

Förgasning

- Status och teknik



Jörgen Held, Svenskt Gastekniskt Center AB

Juli 2011

Omslagsbild: Förgasningsanläggningen i Oberwart, Österrike.

SGC:s FÖRORD

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

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt 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:

Energigas Sverige, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Dansk Gasteknisk Center A/S
Elforsk AB
Energimyndigheten AB
E.ON Gas Sverige AB
Eskilstuna Energi och Miljö AB
Göteborg Energi AB
Lunds Energikoncernen AB
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Stockholm Gas AB
Vattenfall AB
Öresundskraft AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

SAMMANFATTNING

Rapporten behandlar förgasnings- och gasreningstekniker för bibränslen. Syftet med förgasning är att förädla bränslet så att det kan användas för effektiv el- och värmeproduktion, som drivmedel eller som insatsråvara i industriella processer. Fokus ligger på framställning av syntesgas som kan användas för produktion av drivmedel samt gas som kan användas för kraftvärmeproduktion. Beroende på användningsområde är olika förgasartyper, förgasningstekniker och processbetingelser aktuella.

Vid framställning av syntesgas från bibränslen har två förgasningstekniker identifierats som lämpliga, i huvudsak beroende på att de ger en gas ut från förgasaren som är fri från kväve; **Indirekt atmosfärisk förgasning** och **Trycksatt syrgasblåst förgasning**

Vid framställning av gas för kraftvärmeproduktion finns inget krav på att gasen ska vara fri från kväve och för sådana tillämpningar är även **Luftblåst förgasning** aktuell.

När det gäller gasrening är det, i första hand, hantering av tjäror och svavel som utgör utmaningen. Här finns det olika koncept och alternativ. Några bygger på konventionell teknik med färdigutvecklade komponenter som finns kommersiellt tillgängliga, medan andra, mer fördelaktiga lösningar, kräver fortsatt utveckling.

Rapporten tar även i viss mån upp omvandling (syntetisering) av syntesgas till syntetiska bränslen/drivmedel.

Det pågår omfattande forskning och utveckling av förgasningsteknik på såväl nationell som internationell nivå. Även om många processkoncept och delkomponenter har demonstrerats så finns det fortfarande ingen fullskalig anläggning för framställning av syntetiska bränslen/drivmedel baserad på bibränslen. De projekt som kommit längst är:

- EU-projektet *Bio-SNG*. Framställning av metan som drivmedel via förgasning av träflis har demonstrerats i Güssing, Österrike. Anläggningen är baserad på indirekt förgasningsteknik. Förgasaren är på 8 MW_{th} medan metaniseringsenheten har en kapacitet på 1 MW. I direkt anslutning till anläggningen har en tankstation för metan byggts. Den invigdes den 24 juni 2009.
- Inom GoBiGas-projektet planeras det för en anläggning i industriell skala i Göteborg. I en första etapp ska en anläggning på 20 MW, baserad på indirekt förgasning, byggas. Förgasningstekniken kommer från Repotec medan tekniken för gasrening och metanisering kommer från Haldor Topsoe. I en andra etapp planeras ytterligare en anläggning på 80 MW. Projektägare är Göteborg Energi AB (80 %) och E.ON (20 %).

- I Freiberg, Tyskland arbetar Choren vidare med sin patenterade Carbo-V® process för framställning av syntetisk diesel via Fischer-Tropsch-syntes. Byggandet av en kommersiell anläggning, med en kapacitet om 15 000 ton/år har blivit försenat i omgångar, nu senast på grund av en ombyggnation relaterad till säkerhetsaspekter. Det planeras för en anläggning i stor industriell skala, 250 miljoner liter/år, i tyska Schwedt. Volkswagen och Daimler är strategiska intressenter.
- I Piteå har svartlut förgasats i en pilotanläggning på 3 MW_{th} vid Energitekniskt Centrum (ETC). Tekniken har utvecklats av Chemrec. Testerna från pilotanläggningen har fallit väl ut och en produktionsanläggning där syntesgas syntetiseras till DME har byggts. Kapaciteten är 4-5 ton DME/dygn. Syntetiseringen görs med teknik från Haldor Topsoe. Volvo har 14 lastbilar som går på bio-DME i fältprov medan Preem har fått i uppdrag att bygga fyra tankstationer för DME. Det planeras även för en anläggning i industriell skala vid bioraffinaderiet Domsjö Fabriker i Örnsköldsvik. Anläggningen beräknas få en kapacitet på 100 000 ton/år.

Vidare finns det anläggningar som via förgasning av biobränslen producerar el och värme med gasmotorer eller förser industriella processer med ett rent bränsle. Kravet på bränslet är inte lika stort vid stationär drift som vid framställning av drivmedel för fordon och därför är även luftblåsta förgasare aktuella:

- Harboøre, Danmark. Luftblåst uppströmsförgasare (updraft) med tjäravskiljning tillverkad av Babcock & Wilcox Vølund. Anläggningen är på 3,5 MW_{th}. Produktgasen används för elproduktion i två gasmotorer från Jenbacher. Elverkningsgraden, η_{el} uppmättes till 27-29 % vid prestandaprov.
- Lahti, Finland. Luftblåst CFB-förgasare, med en kapacitet på 40-70 MW_{th}, där den producerade gasen förbränns tillsammans med pulveriserat kol i en panna. El och värme produceras via konventionell ångteknik (ångdata 540 °C och 170 bar).
- Skive, Danmark. Luftblåst BFB-förgasare med tjärkracker och elproduktion via tre gasmotorer (Jenbacher). Carbona (Finland) står för förgasningsteknologin. Anläggningen är på 20 MW_{th} och 6 MW_{el} ($\eta_{el} = 32 \%$).
- Oberwart, Österrike. Indirekt förgasning och elproduktion via två gasmotorer (Jenbacher) och en ORC (Organic Rankine Cycle). Anläggningen är på 8,5 MW_{th} och 2,8 MW_{el} ($\eta_{el} = 32 \%$).
- Värö Bruk, Sverige. CFB-förgasare på 28 MW_{th} levererad av Götaverken (numera Metso Power). Har varit i drift sedan 1987. Råvaran utgörs av bark och den producerade gasen används för att ersätta olja i mesaugnen.

