess funktion är i stort samma som fosforbränslecellen. Bränslecellens drifttemperatur ligger runt 90°C och detta på grund av det temperaturkänsliga membranet. Det medför att vattnet som bildas inte avstöts, utan måste transporteras bort. Om inte detta görs försvåras gasens transport och detta minskar bränslecellens effekt.

6.2.4 Fosforsyrabränslecellen (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells)

Fosforsyrabränslecellens elektrolyt är fosforsyra och dess elektroder består vanligtvis av kolförstärkt platina, där platinan fungerar som katalysator, bundet med teflon på ett karbonatpapper. Bränslecellens drifttemperatur ligger runt 150–220°C och temperaturen måste ligga över 150°C för att en effektiv reduktion av syrgasen ska kunna ske. Fördelen med höga temperaturer är att vattnet som bildas vid körning avstöts lätt.

6.3 VERKNINGSGRADER

Smältkarbonat- och fastoxidbränslecellens totala verkningsgrad kan ökas om de samkörs med en liten gasturbin, en så kallad hybrid. En sådan hybrid beskrivs i kapitel 7.2 där gasturbinen utnyttjar bränslecellens avgaser. I tabell 6.1 ses elverkningsgrader för de fyra olika bränslecellerna. Elverkningsgraden för hybridanläggningar kan även ses för jämförelse.

Tabell 6.1 Elverkningsgrader för olika bränslecellstyper

Bränslecellstyp	η_{el} [%]	η_{el} i hybridanläggning [%]
Smältkarbonat	55	65
Fastoxid	45	65
Polymerelektrolyt	35-40	-
Fosforsyra	40	-

6.3.1 Smältkarbonatbränslecellen

Verkningsgraden ligger runt 55 % med naturgas som bränsle. Som nämnts tidigare kan den höga temperaturen utnyttjas till att höja den totala verkningsgraden ytterligare på bränslecellen.

6.3.2 Fastoxidbränslecellen

Verkningsgraden ligger runt 45 %, men i en hybridanläggning kan den teoretiska elverkningsgraden uppgå till hela 70 %. Försök som gjorts har uppnått en elverkningsgrad på 65 %. Utnyttjas även den höga drifttemperaturen till att producera ånga till en ångcykel, precis som smältkarbonatbränslecellen, ökas den totala verkningsgraden avsevärt.

6.3.3 Polymerelektrolytbränslecellen

Verkningsgraden med naturgas som bränsle ligger runt 35–40 % men kan gå upp till 50 % eller mer vid användning av ren vätgas. Kraftvärmeapplikationer begränsas dock av den låga drifttemperaturen, som ligger runt 90°C, men värme kan erhållas vid 60–70°C vilket är tillräckligt för lokaluppvärmningsändamål.

6.4.3 Fosforsyrabränslecellen

Fosforsyrabränslecellens verkningsgrad ligger runt 40 % med naturgas som bränsle, men nästan 85 % av ångan som produceras kan användas till att producera elektricitet och värme, vilket kan öka den totala verkningsgraden ytterligare.

6.4 TEKNISK MOGNAD OCH UTVECKLINGSTENDENSER

6.4.1 Smältkarbonatbränslecellen

Denna typ av bränslecell är väl lämpad för användning i kraftvärmeverk i storleksordningen 250 kW_e och uppåt och är den teknik som idag har kommit längst i utvecklingen. ERC (Energy Research Company) har vid försöksanläggningar konstaterat att upp till 2 MW_e kan utvinnas. I Italien finns anläggningar med en eleffekt upp till 100 kW_e och i Japan finns anläggningar upp till 1 MW_e. För att kommersialiseras behövs mer utveckling av bränslecellens material, främst för att klara av den starkt korrosiva elektrolyten och den höga temperaturen.

6.4.2 Fastoxidbränslecellen

Denna teknik har varit känd sedan länge men det är först på senare tid som den egentliga utvecklingen har skett och det är framförallt i hybridanläggningar, där bränslecellen kombineras med en gasturbin, som potentialen ligger för denna typ av bränslecell. Det finns ett par hybridanläggningar som utvärderas i olika testanläggningar och dessa beskrivs, som nämnts tidigare, i kapitel 7.2. Precis som med smältkarbonatbränslecellen så behövs mer utveckling av materialet för att klara av den höga arbetstemperaturen.

6.4.3 Polymerelektrolytbränslecellen

Denna teknik är än så länge intressant för stationära anläggningar i storleksordningen < ca 250 kW_e. Den ledande tillverkaren av denna typ av bränslecell är Ballard i Kanada. De har fem stycken testanläggningar runt om i världen på vardera 250 kW och samarbetar med en rad olika företag, t.ex. Alstom, GPU International och EBARA. Testanläggningarna finns i USA, Tyskland, Schweiz, Tokyo i Japan och den senaste som ligger i Vancouver i Kanada. Siemens är också en stor aktör inom denna delen av bränsleceller.

6.4.4 Fosforsyrabränslecellen

Denna typ av bränslecell finns på marknaden idag och är den som även funnits längst. Det fanns i maj förra året ungefär 200 anläggningar runt om i världen. Den kännetecknas som robust och tillförlitlig i kraftvärmeapplikationer i området 50–200 kW_e. Den används i olika sammanhang som i t.ex. sjukhus, hotell, kontorsbyggnader, skolor, kraftvärmeanläggningar, flygplatser, kommunala soptippar m.m. Problemet med denna typ av bränslecell är att dess prestanda försämras ju längre drifttid den har. Även dess låga verkningsgrad gör att den antagligen kommer att verka som kraftvärmeproducent för anläggningar mindre än 1 MW_e.

6.5 BRÄNSLEKRAV

Bränsleceller använder vätgas och syre som bränsle, där syret oftast tas ur luften medan vätgasen oftast tas från naturgas via en reformer. Vätgasen kan även framställas ur metanol och etanol, men även genom elektrolys av vatten. Vissa bränsleceller kräver hög renhet på vätgasen, speciellt polymerbränslecellen.

6.5.1 Smältkarbonatbränslecellen

Vätgas och koloxid. Naturgas kan användas som råvarubränsle men tåligheten mot koloxid gör den lämpad för gas genererad ur fasta bränslen.

6.5.2 Fastoxidbränslecellen

Vätgas och koloxid. Naturgas som råvarubränsle.

6.5.3 Polymerelektrolytbränslecellen

Naturgas, metanol eller bensen. Ett problem med polymerelektrolytbränslecellen är att ren vätgas krävs.

6.5.4 Fosforsyrabränslecellen

Bränslet är vätgas och behöver inte vara absolut ren eftersom CO₂ inte förorenar fosforsyrabränslecellen. Vätgasen kan genereras ur ett flertal råvarubränslen som kol eller biobränsle, men förgasning är nödvändig. Naturgas lämpas sig mycket väl, men gasen måste vara helt ren från koloxid som annars förstör bränslecellen.

6.6 INVESTERINGSKOSTNAD

Gemensamt för alla tekniker är att kostnaderna för produktionen måste sänkas för att kunna konkurrera med andra kraftvärmeteknologier. För att kunna göra detta krävs en industriell tillverkning i industriell skala och produktutveckling. Målet är att den specifika investeringskostnaden för en bränslecellsanläggning ska ligga runt 10 000 kr/kW_e. [44]

6.7 DRIFT- OCH UNDERHÅLLSKOSTNADER

I dagsläget är det svårt att sätta ett pris på dessa båda kostnader för bränsleceller.

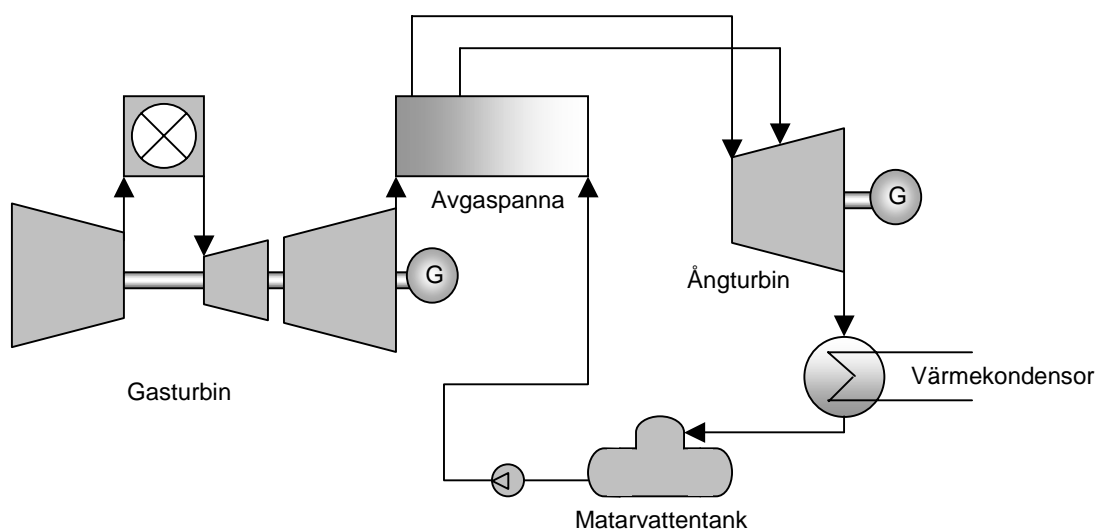
7 KOMBIANLÄGGNINGAR

7.1 GASTURBIN MED AVGASPANNA OCH ÅNGTURBIN

Genom att koppla till en avgaspanna och en ångturbin till gasturbinen ökar elverkningsgraden avsevärt. Tas även värmen omhand fås en mycket bra termisk verkningsgrad. Gaskombianläggningen är idag den kommersiella anläggning som har den högsta elverkningsgraden av alla.

7.1.2 Teknisk beskrivning

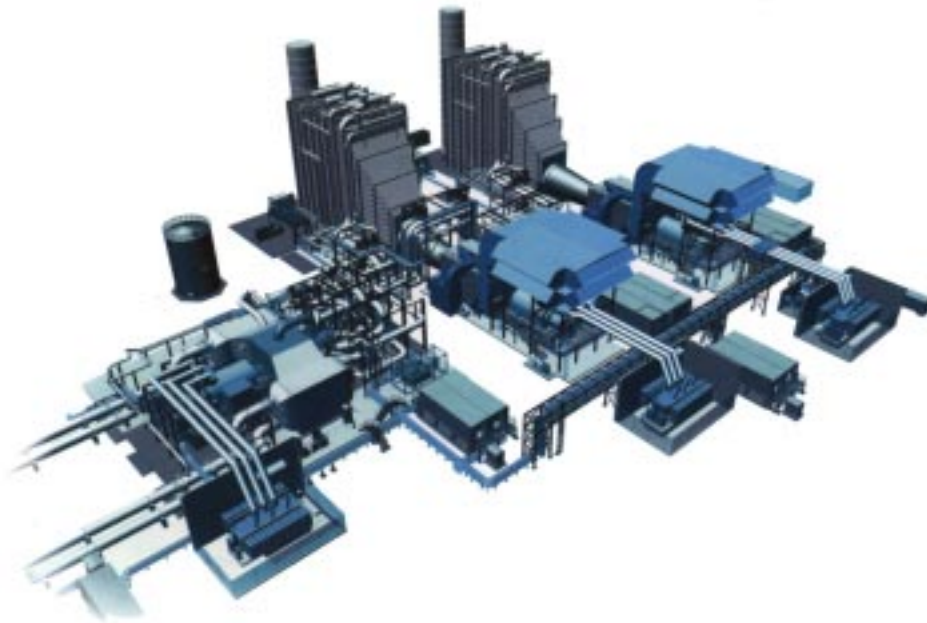
I figur 7.1 visas ett principschema av en gasturbin med tillhörande avgaspanna, ångturbin och kondensator.



Figur 7.1 Principschema av kombianläggning

Kombiprocessen med gasturbin och ångturbin producerar både el och värme. Genom att beskriva de olika komponenterna i principschemat kan en bättre förståelse av systemet ges. Luft suges in i gasturbinen. I brännkammaren på gasturbinen förbränns bränslet. Luften som sugits in i gasturbinen förbränns tillsammans med naturgasen och heta avgaser bildas. Avgaserna fortsätter genom gasturbinen. De heta avgaserna passerar avgaspannan (HRSG, Heat Recovery Steam Generator), där matarvattnet, som pumpas runt i systemet, hettas upp och förångas till en temperatur något lägre än inkommande avgastemperatur.