Byggandet av anläggningar i kommersiell skala, för produktion av syntetiska bränslen/ drivmedel eller för el- och värmeproduktion från biobränsle, är behäftat med både tekniska och ekonomiska risker.

Faktorer som påverkar är val av teknik, anläggningens storlek, driftbetingelser, möjlighet till processintegrering, tillgång till råvara, avsettningsmöjligheter, styrmedel etc.

Ökad konkurrens om biobränslen leder ofrånkomligen till en högre råvarukostnad. Detta i sin tur innebär att drivmedelskedjor med hög verkningsgrad, såsom biometan via förgasning och metanisering, gynnas. Ju lägre investeringskostnad, desto lägre ekonomisk risk. Detta talar för att tekniker som är relativt kostnadseffektiva i den mindre skalan, initialt kan komma att gynnas. I takt med teknikutveckling och erfarenhetsuppbyggnad lär anläggningarnas storlek öka.

SUMMARY

In this report gasification and gas cleaning techniques for biomass are treated. The main reason for gasifying biomass is to refine the fuel to make it suitable for efficient CHP production, as vehicle fuel or in industrial processes. The focus is on production of synthesis gas that can be used for production of vehicle fuel and for CHP production. Depending on application different types of gasifiers, gasification techniques and process parameters are of interest.

Two gasification techniques have been identified as suitable for syngas generation, mainly due to the fact that they allow the production of a nitrogen free gas out of the gasifier; **Indirect atmospheric gasification** and **Pressurized oxygen-blown gasification**

For CHP production there are no restrictions on the gas composition in terms of nitrogen and here air-blown gasification is of interest as well.

The main challenge when it comes to gas cleaning is related to sulphur and tars. There are different concepts and alternatives to handle sulphur and tars. Some of them is based on conventional techniques with well-proven components that are commercially available while others more advantageous solutions, still need further development.

The report deals to a minor extent with the conversion of syngas to synthetic fuels.

The ongoing research and development of gasification techniques is extensive, both on national and international level. Although many process concepts and components have been demonstrated, there is still no full-scale plant for the production of synthetic fuels based on biomass. The projects that have reached furthest are:

- The EU-project *Bio-SNG*. Production of biomethane as vehicle fuel through gasification of wood chips has been demonstrated in Güssing, Austria. The plant is based on indirect gasification. The gasifier has a capacity of 8 MW_{th} while the methanation unit has a capacity of 1 MW. A filling station for biomethane, inaugurated 24 June 2009, has been built in direct vicinity of the plant.
- In the GoBiGas-project an industrial scale plant, 20 MW in a first stage, is planned, in Gothenburg. The gasification technology is provided by Repotec and the gas cleaning and methanation technology by Haldor Topsoe. In a second stage an 80 MW plant is planned. Stakeholders are Gothenburg Energy (80 %) and E.ON (20 %).

- In Freiberg, Germany Choren continues to work with its patented Carbo-V® process for production of synthetic diesel via Fischer-Tropsch-synthesis. The commissioning of a commercial plant, with a capacity of 15 000 tonnes/year has been delayed several times. The last time due to a redevelopment related to safety aspects.
A plant in large industrial scale, 250 million liters/year, is planned to be built in Schwedt, Germany. Volkswagen and Daimler are strategic stakeholders.
- In Piteå black liquor has been gasified in a pilot plant, 3 MW_{th}, at Energitekniskt Centrum (ETC). The technology is developed by Chemrec. The tests in the pilot plant have been successful and a plant where the syngas is synthesised to DME has been built. The capacity is 4-5 tonnes DME/day. The synthetisation technology is provided by Haldor Topsoe. Volvo has 14 bio-DME trucks in field test while Preem is expected to build four filling stations for DME. An industrial scale plant, with a capacity of 100,000 tonnes/year, is planned to be built at the biorefinery Domsjö Fabriker in Örnsköldsvik.

Furthermore, there are plants that, through gasification of biomass, produce electricity and heat or provide industrial processes with a clean fuel. The gas composition is normally not as critical in stationary applications as in the production process of synthetic fuels for the transportation sector and therefore airblown gasification is of interest as well:

- Harboøre, Denmark. Airblown updraft gasifier with tar separation supplied by Babcock & Wilcox Vølund. The plant has a capacity of 3,5 MW_{th}. The product gas is used for electricity production in two gas engines supplied by Jenbacher.
The measured electric efficiency, η_{el} was 27-29 % in the performance test.
- Lahti, Finland. Airblown CFB-gasifier, with a capacity of 40-70 MW_{th}, where the produced gas is combusted together with pulverized coal in a boiler. Electricity and heat are produced through the conventional steam cycle (admission data 540 °C and 170 bar).
- Skive, Denmark. Airblown BFB-gasifier with a tar cracker and electricity production through three gas engines (Jenbacher). Carbona (Finland) has provided the gasification technology.
The plant is designed for a capacity of 20 MW_{th} and 6 MW_{el} ($\eta_{el} = 32 \%$).
- Oberwart, Austria. Indirect gasification and electricity production through two gas engines (Jenbacher) and an ORC (Organic Rankine Cycle). The plant has a capacity of 8,5 MW_{th} and 2,8 MW_{el} ($\eta_{el} = 32 \%$).
- Värö Bruk, Sweden. The CFB-gasifier with a capacity of 28 MW_{th} was delivered by Götaverken (now Metso Power). The plant has been in operation since 1987. Bark is used as feedstock and the produced gas is used as oil replacer in the lime kiln.

The building of commercial scale plants for production of synthetic fuels or CHP through gasification of biomass is associated with technical and economical risks

Factors affecting the choice of technology are plant size, operating conditions, the possibility for process integration, access to feedstock, market aspects, incentives and economic instruments etcetera.

Increased competition for biofuels will inevitably lead to higher raw material costs. This in turn means that the fuel chains with high efficiency, such as biomethane through gasification and methanation, are favored. The lower the investment cost, the lower the financial risk. This implies that techniques that are relatively cost-effective in the smaller scale, may benefit initially. As the technology develops and experience is built up the plant size will increase.

INNEHÅLL

Sammanfattning	i
Summary	iv
Innehållsförteckning	vii
1. Inledning	1
1.1 Terminologi	1
1.2 Fördelar med förgasning	2
1.3 Val av förgasningsteknik	3
2. Beskrivning av olika förgasare och förgasningstekniker	4
2.1 Fastbäddförgasare	4
2.1.1 Medströmsförgasare	4
2.1.2 Motströmsförgasare	5
2.2 Suspensionsförgasare	6
2.3 Fluidiserad bädd-förgasare	7
2.4 Indirekt förgasning	8
2.5 Flerstegsförgasning	10
3. Beskrivning av olika gasreningskoncept	12
3.1 Högtemperaturfilter	12
3.2 Tjärvskiljning/krackning	13
3.3 Svavelrening	14
3.4 Skift och syntetisering	15
3.5 Slutkonditionering	16
4. Status	17
4.1 Kraft- och värmeproduktion	17
4.2 Drivmedelsframställning	17
4.3 Kommersiella anläggningar	18
5. Marknadsposition och ekonomi	20
5.1 Exempel på leverantörer	20
5.2 Ekonomi	21
6. Lista med länkar för mer information	22
Litteratur	25
Referenser	26

1. INLEDNING

Denna rapport är gjord av Svenskt Gastekniskt Center AB inom ramen för projekt ”Teknikbevakning och kommunikation - förgasning och metanisering”.

Rapporten är ett resultat av den teknikbevakning SGC genomför i form av besök vid pilot-, demonstrations- och referensanläggningar, litteraturstudier, deltagande i olika expert- och referensgrupper, gransknings- och reviewuppdrag, seminarie- och konferensverksamhet samt information via det nätverk SGC systematiskt byggt upp inom området.

Rapporten är på intet sätt heltäckande utan är mer att betrakta som ett nedslag i den teknikutveckling SGC kommit i kontakt med under de senaste åren.

1.1 TERMINOLOGI

Det finns ett stort antal specialuttryck och förkortningar inom förgasningsområdet. Ibland finns det ingen enhetlig definition och uttrycken används med varierande betydelse. Nedan listas ett antal uttryck och förkortningar, och vilken innebörd som lagts i dessa, i den här rapporten.

Biobränsle	Bränsle framställt från biomassa. Det material som bränslet utgörs av kan ha omvandlats kemiskt eller biologiskt och ursprungligen haft en annan användning.
Biomassa	Material av biologiskt ursprung som inte, eller endast i mindre utsträckning, har genomgått kemisk eller biologisk omvandling.
Biometan	En gas eller gasblandning som i huvudsak består av metan och är framställd från biomassa.
Bio-SNG	En gas av en kvalitet som kan ersätta naturgas. Förledet bio, indikerar att gasen framställts från förnybar råvara (biomassa).
Syntesgas	En gas bestående av vätgas, H ₂ , och kolmonoxid, CO
BFB (Bubbling Fluidised Bed)	Bubblande fluidiserad bädd. Bädden, bestående av bränsle och bäddmaterial (ofta sand), fluidiseras genom att luft eller ånga blåses upp genom bädden underifrån.

CFB (Circulating Fluidised Bed)	Cirkulerande fluidiserad bädd. Den höga fluidiseringshastigheten gör att bränslepartiklar och bäddmaterial följer med produktgasen ut ur förgasaren. Dessa avskiljs i en cyklon och återförs (cirkuleras) till bädden.
CHP (Combined Heat and Power)	Samtidig produktion av kraft- och värme.
DME	Dimetyleter. Kemisk sammansättning CH_3OCH_3 .
FT (Fischer-Tropsch)	FT-processen uppfanns av Franz Fischer och Hans Tropsch på 1920-talet. Syntesgasen får reagera katalytiskt och bildar då alkaner (paraffiner) och alkener (olefiner).
IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)	Kombicykel med en integrerad förgasare. Gasen från den integrerade förgasaren eldas i gasturbinens brännkammare. Värmen från de heta avgaserna ut från gasturbinen utnyttjas sedan i en ångcykel.
SNG (Substitute Natural Gas)	En framställd gas av naturgaskvalitet. Kan t.ex. framställas genom förgasning och metanisering av brunkol. Bio-SNG indikerar att biomassa använts som råvara.

1.2 FÖRDELAR MED FÖRGASNING

Förgasning är ett sätt att höja kvaliteten och värdet på råvaran. Biomassa med ett lågt eller till och med negativt värmevärde kan via förgasning omvandlas till ett högkvalitativt drivmedel för transportsektorn, bränsle för effektiv el- och värmeproduktion och råvara till kemiska processer.

Det finns flera fördelar med att omvandla fasta biobränslen till ett gasformigt biobränsle via förgasning

- Bränslen i gasform medger ledningsbunden distribution och tillgång till den marknad som byggts upp med hjälp av naturgas.
- Enklare styrning och reglering av förbränningsprocessen med bränsle i gasfas.
- Ren förbränning av gasen. Det är en fördel att rena produktgasen från förgasaren jämfört med rökgasen från en fastbiobränsleanläggning på grund av mindre gasvolym (rökgasen innehåller en stor andel kväve).
- Bränslen i gasform kan användas i gasmotorer och gasturbiner med högre elverkningsgrad jämfört med konventionell ångcykelteknik.
- Syntesgas kan användas för syntetisering till drivmedel eller framställning av kemiska produkter såsom ammoniak, gödningsmedel, plaster, färg etc.