I en tvåtryckspanna tas högtrycksånga och lågtrycksånga ut. Avgaserna kan sedan kylas ner ytterligare i en ekonomiser för att utnyttja den kvarvarande energin. Inne i ångturbinen tappas ångan/vattnet av vid två olika tryck och därmed två olika temperaturer. Vid första avtappningen leds vatten till matarvattentanken, där det förvärmer matarvattnet. Denna avtappning skapar även ett övertryck i matarvattentanken och ser på så sätt till att den luft som finns i matarvattnet kan avgasas. Resten av ångan/vattnet i ångturbinen leds vidare till värmekondensorn där den/det växlas mot t.ex. fjärrvärmenätet. Den kondenserade ångan, kondensatet, pumpas sedan vidare till matarvattentanken och vidare runt i systemet.



Figur 7.2 Bilden visar en fleraxlig gaskombianläggning

Enaxliga kombianläggningar

En enaxlig kombianläggning är konstruerad på följande sätt. Gasturbinen, ångturbinen och generatoren är sammankopplade till en gemensam axel. Generatoren kan vara placerad mellan gas- och ångturbinen eller efter ångturbinen. När anläggningen ska startas är ångturbinen frikopplad från generatoren. Ångan från avgaspannan används till att starta ångturbinen och när dess axel har samma varvtal som generatorns och gasturbiniens axel kopplas ångturbinen till med en automatisk kopplingsanordning.

Fördelarna med en enaxlig kombianläggning är följande. Det krävs ingen "by pass"-ventil för att leda rökgaserna förbi avgaspannan eftersom enkel gasturbindrift inte är aktuell. Anpassning av en ångturbin till en gasturbin förenklar ångcykeln och reducerar antalet strömmar, spjäll och förgreningsrör. Även kontroll, drift och underhåll underlättas vid en enaxlig konstruktion.

Fleraxliga kombianläggningar

En fleraxlig kombianläggning består av två till tre gasturbiner med varsin generator och antingen gemensam eller varsin avgaspanna samt en ångturbin med generator. Det vanligast förekommande är att varje gasturbin har en enskild avgaspanna.

Fördelarna med fleraxliga anläggningar är att dellastverkningsgrader och driftegenskaper är bättre än för enaxliga.

Varje gasturbin förses oftast med rökgasspjäll för att kunna leda rökgaserna förbi avgaspannan vid simple cycle-drift, vilket leder till en dyrare konstruktion.

7.1.3 Totalverkningsgrad och alfavärde

Gaskombianläggningar når som nämnts tidigare den högsta elverkningsgraden av alla kommersiella anläggningar i dagens läge. Genom att även ta tillvara värmen kan en hög total verkningsgrad och ett högt alfavärde fås och kopplas en avgaspanna och en ångturbin till gasturbinen kan en elverkningsgrad på 45–59 % och ett alfavärde mellan 1–1,3 uppnås. Den totala verkningsgraden överstiger 80 %. I tabell 7.1 ses elverkningsgrader på kombianläggningar från olika tillverkare. Vid oljedrift sjunker elverkningsgraden med någon procentenhet.

Tabell 7.1 Elverkningsgrader på kombianläggningar med naturgas som bränsle [19, 41, 53, 60, 62]

Tillverkare	Kombicykel Modell	Effekt [MW]	η_{el} [%]
ABB-Alstoms	GT10	36	50
ABB-Alstoms	GTX100	62	54
Siemens AG Power Gen.	GUD1S.64.3A	101	53,7
ABB-Alstoms	KA24-1	267	57,4
GE Power Systems	S109G	420	58,0

7.1.4 Teknisk mognad

Det finns idag ett stort antal gasturbinkombianläggningar i drift i världen där de största leverantörerna i Europa är Alstom, Siemens och GE (General Electric).

Förbättringarna inom gasturbintekniken har lett till högre verkningsgrader för kombianläggningarna. De kan idag komma upp till en verkningsgrad på ca 58-59 % och har stor bränsle- och driftflexibilitet, hög tillgänglighet, kort byggtid och låga utsläpp. Men samtidigt är de komplicerade och med delar som utsätts för stora termiska påfrestningar.

7.1.5 Utvecklingstendenser

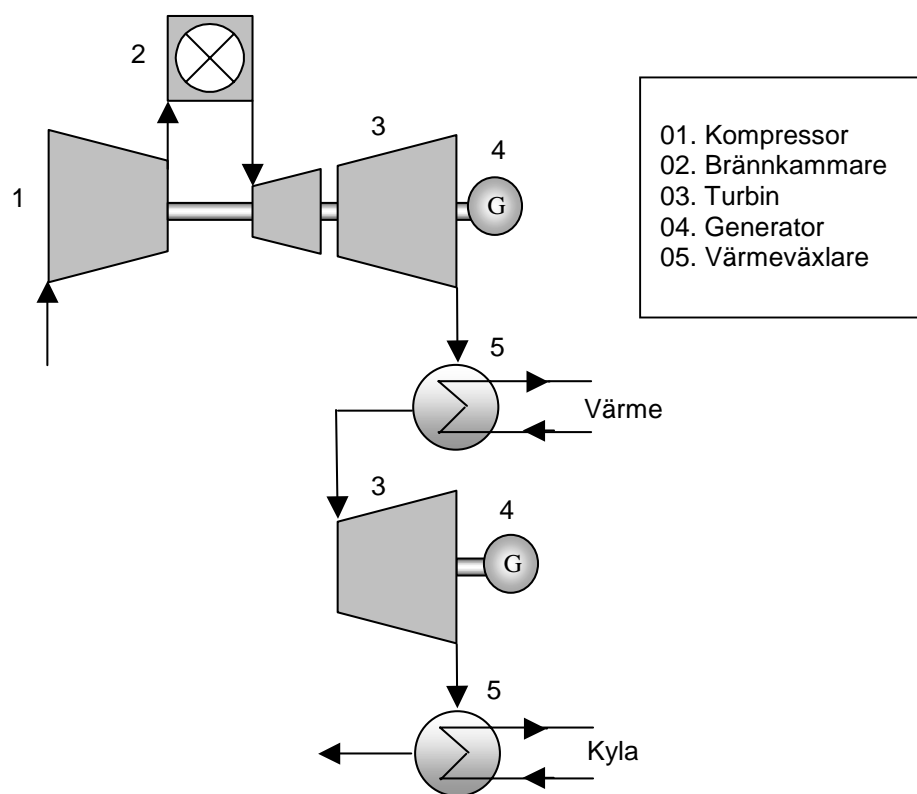
Leverantörer av gaskombianläggningarna har som mål att uppnå en elverkningsgrad på 60 %, främst genom förbättring av gasturbinen och dess komponenter. Detta kan ses i kapitel 3.4.

TRIGENERATION

TRIGENERATION är ett koncept bland kraftvärmeteknologierna. Huvudsyftet med denna TRIGENERATION-teknologi är att el, värme och kyla skall kunna produceras samtidigt. Alternativet känns intressant, då det är allt fler energiföretag i Sverige som levererar fjärrkyla till sina kunder. Tekniken har studerats och utvecklats teoretiskt av Per M. Rosén, doktorand vid Lunds Tekniska Högskola.

I figur 7.3 visas en skiss över hur TRIGENERATION-teknologin kan vara uppbyggd i ett kraftvärmeverk. Luften passerar kompressorn och blandas sedan med bränsle i brännkammaren likt en ordinär gasturbin. I själva turbinen expanderar och sänks trycket på de heta avgaserna samtidigt som elektricitet genereras. Till skillnad från en "normal cykel" avbryts expansionen i en TRIGENERATION-cykel vid ett högre tryck.

De trycksatta avgaserna avger sedan värme till t.ex. fjärrvärme i en värmeväxlare. Vidare expanderas avgaserna till atmosfärstryck i ytterligare ett turbinstege, där elektricitet genereras. Genom att avbryta expansionen vid ett högre tryck i det första turbinsteget och att avge värme i den första värmeväxlaren vid detta förhöjda tryck kommer temperaturen på avgaserna efter den andra expansionen att vara mycket låg i förhållande till rådande tillstånd. Avgaserna som kan komma att hålla en temperatur under 0°C kan därmed användas i ytterligare en värmeväxlare som en kylapplikation vid t.ex. fjärrkyla.



Figur 7.3 TRIGENERATION anpassat till befintlig gaskombianläggning [31]

Biogaskraftvärmeverk

Under april 2002 kommer den tredje etappen av den stora biogasanläggningen i Filborna utanför Helsingborg att invigas. Det är Öresundskraft Produktion AB som tillsammans med Nordvästra Skånes Renhållnings AB som planerar denna tredje etapp.

Det är Volvo Aero som genom med sin gasturbin VT600 som kommer att ha en huvudroll i den nya etappen.. Eftersom att biogas har ett lägre energivärde än naturgas har Volvo Aero fått lägga ner mycket utvecklingsarbete kring brännkammaren och bränslesystemet för att kunna anpassa turbinen till biogasbränslet. Detta för att kunna nå samma effekter med biobränsle som med naturgas.

Den gasturbinbaserade kombicykeln som kommer att bestå av gasturbin, ångpanna, ångturbin och kondensator beräknas generera 800 kW_e och 1500 kW_v. [80]

7.1.6 Drift- och regleregenskaper

Ett normalt driftområde för en gasturbin är 50–100 % last. För att öka driftområdet kan en lösning vara att installera två stycken gasturbiner med halva effekten var, en s.k. fleraxlig kombianläggning. Detta ger i så fall ett driftområde mellan 25–100 % och även en längre drifttid på varje enskild gasturbin. Genom att göra detta kan även en del andra problem undgås. Vid värmeproduktion till t.ex. ett fjärrvärmenät varierar värmebehovet under året. Detta betyder att värmebehovet måste upp till en viss nivå innan gasturbinen kan startas eftersom elutbytet är lägre för gasturbinen vid dess minlast än vid dess maxlast och värmeandelen är större när lasten minskar. Vid start av en gasturbin med eleffekten 44 MW så har den en värmeeffekt på ca 65 MW. När kombianläggningen startas kommer ett tillskott på 33 MW värme att tillföras och detta betyder att motsvarande värmeproduktion från en annan värmeproducerande enhet måste stoppas. I ett fjärrvärmesystem kan detta ställa till med en del problem om den värmelast som ersätts med gasturbinens har en lägre driftskostnad. [19]

7.1.7 Bränslen

Samma bränsle kan användas i kombianläggningar som för en enskild gasturbin och de bränslen som anses vara av betydelse i kraftvärmesammanhang är naturgas och lättolja.

7.1.8 Miljöegenskaper

Emissionerna från kombianläggningar varierar beroende på vilken gasturbin som används och vilken reduceringsteknik gasturbinen har. I kapitel 3.7 har emissionerna från ett par olika gasturbiner presenterats och dessa emissioner kan sägas gälla även för kombianläggningar.

7.1.9 Reduceringsteknik av emissioner

I kapitel 3.8 beskrivs olika reduceringsmetoder för gasturbiner.

7.1.10 Bemanningsskrav

Större anläggningar behöver övervakas från någon typ av kontrollrum.

7.1.11 Investeringskostnad

De stora tillverkarna i världen av stora industriella gasturbiner, General Electric, Siemens och ABB-Alstom, erbjuder leverans av hela gasturbinkombianläggningar. Kostnaden för två av ABB-Alstoms gaskombianläggningar kan ses i tabell 7.2.

Tabell 7.2 Investeringskostnader för ABB-Alstoms gaskombianläggningar [19]

Kombianläggning med gasturbinen:	Total Eleffekt [MW _{el}]	Gasturbin Eleffekt [MW _{el}]	Ångturbin Eleffekt [MW _{el}]	Inv. kostnad [MSEK]	Specifik investeringskostnad [kr/kW _e]
GT 10	36	24	12	200	5 600
GTX100	62	43	19	300–350	4 800 – 5 700

Gaskombianläggningarna levereras i ett paket, sk turn key leverans, och omfattar förutom gasturbin och ångturbin även avgaspanna, kondensatkrets, byggnad, kringssystem, reglersystem, montage och driftsättning. [19]

7.1.12 Drift- och underhållskostnader

Drift- och underhållskostnader för kombianläggningar är generellt svårt att sätta, men likt övriga kraftvärmeteknologier kan en generell procentsats på 2–4 % av den specifika investeringskostnaden per år vara rimlig. [6, 41]

7.2 BRÄNSLECELL MED GASTURBIN (HYBRID SOFC/GT)

Tillsammans med smältkarbonatbränslecellen (MCFC) är fastoxidbränslecellen (SOFC) den bränslecell som är mest intressant i kraftvärmesammanhang på grund av de höga temperaturerna som möjliggör hybridkombinationer med gasturbiner.

7.2.1 Teknisk beskrivning

De avgaser som kommer ut ur bränslecellen förbränns ytterligare i en gasturbin. Avgaserna är relativt lågvärdiga, men denna kombianläggning beräknas kunna komma upp till cirka 1 MW. Med så här små effekter måste mindre gasturbiner användas, s.k. mikrogasturbiner.

7.2.2 Totalverkningsgrad

Den teoretiska verkningsgraden för hybridkombinationen SOFC/GT kan uppgå till hela 70 %. Enligt Lunds Tekniska Högskola har det visat sig att verkningsgraden är högre ju lägre last och en verkningsgrad på 65 % är fullt möjlig.

7.2.3 Teknisk mognad

FC-hybridanläggningarna är fortfarande på utvecklingsstadiet och det finns testanläggningar runt om i världen. I USA finns det en hybridanläggning som skall ge max 223 kW_e, men har efter ett tag i drift endast gett max 170 kW_e. Tanken är att bränslecellen ska producera 176 kW_e och mikrogasturbinen 47 kW_e. Den förväntade verkningsgraden är 57 % baserat på det lägre värmevärdet av naturgas, men testanläggningen har hittills gett. Leverantör av bränslecellen i denna anläggning är Siemens Westinghouse och det planeras flera testanläggningar som ska tas i drift de närmaste åren med effekter upp till 1 MW.

7.2.4 Utvecklingsbehov

Det största utvecklingsbehovet av denna typ av anläggningar ligger på bränslecellssidan och det behövs bland annat mer utveckling av materialet i fastoxidbränslecellen för att klara av den höga arbetstemperaturen.

7.2.5 Drift- och regleregenskaper

Verkningsgraden för denna kombination har visat sig bli högre vid dellast än vad den är vid fullast.

7.2.6 Bränslekrav

De bränslen som används i bränsleceller är vätgas och koloxid. Naturgas används som råvarubränsle, där naturgasen först måste renas från svavel.

7.2.7 Miljöegenskaper

Denna typ av anläggningar har låga emissioner och är knappast mätbara.

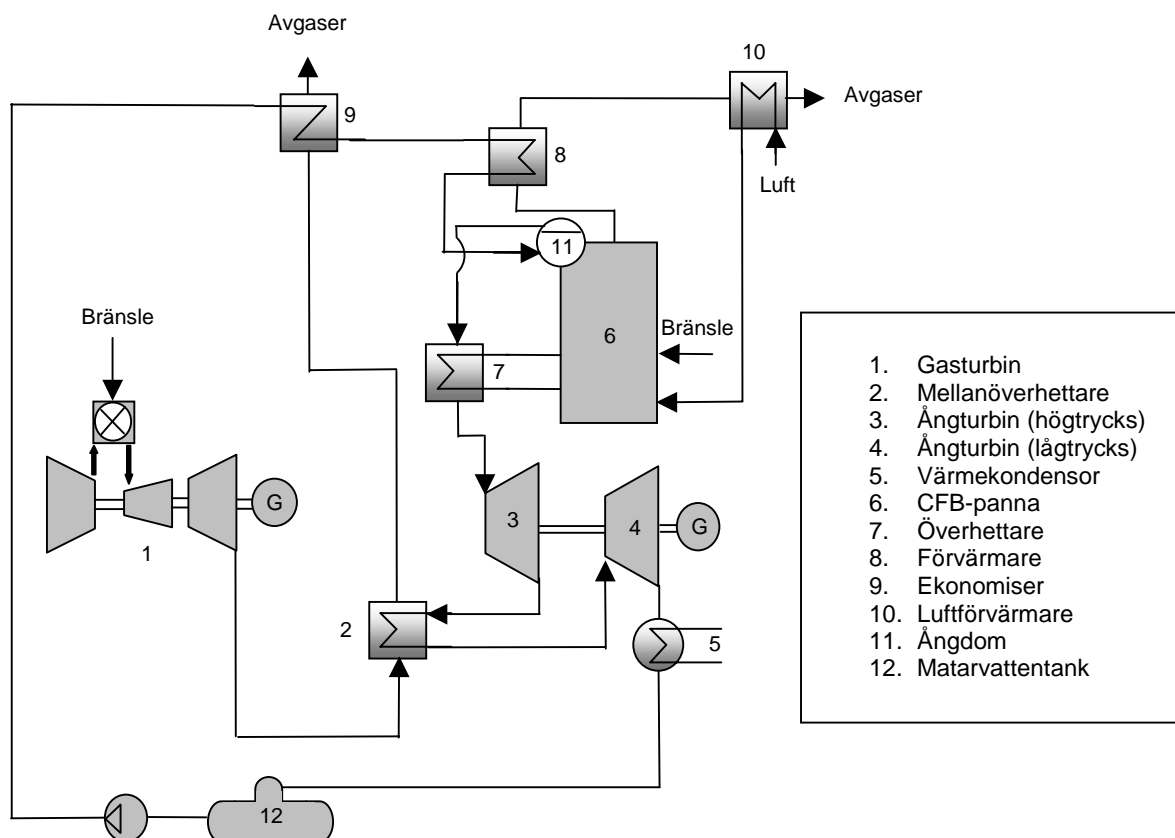
7.2.8 Specifik investeringskostnad

Idag kostar hybridanläggning alldeles för mycket för att kunna konkurrera ut andra typer av kraftvärmeanläggningar i samma storleksklass. Prismålsättningen för denna typ av anläggning ligger kring 10 000–15 000 kr/kW_e. En anledning till de stora kostnaderna är att de höga temperaturerna som medför dyra komponenter. [2, 30, 44]

7.3 HYBRIDCYKEL FÖR BIOBRÄNSLE OCH NATURGAS

7.3.1 Teknisk beskrivning

Hybridcykeln består av en kombicykel som eldas med två olika bränslen. I detta fall med naturgaseldad gasturbin och fastbränsleeldad ångcykel. Avsikten med denna kombination är att höja medeltemperaturen vid värmeförseln till cykeln. Ångan mellanöverhettas med hjälp av gasturbinens avgaser. En fördel med denna typ av anläggning är att bibränslets energiutnyttjning ökar betydligt, tack vare en insats med naturgas. I figur 7.4 kan en principskiss av hybridcykeln studeras.



Figur 7.4 Principskiss över hybridcykeln

7.3.2 Totalverkningsgrad och alfavärde

Elverkningsgraden för hybridcykeln ligger mellan 36–45 % eller mer, beroende på hur komponenterna i systemet arrangeras samt på verkningsgraden för de olika komponenterna. Värmeverkningsgraden för cykeln är i stort sett densamma som för en bibränsleeldad panna. Om vattenången i avgaserna från CFB-pannan kondenserar kan totalverkningsgraden hamna mycket nära 100 %. Alfavärdet ligger generellt mellan 0,52–0,60, dvs. något högre än för en enkel ångcykel med ångpanna och ångturbin och något lägre än för kombicykel med gasturbin, avgaspanna och ångturbin. [43]

Ett bra exempel på hybridcykeln är Västhamnsverket i Helsingborg där naturgas, kol och biobränslen används som bränsle. Västhamnsverket har byggts om från befintlig ångturbinanläggning till hybridanläggning. Denna ombyggnad resulterade i att alfavärdet steg från 0,48 till 0,68. [42]

Tabell 7.3 Verkningsgrader och alfavärde för hybridcykeln

	η_{el}	$\eta_{värme}$	η_{total}	α -värde
Hybridcykel	36–45 %	55–64 %	90–99 %	0,52–0,68

7.3.3 Teknisk mognad

Hybridcykeln är en beprövad teknik. Hybridanläggningar har varit i drift i ungefär 30 år och finns idag utspridda världen över. Storskaliga anläggningar eldade med kol och naturgas finns i bl.a. Tyskland, Japan och Thailand. Tekniken kan anses som tekniskt mogen, men kräver mer uppmärksamhet för att få större utbredning.

7.3.4 Utvecklingstendenser

För tillfället är ett stort kraftvärmeverk baserat på hybridcykeln under konstruktion i Danmark. Denna hybridcykel ska eldas med kol, naturgas samt små mängder halm. Utvecklingen av hybridcykeln syftar framförallt till att få en större utbredning av teknologin världen över. Det förväntas att teknologin då ska få mer uppmärksamhet, framförallt tack vare sina extremt goda dellastegenskaper.

Utvecklingen syftar dels till att bygga om befintliga ångturbinanläggningar till hybridanläggningar. Västhamnsverket i Helsingborg har byggts ut med en gaskombianläggning bestående av en ny gasturbin, Alstoms GTX100 och avgaspanna. Ångan från avgaspannan leds till befintlig ångturbin, som dessutom förses med ånga från befintlig fastbränslepanna.

Även nybyggnation av hybridanläggningar är aktuella.

7.3.5 Drift- och regleregenskaper

Som nämnts i föregående kapitel är dellastegenskaperna för hybridcykeln mycket bra. Gasturbinen i sig har relativt dåliga dellastegenskaper och fastbränslepannan något bättre. Genom att kombinera dessa två tillförs bränsle vid två olika nivåer, baslast (bascykel, biobränsle) och topplast (toppcykel, naturgas). Om uteffekten från gasturbinen minskas kommer totalverkningsgraden för cykeln att påverkas negativt. Genom att alltid låta gasturbinen gå på full effekt och endast minska respektive öka uteffekten från fastbränslepannan tillförs en större del värme i toppcykeln. Detta medför att cykeln totalverkningsgrad t.o.m. kan bli bättre vid 75–90 % last än vid 100 % last. [43]

Tack vare denna egenskap hos hybridanläggningen är elverkningsgraden för hybridcykeln ca 90 % ända ner till 30 % last.

7.3.6 Bränslen och bränslekrav

Bränslen som används i den beskrivna hybridcykeln är som tidigare nämnts naturgas och biobränsle. Krav på bränslet är beroende på vilka komponenter som används i t.ex. gasturbin och CFB-panna. Vanligtvis är fukthalten på biobränslet avgörande för vilket värmevärde som erhålls.

7.3.7 Miljöegenskaper

Emissionerna från en hybridcykelanläggning är mycket låga. NO_x-emissionerna är väldigt låga från både fluidbäddspannor och gasturbiner. Dagens gasturbiner använder uteslutande brännkammare med låg-NO_x-brännare.

Biobränsle innehåller en mycket liten mängd svavel. Likaså innehåller den naturgas som används i Sverige små mängder svavel. Det svavel som finns i naturgasen har oftast tillsatts i form av ett odöriseringsmedel, för att kunna upptäcka läckage av naturgas. SO_x-emissionerna från hybridcykeln är därmed låga, under ställda emissionskrav (se kapitel 9.10).

Med fluidbäddspanna är även halterna av CO och oförbrända kolväten (UHC) mycket låga.

7.3.8 Reningsutrustning för att klara av emissionsgränser

Emissionerna från hybridcykeln är redan väldigt låga utan extern reningsutrustning. Detta tack vare förbränningstekniska åtgärder och att fluidbäddspannor ger väldigt låga utsläpp, vilket nämnts tidigare. Däremot installeras vanligtvis stoft-, NO_x- och SO_x-rening vid nybyggnation av eller utbyggnad till hybridcykel med gasturbin och fastbränslepanna.

7.3.9 Bemanningsskrav

Hybridanläggningen kräver i allmänhet bemanning, t.ex. övervakning från kontrollrum.

7.3.10 Specifik investeringskostnad

Den specifika investeringskostnaden kan uppskattas hamna strax över den för ångpanna med ångturbin, då även investeringskostnaden för gasturbinen tillkommer (se kapitel 2.10).

7.3.11 Drift- och underhållskostnader

Rimligtvis ligger drift- och underhållskostnader för en hybridanläggning på 2–4 % av specifik investeringskostnad (jmf. övriga kraftvärmeteknologier).

8 UTSLÄPP OCH RENINGSUTRUSTNING

8.1 UTSLÄPP TILL LUFT

Utsläpp till luft vid förbränning av bränslen sker i form av följande:

- Partiklar
- Vätskedimor
- Gaser

8.1.1 Partiklar

Stora partiklar i form av t.ex. stoft kan spridas ut i luften vid förbränning av framförallt biobränslen och avfall. I synnerhet är det stoft i form av olika metaller som frigörs ur bränslet vid förbränningen. Stoftet påverkar miljön genom att speciellt tungmetaller och organiska föreningar orsakar anrikning i mark och vatten.

Stoft följer med avgaserna framförallt vid förbränning av eldningsolja, diesel och fastbränslen.