1.3 VAL AV FÖRGASNINGSTEKNIK

I den här rapporten behandlas olika typer av produktgas ut från förgasaren. Val av förgasningsteknik och processparametrar beror på önskad slutprodukt.

- För syntetisering till andra kolväten än metan, t.ex. metanol, DME och FT-diesel är det önskvärt med en syntesgas som är fri från både kväve och metan. Kväve kan undvikas genom att ren syrgas används som oxidationsmedel. Hög förgasningstemperatur, $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, borgar för att både tjäror och metan krackas vilket bidrar till ökad andel H och CO i gasen. Det är just H och CO som är utgångsmaterial för syntetiseringen. Syntesgasens värmevärde ligger normalt kring ca 20 MJ/Nm^3 .
- För syntetisering till metan är det önskvärt med en syntesgas fri från kväve men med så hög halt av metan som möjligt. Syntetisering till metan är en exoterm (värmeavgivande) process och ju mindre andel av gasen som behöver syntetiseras, desto effektivare blir processen. Låg förgasningstemperatur, $< 850\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, bidrar till hög halt av metan i förgasaren.
- För el- och värmeproduktion finns det inget krav på att produktgasen ska vara fri från kväve och normalt används luftblåsta förgasare. Värmevärdet hamnar då på ca 5 MJ/Nm^3 eftersom den tillsatta luftens kväve späder ut produktgasen¹.

2. BESKRIVNING AV OLIKA FÖRGASARE OCH FÖRGASNINGSTEKNIKER

Det finns en mängd olika typer av förgasare och förgasningstekniker och de kan kategoriseras och benämnas på olika sätt. I detta kapitel går olika förgasare och förgasningstekniker igenom på en relativt generell nivå.

2.1 FASTBÄDDSFÖRGASARE

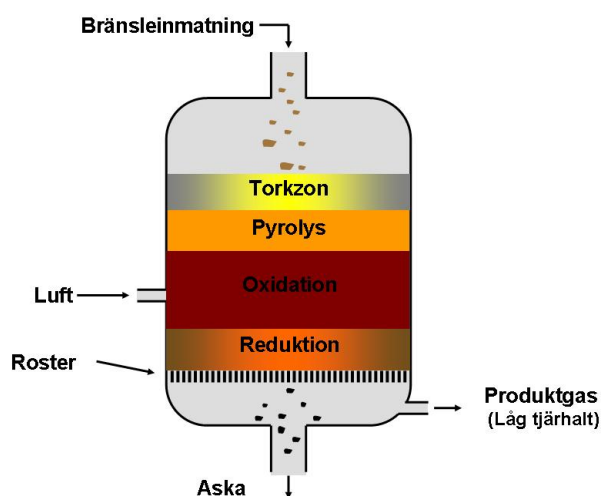
Fastbäddsförgasare där bränslebädden vilar på ett roster (galler) kan i sin tur indelas i olika kategorier varav två behandlas här; medströmsreaktor och motströmsreaktor.

I båda fallen matas bränslet in i toppen av reaktorn medan produktgasen tas ut i botten av reaktorn i en medströmsreaktor respektive i toppen av reaktorn i en motströmsreaktor. Bränslet rör sig nedåt i bädden p.g.a. gravitationen i takt med att bränslet ”konsumeras”. Uppehållstiden för bränslet är lång och gashastigheten låg. Bränslet bör ha en viss grovhet för att garantera en homogen gasfördelning i reaktorn. Snedfördelning kan innebära lägre kolutbränning i vissa zoner och överhettning i andra zoner.

Gengasaggregaten som användes under andra världskriget var ofta medströmsförgasare. Svenska uppfinnare² som Källe och Hedlund bidrog till utvecklingen av vedeldade gengasaggregat. Trots att aggregaten förfinades och utvecklades, skrotades i princip alla aggregat så fort kriget upphörde och bensin blev tillgänglig igen.

2.1.1 Medströmsförgasare

På engelska kallas medströmsförgasare för co-flow eller downdraft gasifier. På svenska kan även benämningen nedströmsreaktor förekomma då produktgasen strömmar nedåt. Biobränslet matas in i toppen av reaktorn och produktgasen lämnar reaktorn i botten.



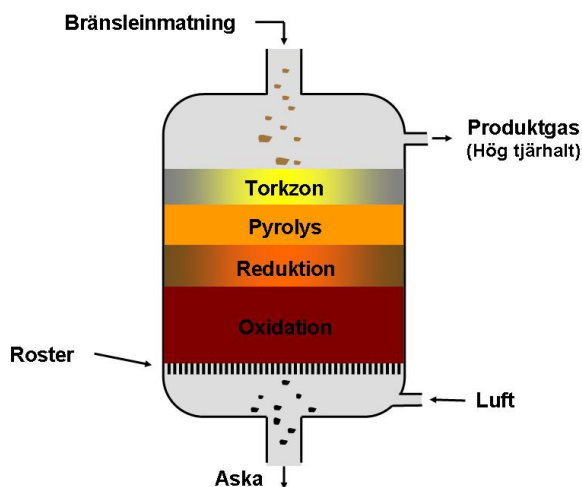
Figur 1. Schematisk bild över en fastbäddsförgasare av typen medströmsreaktor.

Fördelen med medströmsreaktorn är den relativt låga tjärhalten. Anledningen till detta är att tjäran passerar den varma delen av reaktorn där den sönderdelas (krackas). Vid låga laster sjunker temperaturen i reaktorn och tjärhalten i produktgasen ökar. Vid hög belastning är visserligen tjärhalten låg men andelen askpartiklar som dras med av gasens högre genomströmningshastighet ökar. Produktgasen som lämnar förgasaren har en relativt hög temperatur (ca 700 °C), vilket bidrar till en låg förgasningsverkningsgrad.