8.1.2 Vätskedimor

Vätskedimor, eller så kallade aerosoler, är inte lika vanliga vid förbränning. Där- emot har de aerosoler som frigörs en oerhört negativ effekt på miljön. Bland annat har aerosolerna en ozonnedbrytande effekt. De påverkar på så sätt klimatet och har i vissa fall även växthusdrivande egenskaper.

8.1.3 Gaser

De vanligaste utsläppen vid förbränning vid energiproduktion är i form av gaser. Dessa gaser kan indelas i större och mindre molekyler. De större molekylerna är mestadels organiska ämnen medan de mindre molekylerna är vissa enkla oorganiska gaser. De oorganiska gaserna är de ämnen som uppmärksammas mest i förbränningssammanhang. Detta då de ofta förekommer i form av svaveloxider (SO_x), kväveoxider (NO_x) samt koloxid (CO) och koldioxid (CO_2).

Svaveloxiderna har en försurande effekt samtidigt som de kan medföra hälsoeffekter. Kväveoxiderna har även de en försurande effekt, men kan även medföra kvävemättnad samt bilda oxidanter. Koldioxiden är en växthusdrivande gas och påverkar därmed klimatet.

Gaser bildas vid förbränning av alla bränslen uppräknade i denna rapport. Naturgas, biogas, eldningsolja, diesel, biobränslen, avfall, gas från termisk förgasning etc.

I de efterföljande kapitlen kommer en snabb överblick på de reningsmetoder som finns att tillgå ges.

8.2 RENINGSUTRUSTNING FÖR STOFTAVSKILJNING

För att rena avgaserna från stoft kan följande metoder användas:

- *Dynamisk stoftavskiljning* sker i cykloner. Då rökgaserna passerar genom cyklonen tvingas de till en roterande rörelse. De större partiklarna i rökgaserna kolliderar med väggarna i cyklonen, genom inverkan av centrifugalkraften. Då de krockar med väggarna faller de ner och kan samlas upp.
- *Våtavskiljare* i form av spraytorn, skrubber, venturiskrubber och motströmsskrubber. Man låter en vätska komma i kontakt med rökgaserna. Stoftet i rökgaserna binds till vätskedropparna och faller ner i ett uppsamlingskärl.
- *Elektrofilter*, vilka även kallas elfilter eller elektrostatiska filter, kan effektivt rena bort stoftpartiklar ur rökgaserna. Då rökgaserna passerar genom elektrofiltret får stoftpartiklarna en elektrisk laddning. Detta medför att stoftpartiklarna vandrar mot uppsamlingselektroder och infångas på dessa.
- *Textilfilter*, såsom t.ex. spärrfilter eller slangfilter, består av t.ex. bomull, glasfiber, teflon eller annat lämpligt filtermaterial. Stoftpartiklarna fastnar i filtret och innan filtret ger upphov till ett för stort tryckfall skakas, vibreras eller blåses filtret rent och låter stoftpartiklarna samlas upp.
- Kombinationer av metoderna ovan.

8.3 RENINGSUTRUSTNING FÖR VÄTSKEDIMMOR

Vid stora droppar av aerosoler kan samma metoder som stoftavskiljning användas. I första hand våta elfilter och spärrfilter. Mindre vätskedroppar kräver speciella finmaskiga filter, t.ex. glasfiberfilter.

8.4 FÖRBRÄNNING FÖR ENERGIPRODUKTION

Förbränningen av bränslen vid kraft-, värme- och kraftvärmeverk står ger upphov till höga emissioner. Dessa emissioner är möjliga att minska antingen genom processinterna åtgärder eller genom extern reningsteknik. [29]

De processinterna åtgärderna kan t.ex. vara val av bränsle, förbränningsutrustning och förbränningsförhållanden. Om en extern reningsteknik krävs finns ett stort antal olika att välja mellan.

8.4.1 Åtgärder mot SO_x-utsläppen

Sedan larmen om de höga svaveloxidutsläppen i Sverige kom under 60- och 70-talen har man jobbat med att minska dessa. Till en början var det övergången till lågsvavliga oljor som bidrog till en minskning av utsläppen, medan det i senare tid framförallt har berott på att olja ofta har bytts ut mot andra bränslen såsom t.ex. naturgas och biobränslen. Naturgas och biobränslen ger vid förbränning lägre utsläpp av SO_x än vid förbränning av olja och t.ex. kol.

Det finns dock metoder för att minska svavelinnehållet i olja och kol. Bland annat kan man redan innan förbränning, i samband med brytning eller raffinering, avsvavla kolet och oljan.

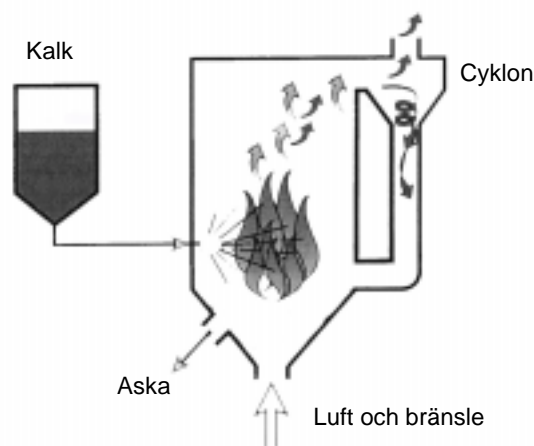
De olika teknikerna som kan utnyttjas vid avsvavling kan delas upp i flera grupper. Man skiljer framförallt på avsvavling direkt i pannan och avsvavling i ett externt rök-gasreningssteg. De olika grupper vari man kan dela upp dessa tekniker är följande:

- torra metoder
- våt-torra metoder
- våta metoder

Torra metoder

Vid avsvavling direkt i pannan under förbränning används torra metoder. Ett kalkmaterial tillförs direkt till pannan under förbränningen. Kalkmaterialet blandar sig tillsammans med luft och bränsle och reagerar tillsammans med svaveldioxid och bildar då gips. Denna teknik är särskilt lämpad för pannor av typen fluidiserad bädd, då förbränningstemperaturen kan hållas vid en, för avsvavling, lämplig temperatur kring 800–900°C. Avskiljningsgraden kan då uppgå till hela 90%. Se figur 8.1 för principskiss. [29]

Om tekniken skall tillämpas i rost- eller pulverpannor där förbränningstemperaturen ligger mellan 1300–1800°C, måste kalkmaterialet tillföras på ett ställe i pannan där avgastemperaturen sjunkit ner till en lämplig nivå. Avskiljningsgraden varierar ofta kraftigt i denna typ av pannor och överstiger sällan 50%. [29]

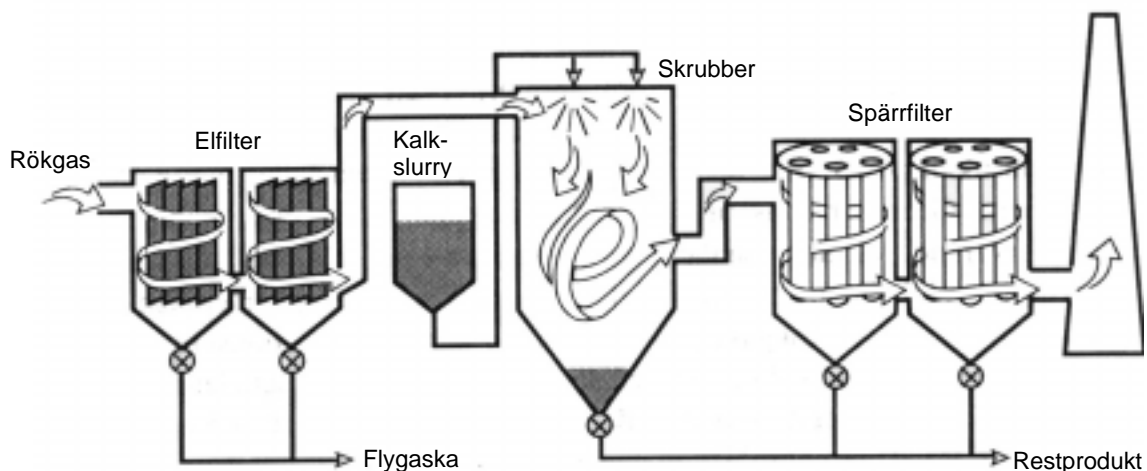


Figur 8.1 Torr metod för avsvavling, här i fluidiserad bädd

Våt-torra metoder

De våt-torra metoderna används vid avsvavling i externa rökgasreningssteg. Ett absorptionsmedel, som har till uppgift att absorbera svaveloxiderna, sprayas ut i avgaserna. Detta sker i en s.k. sprayskrubber. Absorptionsmedlet består av en blandning av bränd kalk och vatten. Svaveldioxid absorberas i vätskedropparna och faller ner till botten av skrubbern. Då vattenmängden balanseras efter temperaturen på rökgaserna kan man få en reaktionsprodukt som är näst intill torr (därav namnet våt-torr). Efter att rökgaserna passerat genom skrubbern innehåller de stora mängder kalk samt soft, som bildats genom reaktionen. Stoffet avskiljs med hjälp av ett spärrfilter. I figur 8.2 ges exempel på principskiss för våt-torr avsvavlning.

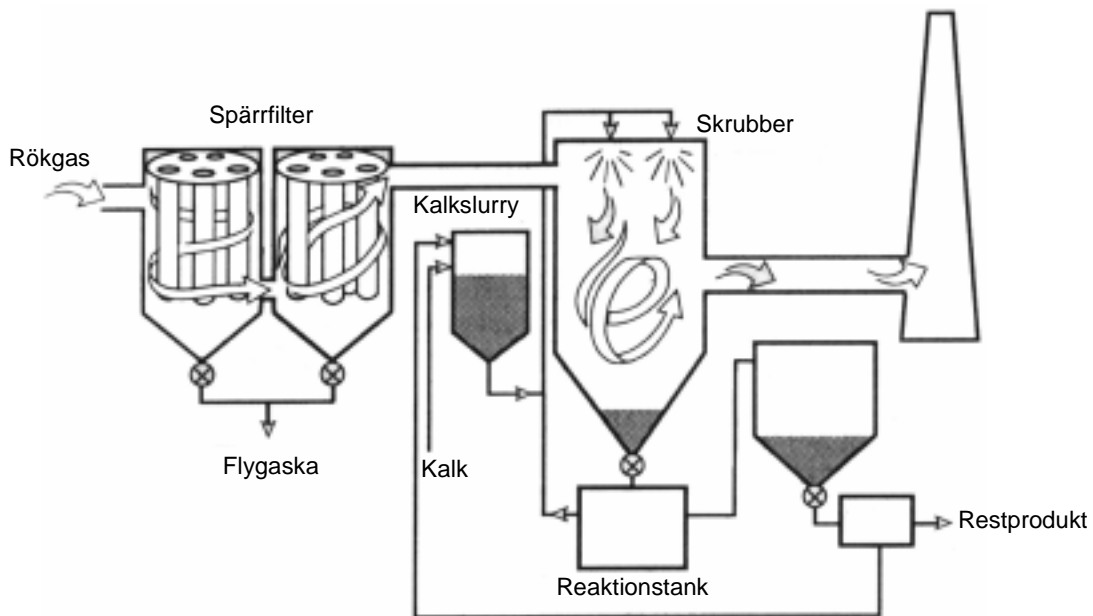
Avskiljningsgraden för denna typ av avsvavling ligger runt 85–90 %. Den våt-torra metoden är den vanligaste tekniken för avsvavling i svenska kraft- och värmeproducerande anläggningar. [29]



Figur 8.2 Våt-torra metodens olika reningssteg

Våta metoder

De våta metoderna används liksom de våt-torra i externa rökgasreningssteg. Här sker hela separationsförloppet i en våt omgivning. Absorptionsmedlet består av en uppslamning av släckt kalk. Det sprayas in bland rökgaserna i en skrubber. Svaveldioxiden absorberas i slamdropparna och reagerar med kalken till kalciumsulfid. Uppslamningen faller till botten i skrubbern där den samlas upp. Den förs sedan vidare till en reaktionstank där den får reagera med luft som bubblas genom själva uppslamningen. Det största mängden kalciumsulfid oxideras till gips. Den del av uppslamningen som inte oxideras pumpas tillbaka till skrubbern för att kalken skall kunna utnyttjas till en acceptabel nivå. Avskiljningsgraden för denna teknik ligger kring 90% [29]. Figur 8.3 visar en principskiss över våt metod.



Figur 8.3 Våt metod för rening av svavel

8.4.2 Åtgärder mot NO_x-utsläppen

Idag pratas det mycket om kväveoxidutsläppen och hur de påverkar vår miljö genom att försura växtriike, mark och vatten samt ge upphov till kvävemättnad i tex. sjöar. För att minska utsläppen av kväveoxiderna som bildats vid förbränning vidtar man idag ett par olika åtgärder. Som grund för de åtgärder som vidtas under själva förbränningen ligger låg-NO_x-tekniken där man tar hänsyn till förbränningstemperatur, tillförd luftmängd, pannans konstruktion, bränslet kväveinnehåll etc. Låg-NO_x-tekniken omfattar följande åtgärder:

- Lämplig utformning av eldstaden. Bland annat är brännarna hörnplacerade, eldstadsvolymen större etc. Detta leder till en bättre förbränning av bränslet och en ökad värmeupptagning, vilket i sin tur leder till en lägre temperatur i pannan.
- Förändring av brännarkonstruktionen till en s.k. låg-NO_x-brännare.
- Minskat totalt luftöverskott samt att luft tillsätts i flera steg. Detta medför en sänkning av tillförd mängd kväve som kan reagera, samt minskad mängd syrgas som kan oxidera kvävet. Tillförseln av luft vid flera steg innebär även en temperatursänkning i pannan.
- Rökgasåterföring, där kylda rökgaser återförs till pannan. Till en följd av detta blir temperaturen och syrehalten i pannan lägre.
- Flerstegsförbränning, eller reburning, är en metod som innebär att den största delen bränsle förbränns i ett första steg under svagt oxiderande förhållanden. I en ovanförliggande zon tillförs ett "reburningbränsle" som kan vara en gas, träpulver eller det ordinarie bränslet. Vid denna zon sker förbränningen i en reducerande miljö, dvs. att kväveoxiderna som bildades vid det första steget här reduceras till kvävgas. I ett tredje steg har man ett litet luftöverskott för att få fullständig förbränning.

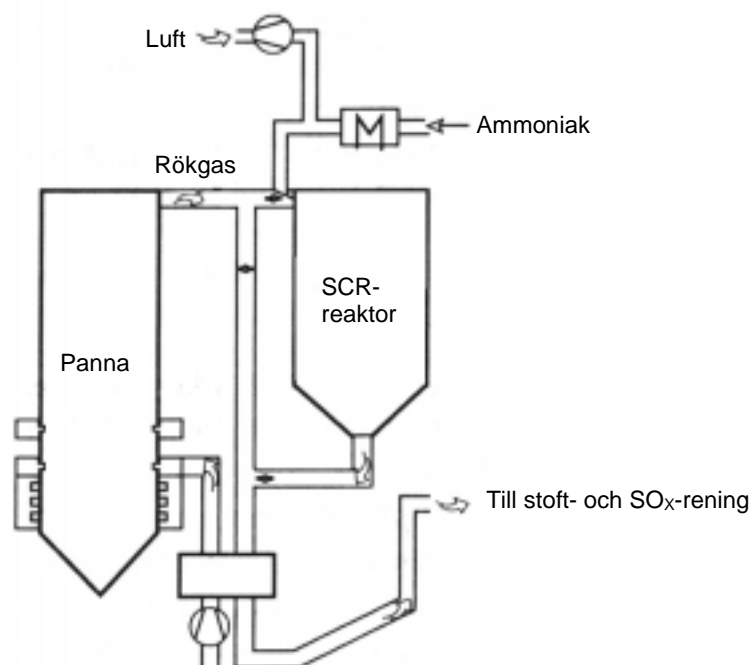
Förbränning i fluidiserade bäddar kan också ge en bättre situation för utsläppen. Det måste dock tydliggöras att varje bränsletyp har speciella egenskaper. Ett problem med en fluidiserad bädd är att det bildas högre halter av N_2O än vid andra förbränningstekniker.

Gasturbiner kopplade till en kombicykel, med avgaspanna och ångturbin, ger förhållandevis låga utsläpp. Detta beror dels på att gasen som förbränns i gasturbinens brännkammare måste renas av processtekniska själ.

Externa metoder för rening av rökgaser från kväveoxider, s.k. rökgasdenitrifiering eller de- NO_x , är ofta mer komplicerade och dyrare än förbränningstekniska åtgärder. Dessa metoder är dock i vissa fall nödvändiga och dessutom kan man få väldigt höga avskiljningsgrader med dessa tekniker. Det finns två dominerande metoder för extern rening av kväveoxid ur rökgaser. Dessa metoder är SCR-metoden (Selective Catalytic Reduction) och SNR-metoden (Selective Non-catalytic Reduction).

SCR-metoden

I denna metod reduceras kväveoxiderna, genom att man sprutar in ammoniak i rökgaserna, till kvävgas och vatten. Reaktionen sker i en s.k. reaktor där en katalysator används för att underlätta reaktionerna. Det finns dock nackdelar med SCR-metoden. Som nämnts tidigare är metoden dyr. Problem med katalysatorn kan uppkomma, då den t.ex. sätter igen eller förgiftas. Trots dessa nackdelar är detta ändå den mest pålitliga metoden och den kan ge 80–90 % reduktion av rökgasernas innehåll av kväveoxider [29]. Se figur 8.4 för en principskiss över SCR-metoden.



Figur 8.4 NO_x -reduktion genom SCR-metoden

SNR-metoden

Denna metod kallas även för termisk de-NO_x. Metoden liknar SCR-metoden, då en kemikalie sprutas in bland rökgaserna. Skillnaden är att i SNR-metoden används ingen katalysator utan reaktionen med de insprutade kemikalierna sker vid en bestämd temperatur, beroende på kemikalien. De vanligaste typerna av kemikalier som brukar användas är ammoniak och urea.

Metoden är mycket temperaturkänslig. Temperaturen då reaktionerna sker ligger vanligtvis runt 900 – 1100°C. Är temperaturen för låg sker ingen reduktion av kväveoxider och ifall temperaturen är för hög omvandlas istället tillsatt ammoniak till kväveoxid. Vid användning av urea bildas dessutom stora mängder dikväveoxid (lustgas), vilken är en växthusdrivande gas. SNR-metoden ger en måttlig kvävereduktion omkring 50–60 %. [29]

8.4.3 Åtgärder för lägre koldioxidutsläpp

Koldioxidutsläppen är idag en mycket uppmärksammas miljöfråga på grund av dess klimatförändrande och växthusdrivande egenskaper. Genom att välja rätt bränsle kan man minska dessa koldioxidutsläpp. De bränslen som uppges ge minskade koldioxidutsläpp är de bränslen som inte ger något nettotillskott av koldioxid till atmosfärens koldioxidlager (t.ex. biobränslen). Det är idag även möjligt att rena bort koldioxiden. Dessa metoder är dock så pass kostsamma idag att de inte anses vara realistiskt möjliga att nyttja. Det skall också påpekas att naturgas ger väsentligt lägre koldioxidutsläpp per producerad energienhet än övriga fossila bränslen.

8.4.4 Avfallsförbränning och rening

Idag är det allt vanligare att avfall används som bränsle vid energiproducering. Deponiskatter och andra miljöavgifter, samt det kommande förbudet mot att deponera brännbart avfall medför sannolikt att avfallsförbränningen kommer att öka inom de närmsta åren.

Avfallsförbränningen skiljer sig inte nämnvärt från förbränning av fasta och flytande bränslen i allmänhet. Det finns dock två stora skillnader. Den första stora skillnaden är att avfallet inte är något homogent bränsle och att förbränningen då sker långsammare. Den andra stora skillnaden är att vid förbränning av avfall bildas ofta fler miljöfarliga ämnen, då avfallet i sig ofta innehåller dessa.

Vid förbränning av avfall ställs det stora krav på reningsutrustning. Typ av reningsutrustning som krävs är elektrofiter, där flygaska och stoft kan avskiljas. En ekonomiser kan användas för att sänka temperaturen på rökgaserna. Ekonomisern fungerar som en extra värmekondensator som kopplas in mot t.ex. fjärrvärmenätet.

För att ytterligare kyla rökgaserna låter man dem passera genom en förkylare där vatten sprayas in.

I en tvättreaktor, där vatten recirkuleras, löser sig de sura gaserna i rökgaserna. Stoft, partiklar och tungmetaller fastnar i vattnet. Likaså fastnar dioxiner och andra föroreningar i vattenfasen.

Rökgaserna är efter tvättreaktorn vattenmättade, och förs vidare till en kondenseringsreaktor där temperaturen sänks ytterligare då vatten sprayas in. Vattenångan i gasen kondenserar ut och kyls sedan mot t.ex. fjärrvärmevattnet.

För att få en bra strömningsbild på utsläppen samt att förhindra ytterligare kondensation vid utloppet från skorstenen höjs temperaturen på avgaserna i ett sista steg.

Idag kombinerar man denna typ av reningsutrustning med rening av NO_x . T.ex. används SCR-metoden, som beskrivits i kapitel 8.4.2.1.

Det förorenade vattnet efter tvättreaktorn måste ledas till en vattenreningsanläggning för att rena bort föroreningar och till slut tillföra ett förtjockningsmedel som tillsammans med vattnet bildar ett slam. Slammet blandas med flygaska från elektrofiltret då denna blandning visat sig ha bra deponeringsegenskaper.

Även katalysatorer kan användas som ett reningssteg. Katalysatorn renar avgaserna från koloxid och kolväten genom att förbränna dessa till koldioxid och vatten.

9 BRÄNSLEN

9.1 NATURGAS

Naturgas är precis som olja och kol ett fossilt bränsle som har bildats i jordskorpan under miljontals år när djur och växter förmultnat. Den består i huvudsak av metan (85-99 %) och ger vid förbränning mer vatten och mindre koldioxid jämfört med andra tyngre kolväteföreningarna som olja och kol. Naturgasen är en färg- och luktlös gas som är lättare än luft och är det renaste av de fossila bränslena. Vid förbränning leder naturgasens renhet till väsentligt mindre utsläpp än vad olja, kol och bibränslen på grund av avsaknaden av svavel, stoft och tungmetaller. Den naturgas som används i Sverige idag kommer från naturgasfälten i Nordsjön och transporteras av egen kraft, s.k. självtryck, via rörledningar från Danmark till Sverige.

I Sverige förbrukades år 1998 9,3 TWh naturgas av 55 000 slutkunder i 26 kommuner och detta stod för 2 % av Sveriges totala energitillförsel. Av denna andel stod fjärr- och kraftvärmeverken för ca 40 % av den totala konsumtionen.

9.2 BIOGAS

Biogas delas in i deponigas och rötgas. Deponigasen utvinns från soptippar ur organiskt avfall och rötgasen utvinns ur gödselstackar och reningsanläggningar för avloppsvatten vid en sluten rötning av det organiska avfallet i en röttank. Precis som i en kompost så är det mikroorganismer som bryter ner materialet, men den stora skillnaden vid rötningen är att det sker under syrefria förhållanden.

Det som ger gasen energivärde är metangasen (CH₄) och andelen metangas kan variera mellan 40 och 80 % (vol). I biogas finns även koldioxid, mellan 20 och 40 % (vol), kväve och olika föroreningar i mindre mängder. Se tabell 9.1 nedan.

Tabell 9.1 Olika typer av biogas och dess innehåll [10]

Komponenter	Deponigas [vol %]	Rötgas, avloppsslam [vol %]	Rötgas, spill- vatten från industrin [vol %]	Rötgas, källsorterat från restaurang, storkök, hushåll [vol %]
Metan	45-55	60-70	70-80	60-70
Koldioxid	30-40	30-40	15-25	30-40
Kväve	5-15	0,2	spår	
Syre	0-2	spår	spår	
Väte	spår	spår	spår	spår
Svavelväte	50-300 ppm	<10 ppm	<10 ppm	600-1000 ppm
Högre kolväten	<100 ppm	<10 ppm	<10 ppm	

I Sverige finns idag inga speciella emissionskrav vid förbränning av deponigas i pannor, motorer, gasturbiner eller i facklor utan de gränsvärden som rekommenderas kommer från de tyska kraven, TA-luft (Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) för gaspannor. Dessa kan ses i tabell 9.2 och syrets beräkningsvärde anges i volymprocent.

Tabell 9.2 Emissionsgränsvärden i Tyskland enligt TA-luft. Syret anges i volymprocent.