2.1.2 Motströmsförgasare

På engelska kallas motströmsförgasare counter-flow eller updraft gasifier. På svenska kan även benämningen uppströmsreaktor förekomma då produktgasen strömmar uppåt. Biobränslet matas in i toppen av reaktorn och luften tillförs i botten. Produktgasen lämnar reaktorn i toppen

I en motströmsreaktor bildas oundvikligen stora mängder tjära. VTT och BIONEER i Finland gjorde på mitten av 80-talet omfattande tester avseende tjärhalten för olika bränslen³. För träflis uppges en tjärhalt på 50 – 100 g/Nm³, vilket kan jämföras med tjärhalten i en medströmsförgasare som är i storleksordningen 500 – 1000 gånger lägre. En fördel med motströmsreaktorn är att den inte är så känslig för höga fukthalter i bränslet då det inkommande bränslet torkas av den utgående produktgasen. Detta medför också att motströmsförgasare generellt har en hög förgasningsverkningsgrad.



*Figur 2. Schematisk bild över en fastbäddsförgasare av typen **motströmsreaktor**.*

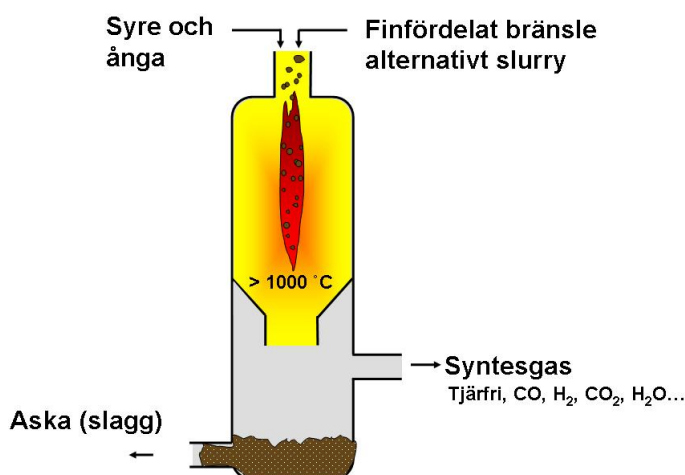
För båda koncepten gäller dock att fastbäddsförgasare inte lämpar sig särskilt väl för uppskalning på grund av risk för stråkbildning i förgasaren (ojämn gasfördelning). Frontline Bioenergy nämner 1 – 1.5 MW som en praktisk övre storlek för medströmsförgasare. När det gäller motströmsförgasare finns det anläggningar på 4 – 6 MW_{th}. BIONEER levererade 8 anläggningar med en kapacitet av 4 – 5 MW till Sverige och Finland under mitten av 80-talet. FosterWheeler byggde 1996 en 6,4 MW anläggning i Ilomantsi, Finland.

Tabell 1. Karakteristik för fastbäddsförgasare⁴

	Medströms-förgasare	Motströms-förgasare
Bränsle		
- Fukthalt (% fuktigt bränsle)	12 (max 25)	43 (max 60)
- Askinnehåll (% fuktigt bränsle)	0,5 (max 6)	1,4 (max 25)
- storlek (mm)	20-100	5-100
Produktgasens exit-temperatur (°C)	700	200-400
Tjårhalt (g/Nm ³)	0,015-0,5	30-150
Turn down ratio*	3-4	5-10

2.2 SUSPENSIONS-FÖRGASARE

I en suspensionsförgasare förgasas fasta partiklar, atomiserat flytande bränsle eller en bränsle-slurry i ett medströmsarrangemang. Förgasningsreaktionerna försiggår i ett tjockt moln av mycket fina partiklar/droppar. På engelska kallas suspensionsförgasare för entrained-flow gasifier. Hög temperatur och högt tryck gör att tekniken tillåter en hög reaktorbelastning. Om förgasaren arbetar vid så hög temperatur att askan smälter benämns den ”slagande” medan förgasare som arbetar under askans smälttemperatur kallas ”icke-slagande”.



Figur 3. Schematisk bild över en suspensionsförgasare

Om temperaturen överstiger askans smältpunkt lämnar askan förgasaren i slagform. Hög förgasningstemperatur krävs vid kolförgasning p.g.a. kolets lägre reaktivitet och större andel bundet kol i bränslet. Biobränsle har en hög reaktivitet vilket är gynnsamt för förgasning vid lägre temperatur. Energiåtgången för att generera ett tillräckligt fint pulver från biobränslen för suspensionsförgasning är betydlig. Biobränslen har också en hög porositet och stor vattenhållande kapacitet vilket gör dem opraktiska vid slurrymatning, något som är vanligt förekommande vid kommersiell trycksatt suspensionsförgasning av kol.

* Turn down ratio beskriver inom vilket lastområde förgasaren kan operera och utgörs av förhållandet mellan full last och den minsta last där förgasaren fortfarande är operationsduglig.

Svartlutsförgasning är ett specialfall då ”bränslet” redan är finfördelat och löst i luten. Hög reaktortemperatur och närvaro av alkalimetaller vid svartlutsförgasning gynnar vätgas- och kolmonoxidbildningen medan metanbildningen undertrycks, se tabell 2.