Typ av anläggning	Gaspanna [mg/m ³ _n]	Gasmotor [mg/m ³ _n]	Gasturbin [mg/m ³ _n]
O ₂	3 %	5 %	15 %
Stoft	5	50/150*	2/4*
CO	100	650	100
NO _x	200	500	300/350*
SO _x	35	500	500
HCl	30	30	30
HF	5	5	5

* Vid rökgasvolymmer större/mindre än 60 000 m³/h

9.3 BIOBRÄNSLEN

När Miljöbalken antogs av Sverige 1999 förändrades definitionen av biobränsle. En del av det som kallats för biobränsle, t ex spill från sågverk, är idag att betrakta som avfall. Detta förklaras närmare under kapitel 9.6. Biobränsle är idag sådant trädbränsle som odlats i syfte att användas som biobränsle såsom energiskog och skogsbränsle. Energiskogen består av snabbväxande träarter, bl.a. Salix. Denna kan odlas på åkermark och det tar 4–5 år innan den första skörden kan tas. Därpå sker skörd med 3–5 års intervall under en tidsperiod av 25–30 år. Därefter måste odlingen förnyas. Skogsbränsle består av avverkningsrester som grenar, stubbar, toppar och småträd som inte tas tillvara som industriellt virke eller massa.

9.4 ELDNINGSSOLJA

Eldningsolja och diesel är petroleumprodukter och tillverkas av råolja. Olja är ett fossilt bränsle som bildats ur organiskt material som avlagrats på botten av sjöar och hav. Avlagringarna har sedan täckts med lera och har under miljoner år förvandlats till olja genom ett högt tryck och temperatur. Denna råolja pumpas sedan upp och förädlas i raffinaderier. Raffinaderiet producerar sedan en rad olika produkter, därav bl.a. eldningsolja och diesel.

Eldningsolja förekommer i flera olika kvaliteter och klassas efter viskositet. Eldningsolja 1, Eo1, har lägst viskositet och kallas för tunnolja. Eo1 kan även erhållas i tre miljöklasser där den avgörande skillnaden är svavelhalten. De övriga oljekvaliteterna, Eo3, Eo4, Eo5 och bunkerolja hör till gruppen tjockoljor och måste värmas före förbränning i industripannor och oljekraftverk.

9.5 DIESEL

Dieselolja är en blandning av olika kolväten och produceras, precis som eldningsolja, i raffinaderier. Den finns idag i ett flertal olika kvaliteter, miljöklass 1, 2 och 3, med olika krav på t.ex. svavelhalt. Användningen av dieselolja utgörs idag av cirka 90 % av miljöklass 1.

9.6 AVFALL

Nya lagar och förordningar, i Sverige och inom EU, kommer att förändra avfallsbranschen inom de närmaste åren. I samband med att miljöbalken trädde i kraft 1999 antog Sverige EU:s avfallsdefinition. Detta betyder att en del av det avfall som tidigare betraktats som biobränsle nu faller under avfallsdefinitionen. Införandet av deponiskatten och de kommande förbuden mot att deponera utsorterade brännbara fraktioner (2002) och organiskt avfall (2005) innebär att behovet av förbränningskapacitet markant kommer att öka den närmaste tiden. [38]

EU:s avfallsdefinition lyder enligt Miljöbalken (SFS 1998:808) kap 15 §1: ”Med avfall avses varje föremål, ämne eller substans som ingår i en avfallskategori och som innehavaren gör sig av med eller är skyldig att göra sig av med”. Till definitionen hör EWC-listan (European Waste Catalogue), som i Sverige är publicerad i Renhållningsförordningen. Enligt dessa är idag alla biobränslen avfallsklassade, utom det som har sitt ursprung i sådant som odlats med syfte att användas som biobränsle, dvs ren energiskog. Allt övrigt spill räknas som avfall och ska som utgångspunkt följa all avfallslagstiftning vad gäller prövning, miljökrav, transporter osv. Detta innebär att samma regler gäller för såväl rent sågspån som för farligt avfall. Detta har i sin tur medfört att det tillkommit vissa undantag och förslag till undantag. [38]

Att ett bränsle klassas som avfall innebär att det ska tillståndsprövas som avfall. I tabellen 9.3 kan gränserna för olika tillståndsprövningar ses och dessa jämförs med gränserna för biobränslen.

Tabell 9.3 Gränser för tillståndsprövning [38]

	Avfall [ton/år]	Biobränsle [MW]
Anmälan till kommunen	< 50	0,5-10
Tillstånd hos länsstyrelsen	50-100 000	10-200
Tillstånd hos miljödomstol	>100 000	>200

Tiden för att få ett tillstånd hos länsstyrelsen ligger i storleksordningen ett halvt års beredning samt ett halvt års hantering av myndigheter. Naturvårdsverket har gjort en utredning som för tillfället är ute på remiss, där de har föreslagit att anläggningar för energiåtervinning genom förbränning av rena avfallsfraktioner bestående av trä, flis, sågspån eller bark ej ska vara tillstånds- eller anmälningspliktiga som avfallsanläggningar, utan de ska prövas som energianläggningar.

Enligt EG-direktivet finns undantag för anläggningar som endast behandlar följande:

- Vegetabiliskt jord- och skogsbruksavfall
- Vegetabiliskt avfall från livsmedelindustrin om värmen återvinns
- Vegetabiliskt fiberhaltigt avfall vid pappersbruk som förbränns på plats och värmen återvinns
- Träavfall med undantag för sådant som kan innehålla organiska halogenföreningar eller tungmetaller som en följd av behandling med träskyddsmedel eller till följd av ytbehandlingar, särskilt träavfall från bygg- och rivningsavfall
- Korkavfall
- Radioaktivt avfall, sprängämnen, gruvavfall mm

Denna formulering ska nu tolkas och införas i svensk lagstiftning.

Även mellan de typer av avfallsbränsle som helt säkert omfattas av direktivet förekommer stora olikheter i grad av föroreningsinnehåll och homogenitet. Trots att alla dessa måste leva upp till samma utsläppskrav lämnar direktivet utrymme till lokala myndigheter att tillåta avsteg från hur anläggningsägaren ska visa att han lever upp till kraven och undantag kan medges för krav på kontinuerlig mätning på vissa parametrar, samt mätfrekvens för periodiska mätningar (dioxiner och tungmetaller). Det finns också möjligheter att ge undantag för vissa driftskrav, t ex på existerande anläggningar som med nuvarande driftsätt ändå klarar av att leva upp till alla utsläppsvärden.

9.7 GAS FRÅN TERMISK FÖRGASNING

Det finns två stycken tekniker, trycksatt eller atmosfärisk förgasning, där den gas som produceras kan användas till förbränning i en gasturbin.

9.7.1 Atmosfärisk förgasning

Om flis används som bränsle måste det först torkas och fukthalten ska efter detta vara omkring 10-20 %. Bränslet ska sedan segregeras och detta görs för att ta bort de största träflisorna, eftersom de tar längre tid att förgasa vilket sänker effekten. Bränslet matas in i en förgasare som består av en bubblande sandbädd. Luften som pressas in i sanden har en temperatur på 750-900 °C och kombinerat med en extremt liten lufttillförsel pyrolyserar bränslet. Med detta menas att flisen blir till aska men förbränns inte och den energi som blir kvar i bränslet blir till oförbrända gaser som består av koldioxid, metangas, vätgas, tyngre kolväten och tjärar. Av den ursprungliga energin som fanns i bränslet återstår nu cirka 90 % av energiinnehållet. Gasen avskiljs sedan från de större partiklarna i en cyklon och renas sedan ytterligare genom katalytisk rening. Avgaserna kan nu, efter trycksättning, förbrännas i en gasturbin. [28]

9.7.2 Trycksatt förgasning

Först torkas bränslet, precis som tekniken med den atmosfäriska förgasningen, till en fukthalt på 10-20 %. Därefter trycksätts bränslet före inmatningen till förgasaren för att förhindra att de avgaser som bildas inne i förgasaren inte ska sugas in i bränsleinmatningssystemet. Själva förgasaren är av typen cirkulerande bädd och drifttemperaturen är 950-1 000 °C. Bränslet pyrolyserar och renas från de större partiklarna i en cyklon. Gasen kyls sedan i en gaskylare till 350-400 °C och renas därefter i ett keramiskt hetgasfilter. Gasen är nu så ren att den kan förbrännas i en gasturbin. [28, 60]

9.8 BRÄNSLEPRISER

9.8.1 Naturgas

Det är svårt att nämna ett pris på naturgasen för stora förbrukare. Naturgasen följer traditionellt oljepriset och ligger lite under, men stiger oljepriset följer naturgasen med. Ibland tecknas långa kontrakt som gör att priset på naturgasen inte är lika bundet till oljan. Priset för naturgas med rådande bränsleskatter i Sverige ligger mellan 150-200 kr/MWh beroende av storlek. [42]

9.8.2 Biogas

Priset för orenad biogas från grödor ligger runt 200-600 kr/MWh.

9.8.3 Biobränslen

För närvarande är alla trädbränslen skattebefriade. Trädbränslepriserna i tabell 9.4 är inhämtade fritt förbrukare utan skatter och indelas i förädlade och oförädlade trädbränslen. Priser anges för värmeverk samt för industriförbrukare (ej intern användning) och utgör de genomsnittliga priserna för hela landet.

Tabell 9.4 Trädbränsle, kronor/MWh fritt förbrukare, löpande priser exklusive skatt [66]

Period	1997	1998	1999	2000				2000:01	2000:02	2000:03	2000:04
				Hela Sverige	Norra	Mellersta	Södra				
Förädlade trädbränslen: (briketter och pellets)											
Värmeverk	152	161	164	169	150	160	184	179	161	152	181
Skogsflis											
Industri	113	108	108	108	-	-	-	111	109	109	104
Värmeverk	113	115	115	112	106	115	111	114	109	108	112
Biprodukter											
Industri	75	69	81	70	-	-	-	73	76	64	67
Värmeverk	94	98	96	89	77	97	90	89	87	85	92
Returträ											
Värmeverk		69	78	69		68	74	72	69	69	67

9.8.4 Olja

Råoljepriserna har legat relativt stabilt under 1990-talet och idag ligger oljepriset på 20-25 USD/fat. I tabell 9.5 kan priserna för eldningsolja ses för anläggningar över 50 MW (exkl. skatter).

Tabell 9.5 Priser för eldningsolja för anläggningar över 50 MW (exkl. skatter) [6]

Olja	År 1995 [kr/MWh]	År 2000 [kr/MWh]	År 2010 [kr/MWh]
Eo1	99	120	132
Eo5	76	n.a.	94

n.a.=uppgifter saknas

9.8.5 Avfall

Att sätta ett pris på avfall är svårt eftersom priserna varierar beroende på vilken kvalitet som avfallet har när det anländer till avfallsförbränningsanläggningen och det är det företag som äger anläggningen som sätter priset när prover har tagits och analyserats. Priset brukar ligga runt 50 kr/MWh och detta motsvarar en intäkt för mottaget avfall av 150 kr/ton. [6]

9.9 ENERGISKATTER

Enligt gällande skatteregler betalas ingen skatt för bränsle som åtgår till elproduktion. För bränsle som åtgår till värmeproduktion i en kraftvärmeanläggning betalas hel koldioxidskatt och halv energiskatt. Energiskatterna i tabell 9.6 (allmän energiskatt, svavelskatt och koldioxidskatt) redovisas för olika bränslen och förbrukarkategorier. Alla biobränslen förutom råtallolja är obeskattade.

Tabell 9.6 Skatter på bränslen för värmeproduktion den 2001-01-01, avrundade värden [66]

Användare	Indu- stri					Övriga				
		Energi	CO ₂	Svavel	Totalt	kr/ MWh	Energi	CO ₂	Svavel	Totalt
Bränsleslag										
Eo 1 , [kr/m ³] (<0,1 % S)	-	529	-	529	53	743	1058	-	1801	182
Eo 5 , [kr/m ³] (<0,4 % S)	-	529	108	637	59	743	1058	108	1909	176
Naturgas , [kr/1000 m ³]	-	396	-	396	41	241	792	-	1033	106
Torv , [kr/ton] (0,24 % S, 45 % fukthalt)	-	-	40	40	15	-	-	40	40	15

9.9.1 Miljöavgift för NO_x

Enligt lagen 1990:613 skall en avgift betalas för utsläpp av kväveoxider från pannor, stationära förbränningsmotorer och gasturbiner med en nyttiggjord energiproduktion av minst 25 GWh/år. Pannor med ånga, hetvatten, varmvatten eller hetolja är avgifts- pliktiga. Kriteriet är att den producerade energin används för uppvärmning av bygg- nader, elproduktion eller industriella processer. Avgiften uppgår till 40 kr/kg utsläppta kväveoxider, räknat som kvävedioxid, och denna deklaration ska lämnas till Natur- vårdsverket senast den 25 januari varje år.

Detta system innebär att företag som släpper ut mindre kväveoxider än genomsnittet får tillbaka mer än de har betalat, eftersom det totala avgiftsbeloppet omfördelas bland dem som betalar in. Det inbetalda beloppet ska återbetalas i proportion till varje an- läggnings andel av den sammanlagda produktionen. [19]

9.10 EMISSIONSGRÄNSER

9.10.1 Emissionsgränser för svavel

Tabell 9.7 Svenska krav och riktlinjer för svavelutsläpp [5]

	Utsläpp [mg/MJ]	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 sva- velutsläpp < 400 ton	100	Årsmedelvärde. Krav.
Anläggningar med årligt sva- velutsläpp > 400 ton	50	Årsmedelvärde. Krav.
Nya anläggningar > 500 MW	30	Årsmedelvärde. Riktlinje.

9.10.2 Emissionsgränser för kväveoxider

Tabell 9.8 Svenska riktlinjer för kväveoxidutsläpp [5]

Anläggningstyp	NO _x [mg NO ₂ /MJ]
Nya anläggningar	
Anläggningar med årligt utsläpp < 300 ton NO ₂	100 - 200
Anläggningar med årligt utsläpp > 300 ton NO ₂	50 - 100
Anläggningar > 500 MW	300
Befintliga anläggningar	
Anläggningar med årligt utsläpp < 600 ton NO ₂	100 - 200
Anläggningar med årligt utsläpp > 600 ton NO ₂	50 - 100

Tabell 9.9 EU:s gränsvärden för kväveoxidutsläpp från nya anläggningar > 50 MW [21]

Bränsletyp	NO _x [mg/MJ]
Fasta	220 – 250
Flytande	125 – 130
Gasformiga	95

9.10.3 Emissionsgränser för stoft

Tabell 9.10 Krav från EU på maximala månadsmedelvärden för stoftutsläpp från nya anläggningar ≥ 50 MW

Bränsletyp	Tillförd effekt [MW]	Stoft [mg/MJ]
Fasta	50 – 500	20
Flytande	≥ 50	15
Gasformiga	≥ 500	1

Tabell 9.11 Allmänna råd för stoftutsläpp från fastbränsleanläggningar 0,5 – 10 MW [Källa: Allmänna råd 90:3, Naturvårdsverket]

Bränsle	Stoft [mg/m ³ n tg, 13% CO ₂]
Torv, träd- och andra biobränslen	
<i>I tätort</i>	100
<i>Utom tätort</i>	350

10 SLUTSATS OCH KOMMENTARER

De kraftvärmeteknologier som tagits upp i denna rapport kan egentligen delas upp i två grupper. Dessa grupper är indelade efter storleksordning, >30–40 MW_e och <30–40 MW_e.

För kraftvärmeproduktion på mer än 30–40 MW_e finns det idag några alternativ att välja mellan. Antingen ångpanna med ångturbin, gasturbin med avgaspanna eller hybridcykel med biobränsle och naturgas. Anläggningar av dessa typer klarar idag att komma upp i effekter på flera hundra MW_e.

För kraftvärmeproduktion på effekter lägre än 30–40 MW_e finns det en rad olika intressanta teknologier att välja mellan.

I följande kapitel presenteras egna funderingar om de olika kraftvärmeteknologierna.

10.1 ÅNGPANNA MED ÅNGTURBIN

Ångpanna med ångturbin är en gammal teknik med många års drift- och utvecklings erfarenheter. Det satsas fortfarande mycket utvecklingen av både ångpannor och ångturbiner. Bland annat satsas det mycket på utveckling av material som klarar av högre ångdata, men även på att utveckla och förbättra traditionella rostpannor för förbränning av framförallt avfall.

Det kommer med största sannolikhet att byggas fler ångturbinanläggningar för kraftvärmeproduktion i Sverige inom en överskådlig framtid. Förbränningen av biobränslen kommer att öka, men framförallt kommer det att ske ökning av avfallsförbränningen, vilket i synnerhet beror på de nya lagar som kommer att förbjuda deponi av brännbart avfall.

10.2 GASTURBIN MED AVGASPANNA

Gasturbinerna har gått från att bara användas som reservkraft till att användas som primära kraftvärmeproducenter. De har stora konkurrensfördelar jämfört med andra kraftvärmeslag. Gasturbiner och dess komponenter är idag väldigt avancerade och välutvecklade då det läggs stora resurser på utveckling av både näringsliv och högskolor, inte sällan med samarbete dem emellan. Investeringskostnaderna för en gasturbinanläggning är relativt låga i jämförelse med andra kraftvärmeanläggningar i samma storleksordning. Dessutom krävs inte lika mycket reningsutrustning som för t.ex. en ångturbinanläggning för att minska emissioner till dagens krav. Detta beror framförallt på de bra miljöegenskaper användningen av naturgas för med sig och på den låg-emissionsteknik som används i gasturbinens brännkammare.

När gasturbiner används i kombianläggningar, i kombination med ångturbin, fås väldigt höga verkningsgrader och alfavärden som få kraftvärmeslag kan mäta sig med. Detta gör gasturbinerna till en kraftvärmeteknologi med stora framtidsutsikter.

Även mikroturbiner är ett starkt alternativ i ett småskaligt perspektiv. Mikroturbinen kan vara intressant vid kraft- och värmeproduktion i flerbostadshus och för små bostadsområden. Emissionerna är låga, men den specifika investeringskostnaden är fortfarande något hög. När mikroturbinerna börjar produceras i stora serier kommer den specifika investeringskostnaden att sjunka. Detta kan i sin tur komma att leda till en ljus framtid för denna del av gasturbintekniken.

Det som bör nämnas är att det läggs mer tid och pengar på forskningen runt de större gasturbinerna än för de mindre. Detta är en ganska naturlig utveckling eftersom både verkningsgraderna och emissionerna är högre för de större gasturbinerna än för de mindre. Det är även lättare att kontrollera emissionerna från de större gasturbinerna eftersom tillhörande övervakningssystem oftast är väldigt avancerade. Dessa övervakningssystem finns inte för de mindre gasturbinerna och detta beror på att kostnaderna då hade blivit för höga. Om detta tas med i beräkningarna borde det satsas mer på större anläggningar där utsläppen lättare kontrolleras.

10.3 OTTO- OCH DIESELMOTOR

Det känns idag inte särskilt aktuellt att investera i nya kraftvärmeanläggningar av denna typ om inte den ska användas som reservkraft. Storleksordningen för kraftvärmeproduktion med denna teknik ligger runt 20–30 MW_e. Dieselmotorn är idag en välprövad, pålitlig och väldigt billig kraftvärmekälla jämfört med andra kraftvärmekällor som nämnts i denna rapport. Verkningsgraderna är genomgående höga men nackdelen med dessa motorer är de höga utsläppen av skadliga föroreningar. Men forskning pågår och utvecklingen går framåt av motorer med högre verkningsgrad och bättre miljöprestanda.

En intressant motor är dual-fuel-motorn, som kan använda både diesel och gas som bränsle. Används naturgas som bränsle fås lägre emissioner än vad som fås vid användning av diesel. Verkningsgraderna är något lägre för gasmotorn men miljöprestandan kompenserar detta.

Kan man minska emissionerna till en acceptabel nivå och fortfarande behålla den låga investeringskostnaden samtidigt som verkningsgraden ökar är det mycket möjligt att försäljningen av denna typ av motorer kommer att öka i framtiden. Dieselmotorerna kan idag inte konkurrera med gasturbinernas prestanda, vare sig det gäller miljöprestanda eller verkningsgrader. Men som reservkraft fungerar de väldigt bra, framförallt på grund av sin tillförlitlighet, och idag säljs många dieselmotorer för att fungera enbart som reservkraft.

De småskaliga maskiner som finns på marknaden, typ Senertec, kan möjligtvis bli ett intressant alternativ i ett framtidsperspektiv. Emissionerna är relativt låga och ny teknik som utvecklas för gasmotorer för med sig att emissionerna sjunker. Med dagens relativt låga elpriser känns det inte ekonomiskt motiverat att investera i en motor av denna Senertec-typen.

10.4 STIRLINGMOTOR

Stirlingmotorer finns redan tillgängliga på den kommersiella marknaden. Framförallt är det den tyska tillverkaren SOLO Kleinmotoren som ligger långt fram på detta område.

Stirlingmotorn är liten har en enkel konstruktion. Den har en flexibel bränslevariation där i princip vilket bränsle som helst kan användas tack vare att förbränningen sker utanför motorn. Detta medför även att stirlingmotorn har mycket bra miljöegenskaper. Dessa fördelar kan motivera ett större utnyttjande av denna typ av kraftvärmeteknologi i framtiden. Men med dagens relativt låga elpriser kan de småskaliga stirlingmotorerna visa på otillräcklig lönsamhet på den svenska marknaden.

10.5 BRÄNSLECELLER

Denna kraftvärmeteknologi är under ständig utveckling. I kraftvärmesammanhang kan bränsleceller, framförallt smältkarbonat- och fastoxidbränsleceller, komma att användas som kraftvärmeproducenter. Målet är att man ska få fram kraftvärmeanläggningar i storleksklassen 15–20 MW_e för att göra dem konkurrenskraftiga mot andra kraftvärmetyper.

Försök har visat att bränsleceller ger höga verkningsgrader och att hybridanläggningar med bränslecell och gasturbin kan ge elverkningsgrader på upp till 65 % samtidigt som emissionerna är minimala.

Problemen man brottas med nu är framförallt materialen till bränslecellerna och den höga tillverknings- och investeringskostnaden. Som det ser ut nu så blir svårt att få en utbredning på den svenska marknaden inom den närmsta framtiden.

10.6 GASKOMBIANLÄGGNING

Det finns idag företag som säljer gaskombianläggningar som hela turnkey-paket och det finns många sådana anläggningar, stora som små, runt om i världen. Försäljningen av dessa anläggningar kommer troligen att öka på grund av den låga investeringskostnaden, den höga verkningsgraden och det höga alfavärdet.

Den ständiga utvecklingen av gasturbinerna och dess kringkomponenter gör denna kraftvärmetyper till en mycket stark och konkurrenskraftig resurs som kan konkurrera med de flesta kraftvärmeanläggningar.

Hybridcykeln med biobränsle och naturgas känns som ett intressant alternativ vid utbyggnad av t.ex. befintliga ångturbinanläggningar. Detta mycket tack vare höga verkningsgrader och alfavärde samt dess bra dellastegenskaper.

11 REFERENSER

11.1 PUBLICERAT MATERIAL

- [1] Alvarez Henrik; *Energiteknik – Del 2*, Studentlitteratur 1990. ISBN 91-44-31481-7
- [2] Arrigada Jaime, Assadi Mohsen; *Advanced turbine systems (ATS)*. Lunds Tekniska Högskola 1999
- [3] Assadi Mohsen; *Gaskombianläggningar i Holland*. Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för värme- och kraftteknik. Mars 1998
- [4] Assadi Mohsen, Torisson Tord; *Moderna gaskombianläggningar*. LTH, Institutionen för värme- och kraftteknik. Oktober 1997
- [5] Bohlin Ann m.fl; *Miljökonsekvenser vid användning av naturgas, biobränslen, olja och kol*. ÅF-Energikonsult 4 december 1995.
- [6] Barring, Gustafsson, Nilsson m.fl.; *El från nya anläggningar*; Elforsk, rapport nr 00:01. Januari 2000.
- [7] Carlsen Henrik; *Status of small-scale power production based on Stirling engines*. Dept. for Energy Engineering, Technical University of Denmark.
- [8] Carlsen Henrik, Bovin Jonas; *Field test of 40 kW Stirling engine for wood chips*. 1997. ISEC-970073
- [9] Dahlin Sören; *Demonstration och utvärdering av SenerTec mikrokraftvärmeverk*, Rapport SGC 106. Februari 2000.
- [10] Dahlin Sören; *Gasteknik, VT 2001*. Malmö högskola-Teknik och samhälle. 2001-08-07
- [11] Danielsson Ebbe; *Motorer och kraftvärmeaggregat för naturgasdrift*. Nordiskt Gasteknisk Center. Juni 1991
- [12] Energimagasinet, nummer 2/2000, sida 24–26.
- [13] Halme Jyrki, Ekono Oy; *Gasturbinteknologi- Nuläge och utvecklingstrender*. Nordiskt Gasteknisk Center. Juli 1992
- [14] Johansson Anki; *Teknik och ekonomi för mikrokraftvärme*, Malmö Högskola – Teknik och Ekonomi, 1999.
- [15] Jordal Kristin; *Modeling and performance of gas turbine cycles with various means of blade cooling*. Maj 2001, ISSN 0282-1990