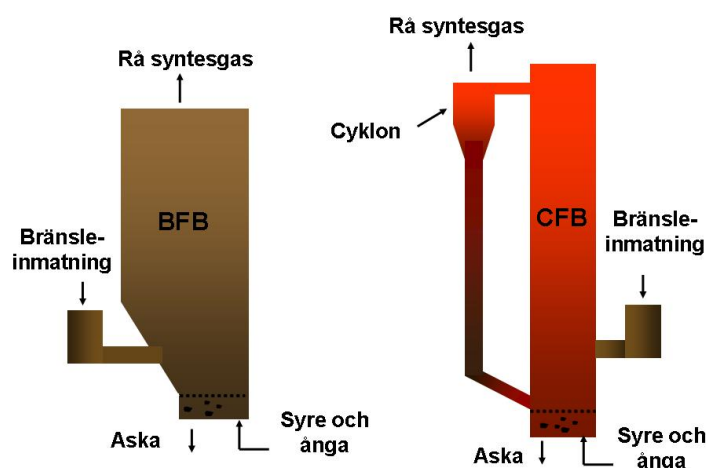
Tabell 2. Gassammansättning⁵ (omräknad till volym kvävefri gas) vid svartlutsförgasning, tryck 29 bar, inmatning 650 kg/h.

Gassammansättning	Volymsandel
H ₂ (väte)	43 %
CO (kolmonoxid)	30 %
CO ₂ (koldioxid)	27 %
CH ₄ (metan)	1 %
H ₂ S	1,4 %
COS	25-40 ppm

En låg metanhalt är fördelaktig om den önskade slutprodukten är ett annat kolväte än metan. Om däremot den önskade slutprodukten är metan är det en nackdel med låg metanhalt i gasen ut från förgasaren då detta medför att mer koloxid och väte behöver metaniseras i det efterföljande metaniseringssteget. Eftersom metanbildningen är en exoterm process alstras det värme och om värmen inte kan utnyttjas resulterar detta i en lägre verkningsgrad.

2.3 FLUIDISERAD BÄDD-FÖRGASARE

I en fluidiserad bädd-förgasare fluidiseras bränslet och ett bäddmaterial med hjälp av oxidationsmedlet. Genom att föra in oxidationsmedlet (luft, syre, ånga eller kombinationer av dessa) underifrån lyfter bränslet och bädden expanderar i höjdlid. Beroende på oxidationsmedlets hastighet kan en bubblande fluidiserad bädd (BFB) eller cirkulerande fluidiserad bädd (CFB) erhållas.



Figur 4. Schematisk bild över en bubblande fluidiserad bädd-förgasare (BFB) till vänster och en cirkulerande fluidiserad bädd-förgasare (CFB) till höger.

I en cirkulerande bädd är hastigheten på oxidationsmedlet så hög att bränslepartiklarna dras med ut ur reaktorn. Partiklarna avskiljs därför i en cyklon och

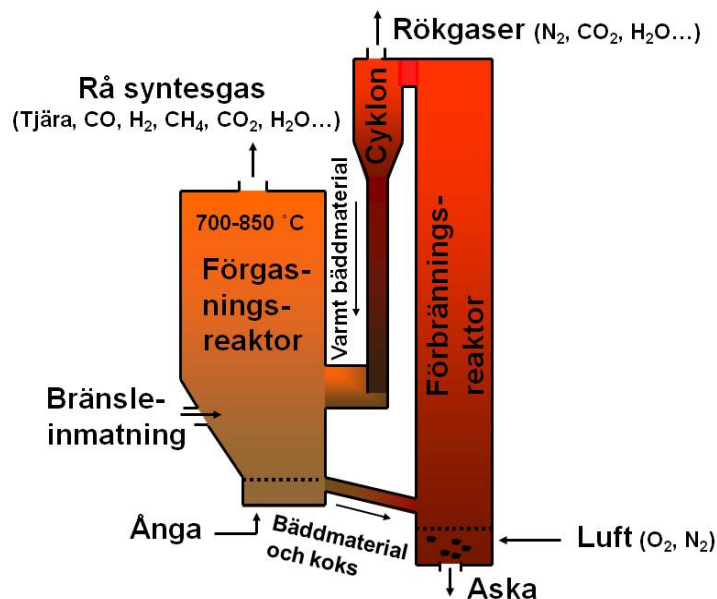
återförs till bädden. Bädden består ofta av ett inert material (t.ex. kvartssand) vilket bidrar till en jämnare temperaturfördelning och stabilare drift. Fluidiserade bäddar är relativt okänsliga för variationer i bränslepartiklarnas storlek och varierande fukthalt.

Fluidiserad bädd-förgasare finns i stort antal varianter, luftblåsta, syrgasblåsta, atmosfäriska och trycksatta. För IGCC-koncept där produktgasen matas in i gasturbinens brännkammare vid högt tryck (10-25 bar) är det en fördel med trycksatt förgasning eftersom produktgasen vid atmosfärisk förgasning först måste kylas och sedan komprimeras vilket resulterar i en hög intern energiförbrukning. Å andra sidan medför trycksatt förgasning en ökad komplexitet avseende bränsleinmatning och gasrening vid höga temperaturer.

Fluidiserad bädd-teknik lämpar sig väl för uppskalning.

2.4 INDIREKT FÖRGASNING

Dubbelbäddar där förbränningen sker i en separat reaktor och värme överförs till förgasningsreaktorn genom cirkulation av bäddmaterial, s.k. indirekt förgasning, finns i olika utförande. Biobränslet matas in i förgasaren där det bryts ned termiskt vid kontakt med varmt bäddmaterial från förbränningsreaktorn. Från förgasningsreaktorn överförs bäddmaterial och koks till förbränningsreaktorn. Genom lufttillförsel eldas koksen upp och bäddmaterialet hettas upp.



Figur 5. Schematisk bild över en dubbelbäddsförgasare (indirekt förgasning) motsvarande förgasaren i Güssing, Österrike.

En av fördelarna med denna typ av förgasare är att man erhåller en gas med relativt högt värmevärde och undviker att den råa syntesgasen späds ut med kvävgas.

Förgasningsreaktorn är begränsad i temperatur till nivåer som understiger förbränningsreaktorns och detta kan medföra problem med tjärnedbrytningen. För att

uppnå erforderliga betingelser för tjärkrackning i förgasningsreaktorn kan ett överskott av ånga eller syre tillsättas. Tjäran kan också krackas katalytiskt.

I anläggningen i Güssing kylls gasen ner efter förgasaren och tjäran avskiljs i en RME-skrubber. Den avskiljda tjäran återförs till förbränningsreaktorn där den eldas upp.

Det finns olika varianter av indirekt förgasning. I Güssing är förbränningsreaktorn av CFB-typ och förgasningsreaktorn av BFB-typ. Förgasningstekniken är kommersialiserad för el- och värmeproduktion och demonstrerad för SNG-produktion.

The Future Energy Resources (FERCO) marknadsför en annan variant, kallad för SilvagasTM, utvecklad vid Batelles Columbus Laboratories, bestående av två CFB-reaktorer. Förgasningstekniken har demonstrerats genom en 40 MW-anläggning i Burlington, Vermont, USA. Gasen användes för sameldning i en existerande kolpanna.

Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) har utvecklat en variant, MILENA, med en förbränningsreaktor av BFB-typ och en förgasningsreaktor av CFB-typ. Förgasningstekniken har testats dels i laboratorieskala, 25 kW, dels i pilotskala, 800 kW, vid ECN.

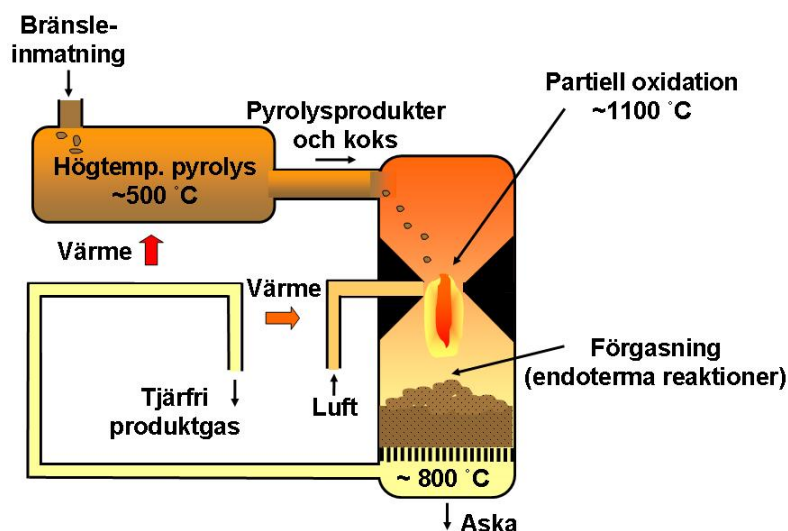
En fjärde variant är Blue Tower-konceptet med tre stycken rörliga bäddar, en för pyrolys av inmatad biomassa, en för ångreformerings av pyrolysgasen och en för förbränning av den fasta återstod (koks) som återstår efter pyrolysen. Rökgaserna från förbränningsreaktorn värmer upp keramiska kulor som i sin tur avger värme i reformerings- och pyrolysreaktorn. Blue Tower-konceptet utmärker sig genom att pyrolys och ångreformerings är uppdelad på två reaktorer medan dessa processer sker i en och samma reaktor, förgasningsreaktorn, för de övriga varianterna. Blue Tower-konceptet benämns därför ibland även för "staged reforming"-process. Tekniken har testats i en pilotanläggning på 1 MW. En 13 MW-anläggning är under konstruktion i Herten, Tyskland.

I Göteborg har Chalmers 8 MW_{th} CFB-panna kompletterats med en förgasningsreaktor på 2MW_{th}. Metso Power har varit leverantör av förgasaren och Göteborg Energi AB finansiär. Fördelen är att existerande CFB-pannor kan utnyttjas vilket håller nere investeringskostnaden och därmed begränsas den ekonomiska risken. Ombyggnaden gick i rekordfart. Från byggstarten i juli 2007 tog det bara sex månader till den första mätkampanjen kunde genomföras⁶.

Anläggningen är utrustad med omfattande instrumentering för gasanalys samt tryck- och temperaturmätning. Generellt sett kan förgasarens termiska effekt vara ungefär lika stor som pannans (som då måste eldas med motsvarande mängd mer bränsle) under förutsättning att det inte finns praktiska begränsningar avseende inmatningskapacitet, ökad belastning på värmeöverförande ytor, placering av överhettare etcetera.

2.5 FLERSTEGSFÖRGASNING

Ur verkningsgradssynpunkt är önskvärt med en produktgas med så låg temperatur som möjligt samtidigt som tjärkrackning kräver höga temperaturer. Genom att, på ett smart sätt, dela upp förgasningsprocessen i olika steg finns det möjlighet att kombinera dessa till synes motstridiga villkor. Det finns olika typer av flerstegsförgasning varav DTU:s tvåstegsförgasare (Vikingförgasaren) och Chorens CarboV®-process presenteras här.



Figur 6. Schematisk bild över tvåstegsförgasning motsvarande Vikingförgasaren som utvecklas vid DTU i Danmark.

Principen för Vikingförgasaren åskådliggörs i Figur 6. Biobränslet torkas och genomgår pyrolys via extern värmetillförsel. Det är dels värme från produktgasen ut från förgasaren, dels värme från den förbränningsmotor (ej med på bilden) som den tjärfria gasen används till.

Pyrolysisprodukterna och återstoden (i huvudsak koks) matas in i förgasaren där även en viss mängd förvärmad luft tillsätts. Den partiella oxidationen höjer temperaturen från ca 500 °C till ca 1 100 °C och tjärhalten minskar från ca 50 000 mg/Nm³ till 500 mg/Nm³. När gasen har passerat genom den varma koksbadde där endoterma (värmekrävande) reaktioner tar plats är tjärhalten lägre än 5 mg/Nm³. Partiklar tas bort med slangfilter (baghouse filter) och vatten kondenseras ut (ej med på bilden).