- [16] Karlsson, Gustavsson, Mårtensson, Leckner; *Analys av dagens bästa teknik för biobränsleeldade pannor mellan 0,5 och 10 MW*, Energimyndigheten ER 19:1998. ISSN 1403-1892
- [17] Laursen Allan; *Emissionsforhold og forureningsreducerende teknikker for gasmotor og turbinealaeg*. Dansk Gasteknisk Center. Juli 1995
- [18] Lundholm Gunnar; *Stirlingmotorn V4-275R som kraftvärmeaggregat för uppvärmning av större flerfamiljshus*. United Stirling, 1987.
- [19] Malmberg Mats; *Småskalig kraftvärme HT2000*, Malmö Högskola – Teknik och samhälle, 2000.
- [20] Morris Michael, Waldheim Lars; *Efficient power generation from wood gasification*. April 2000
- [21] Naturvårdsverket. SNFS 1994:8.
- [22] Naturvårdsverket. Allmänna råd 87:2.
- [23] Nilsson Mats; *Naturgasbaserad småskalig kraftvärme inom uppvärmningssektorn*. Rapport SGC 081. Februari 1997
- [24] Nilsson Tomas; *Mikrokraftvärmeverk med stirlingmotor*, Rapport SGC 080. Januari 1997.
- [25] Näslund Mikael; *Låg-NO_x-teknik för gasdrivna processer – Dagsläge*, Rapport SGC 076. Oktober 1996.
- [26] Näslund Mikael, Jönsson Owe; *Svensk högskoleförlagd energigasforskning*. Rapport SGC 097. December 1998
- [27] Pedersen Aksel Hauge; *Mikrogasturbiner*. Artikel ur danska Gasteknik nummer 2/2000.
- [28] Persson Mikael; *El- och värmeproduktion med förgasningsteknik*. Malmö Högskola, Teknik och Ekonomi. 1998
- [29] Persson Per Olof, Nilson Lennart; *Kompendium i miljöskydd, del 2 – Miljöskyddsteknik*; Kungliga Tekniska Högskolan, 1998. ISBN 91-630-5730-1
- [30] Pålsson Jens, Selimovic Azra; *Statusrapport år 2000: Teknik, mognad, Ekonomi för SOFC och Hybrid SOFC/GT system*. Lunds tekniska högskola, Institutionen för värme- och kraftteknik.
- [31] Rosén M. Per; *Evaporative Cycles – in Theory and in Practise*, Doctorial Thesis, Lund Institute of Technology. August 2000. ISBN 91-7874-078-9

- [32] Rydén Anette; *Teknikinventering av biobränsleeldade pannor 0,5–10 MW*, VärmeForsk 647, Stockholm 1998.
- [33] Svenskt Gastekniskt Center; *Energigasernas miljöeffekter - faktabok*, Rapport SGC 075. November 2000
- [34] Thunell Jörgen; *Utsläpp av oreglerade ämnen vid förbränning av olika bränslen – Litteraturstudie*, Rapport SGC 090. Juni 1998.
- [35] Uppenberg Stefan, Brandel Magnus, m.fl.; *Miljöfaktabok för bränslen. Del 1 – Huvudrapport*. Augusti 1999
- [36] Uppenberg Stefan, Brandel Magnus, m.fl.; *Miljöfaktabok för bränslen. Del 2 – Bakgrundsinformation och teknisk bilaga*. Augusti 1999
- [37] Vattenfall, Tekniska Verken i Eskilstuna, ABB Stal, Götaverken/Generator; *Kraftvärme*, 1989. ISSN 1100-5130
- [38] Värneforsk/Sycon, *seminarium "Biobränsle blir till avfall"*, 10 maj 2001, Malmö.

11.2 MUNTliga REFERENSER

- [39] Adams Neil, Sales Manager Scandinavia & Baltic States, Rolls-Royce plc
- [40] Bowen J John, Regional Sales Manager, Centrax Ltd - Gas Turbine Sales
- [41] Malmberg Mats, programledare på Energi- och Miljöteknik, Malmö Högskola; Fortlöpande samtal och diskussioner under våren 2001.
- [42] Norén Corfitz; Handledare på SGC; Tillhandahållet diverse material från Svenskt Gastekniskt Center AB.
- [43] Petrov Miroslav, doktorand vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Kontakt via e-mail den 14–16 juli 2001.
- [44] Pålsson Jens, doktorand vid Lunds Tekniska Högskola; Besök på Värme- och kraftinstitutionen, LTH i Lund, den 2/5 2001.
- [45] Pålsson Magnus, doktorand vid Lunds Tekniska Högskola; Besök på Värme- och kraftinstitutionen, LTH i Lund, den 21/5 2001.

11.3 INTERNETSIDOR

- [46] Ballard Power Systems, <http://www.ballard.com>
- [47] Energimyndigheten, <http://www.stem.se>
- [48] Eskilstuna kraftvärmeverk,
<http://www.eskilstuna-em.se/warm/kvvfakta.htm>
- [49] Fuel cell descriptions, <http://www.dodfuelcell.com/proton.html>
- [50] Fuel cell research strategy for Europe,
<http://www.eva.wsr.ac.at/opet/fcstrategy.htm>
- [51] Kristianstad kommun, *Biogas*,
<http://www.kristianstad.se/miljo/biogas/vad.asp>
- [52] Ny Teknik, <http://www.nyteknik.se>
- [53] Siemens, Products and Systems,
http://w4.siemens.de/kwu/e/produkte/komp_u_sys.htm
- [54] SOLO Kleinmotoren, <http://www.striling-engine.de/>,
<http://www.solo-germany.com/>
- [55] STM Power, <http://www.stmpower.com/>
- [56] Svebio, www.svebio.se
- [57] Svenska Gas Föreningen, www.gasforeningen.se
- [58] Sydgas, <http://www.sydgas.se>
- [59] Sysav, <http://www.sysav.se>
- [60] TPS Termiska Processer AB, www.tps.se
- [61] Turbec AB, <http://www.turbec.com/>
- [77] Sydkraft Värme Syd, <http://www.mv.sydkraft.se/4fjvfunk/anl1hel.htm>
- [78] Statens Energimyndighet,
<http://www.stem.se/web/pressmapp.nsf/8d88354fee1e0eb8c125697e002bd2ff/95693b9a2c73559cc1256b1b0035f9ec!OpenDocument>
- [79] Statens Energimyndighet,
<http://www.stem.se/web/pressmapp.nsf/2bfdabd3be78ccb8c125697e002bd761/aec4b0b37d7edbc1c1256b12002d24cd!OpenDocument>

- [80] Gas Online, http://130.235.81.124/gasonline/FMPro?-DB=Fegi.fp3&-Format=results_Notis2.htm&-SortField=Datum&-SortOrder=descend&-Lay=Test&-op=eq&Nummer=543&-Max=20&-Find

11.4 FÖRETAGS-, PRODUKT- OCH INFORMATIONSBROSCHY- RER

- [62] Alstom Power, *Produktionformation GTX100 och GT 10*
- [63] Energimyndigheten; *Kraftvärme från biobränsle*
- [64] Energimyndigheten; *Termiska processer för elproduktion*. 1999. ISSN 1403-1892
- [65] Energimyndigheten; *Termiska processer för elproduktion*. 2001.
- [66] Energimyndigheten; *Prisblad för biobränslen torv mm*. Nr 1/2001
- [67] Foster Wheeler; *Kraftvärmeverkspannor med fluidiserad bädd – Effektområden: panneffekt 10–100 MW, eleffekt 3–35 MW*.
- [68] HOTAB AB; *Information om biobränsleeldade pannor*, 2000.
- [69] KMW Energi; *Information om biobränslen och biobränsleeldade pannor*.
- [70] SOLAR Turbines, *Product information Mars, Saturn and Titan series*
- [71] Svenska Gas Föreningen; *Naturgas och biobränsle sida vid sida*
- [72] Sydkraft; *Gaskraft*
- [73] Sydgas; *Naturgas och biogas i samma ledning*
- [74] Sydgas; *Naturgas ur miljösynpunkt*
- [75] Sydgas; *Biogas-Energi och växtnäring från organiskt material*
- [76] B+V Industrietechnik; *Produkt- och informationsmaterial*

Bilaga 1 - Jämförelsetabeller över de olika kraftvärmeteknologierna

Teknologi	Gasmotor	Stirlingmotor	Stirlingmotor	Mikroturbin	Bränslecell	Diesel-gasmotor	Gasturbin	Diesel-gasmotor
Beteckning	SenerTec SACHS 5,5	SOLO 161		Turbec T100	Hybrid SOFC/GT	Jenbacher JMS156GS	Solar Saturn 20	Wärtsilä 18V200
Bränsle	Naturgas	Naturgas	Naturgas	Naturgas	Naturgas	Naturgas	Naturgas	Diesel
Eleffekt	5,24 kW	4–9 kW	≤ 10 kW	100 kW	223 kW	143 kW	1,2 MW	3,5 MW
Värmeeffekt	12,7 kW	12–25 kW	n.a.	167 kW	n.a.	207 kW	2,85 MW	5,1 MW
Elverkningsgrad	24,8 %	24 %	25 %	30 %	51 %	35,8 %	24,5 %	41,7 %
Totalverkningsgrad	85,6 %	89–99 %	90 %	80 %	n.a.	87,5 %	82,5 %	85 %
Alfavärde	0,41	0,32–0,37	0,38–0,39	0,60	n.a.	0,69	0,42	0,96
Specifik investeringskostnad (kr/kW _e)	29 000	18 000	n.a.	6 000*	10 000 - 15 000**	4 000	3 000 – 3600	4 000
Drift- och underhållskostnader (fast årlig, % av investering)	n.a.	6 %	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
NO _x -utsläpp [mg/MJ]	69,5	24	10	25,5	≈ 0	530 mg/m ³	69	1 350 mg/m ³
SO _x -utsläpp [mg/MJ]	-	-	-	-	-	-	-	n.a.
CO-utsläpp [mg/MJ]	< 2	15	-	15,5	n.a.	1 290 mg/m ³	64 mg/m ³	128 mg/m ³
UHC-utsläpp [mg/MJ]	25,5	0	0	6	-	n.a.	n.a.	105 mg/m ³
Stoftutsläpp [mg/MJ]	-	-	-	-	-	-	-	5 140 mg/m ³

* Endast mikroturbinpaketet

** Prismålsättning

n.a. = uppgift saknas

Teknologi	Diesel-gasmotor	Gasturbin	Ångcykel	Ångcykel	Ångcykel	Ångcykel	Ångcykel	Gasturbin Kombicykel	Ångcykel
Beteckning	MAN B&W 10K60MC	Rolls-Royce RB211-6761						ABB-Alstoms	
Bränsle	Diesel	Naturgas	Naturgas	Biobränsle	Avfall	Biobränsle	Avfall	Naturgas	Naturgas
Eleffekt	18,9 MW	29,9 MW	10 MW	10 MW	16 MW	30 MW	30 MW	62 MW	100 MW
Värmeeffekt	n.a.	40 MW	??	31 MW	65 MW	81 MW	95 MW	n.a.	162
Elverkningsgrad	48 – 50 %	38,1 %	20–30 %	20–30 %	20–30 %	20–30 %	20–30 %	54 %	20–30 %
Totalverkningsgrad	n.a.	80,9 %	80–85 %	80–85 %	80–85 %	80–85 %	80–85 %	> 80 %	80–85 %
Alfavärde	n.a.	0,74	0,4–0,5	0,32	0,36	0,37	0,32	1-1,3	0,62
Specifik investeringskostnad (kr/kW _e)	4 000	3 300	10 000 – 11 000	19 100	50 000**	14 500	40 000	5 000 – 7 000	10 000 – 11 000
Drift- och underhållskostnader (fast årlig, % av investering)	n.a.	n.a.	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 – 4 %	2 %
NO _x -utsläpp [mg/MJ]	2 500 mg/m	< 50 mg/m ³	30–60	40–300**	50***	40–300**	50***	< 30	30–60
SO _x -utsläpp [mg/MJ]	n.a.	-	< 0,2	10	30	10	30	-	< 0,2
CO-utsläpp [mg/MJ]	117 mg/m ³	< 30 mg/m ³	13	< 15 – < 90	n.a.	< 15 – < 90	n.a.	n.a.	13
UHC-utsläpp [mg/MJ]	n.a.	< 2 mg/m ³	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Soft-utsläpp [mg/MJ]	173 mg/m ³	-	-	< 15	5	< 15	5	-	-

* Med SNR-rening sänks nivån till < 50 mg/MJ

** Inkl. reningsutrustning

*** Med SNR-rening

n.a. = uppgift saknas



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