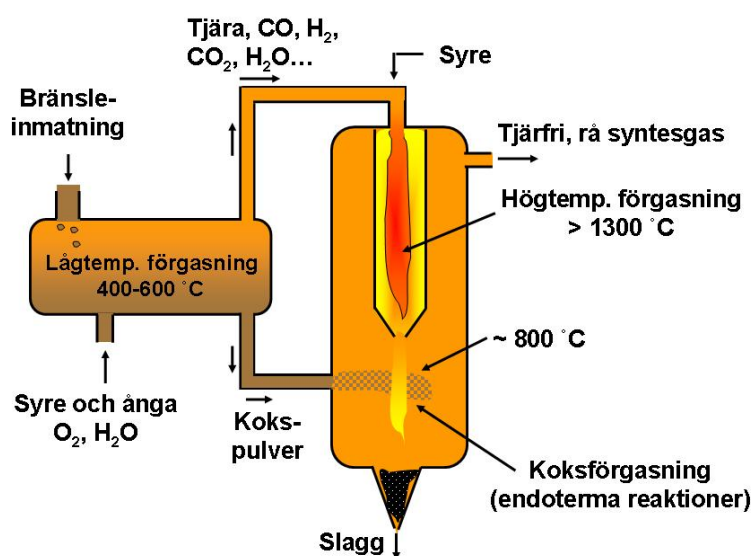
Tabell 3. Data för Vikingförgasaren (Källa prof. Ulrik Henriksen, DTU, 2008).

Effekt	70 kW _{th}
Förgasningsverkningsgrad	93 %
Elverkningsgrad motor/generator	27 %
Systemets elverkningsgrad	25 %
Ackumulerad drifttid	3 600 h
Driftsatt	Augusti 2002

Vikingförgasaren är fullt automatiserad och körs utan någon operatör. Då förgasaren är luftblåst och produktgasen innehåller kväve lämpar gasen sig ej för syntetisering.

DTU:s koncept med tvåstegsförgasning är under uppskalning i samarbete med COWI och Weiss A/S⁷. Anläggningen är på 600 kW_{th}/200kW_{el}. Med ytterligare teknikutveckling och uppskalning förväntas en elverkningsgrad för systemet på ca 37 % och en totalverkningsgrad på ca 98 %. Den höga totalverkningsgraden baseras på att vattenången i avgaserna ut från förbränningsmotorn, som driver elgeneratorn, kondenseras.

Choren Industries i Tyskland har utvecklat och patenterat en trestegsförgasningsprocess, Carbo-V®⁸.



Figur 7. Förenklad schematisk bild över principen med Chorens trestegsförgasning.

Biobränslet förgasas vid låg temperatur och lättflyktiga beståndsdelar separeras från återstoden (i huvudsak koks). Rent syre och ånga används som oxidationsmedel i lågtemperaturförgasaren. De lättflyktiga beståndsdelarna oxideras med rent syre i högtemperaturförgasaren och den höga temperaturen ca 1 300 °C gör att tjärorna krackas. Den varma gasen kyls ned genom de endoterma reaktionerna som sker vid kontakt med koksen. Då inget av de tre förgasningsstegen (lågtemperatur-, högtemperatur och koks-förgasning) är luftblåst undviks kväve i den råa syntesgasen ut från förgasaren.

Den råa syntesgasen renas och syntetiseras via FT-processen till Diesel. Choren har varumärkesregistrerat produkten som SunDiesel® och har långt framskridna planer, se kapitel 4.2, på att ta i drift en 45 MW_{th}-anläggning (Beta-anläggning).

3. BESKRIVNING AV OLIKA GASRENINGSKONCEPT

Det finns en mängd olika gasreningskoncept och tekniker men gemensamt för dem är dels att ta bort ämnen som kan äventyra funktion och livslängd för de komponenter som används nedströms förgasaren i samband med gasrening, syntetisering och konditionering, dels att säkerställa önskad kvalitet på slutprodukten.

Många koncept bygger på avancerad och omfattande gasrening medan andra handlar om utveckling av komponenter som är tåligare och mer robusta.

3.1 HÖGTEMPERATURFILTER

I cykloner tvingas gasen att rotera och partiklar separeras genom centrifugalkraften. På så sätt kan mer än 90 % av partiklar med en storlek över 5 µm (mikrometer) avskiljas^{4,9}. Troligtvis avskiljs även en del partiklar i intervallet 1-5 µm. Cykloner placeras ofta i serie där den första cyclonen avskiljer de största partiklarna och de efterföljande cyklonerna allt mindre och mindre partiklar. Som tidigare nämnts, klarar cykloner inte av att avskilja små partiklar (< 1 µm), vilket innebär att tjärddroppar mindre än 1 µm passerar igenom. Tjärnor i gasfas kommer också att passera igenom cyclonen tillsammans med övrig produktgas. Ett alternativ vore att kyla ner gasen men tjärornas klubbighet i kombination med partikelavskiljning medför en överhängande risk för igensättning.

Barriärfilter bestående av poröst material tillåter gaser att passera men hindrar partiklar. I princip kan barriärfilter designas att ta bort nästan vilken partikelstorlek som helst, inklusive submikrometerpartiklar men tryckdifferensen över filtret ökar med minskad porstorlek. Tekniska och ekonomiska hänsynstagande ger en begränsning vid ca 0.5 mikrometer för system som hanterar stora gasflöden, t.ex. förgasare¹⁰. Den teknik som ser mest lovande ut för avskiljning av partiklar vid hög temperatur¹¹ involverar keramiska filter, så kallade ceramic candle filter, där candle avser filtrets geometriska form (cylindriskt och avlångt ungefär som ett stearinljus).

I en stor studie¹² utförd av Siemens Westinghouse Power Corporation, finansierad av Department of Energy och National Energy Technology Laboratory, testades ett stort antal keramiska filter i en PCBC-anläggning (Pressurized Fluidised Bed Combustion). I den applikationen demonstrerades gasrening vid temperaturer över 800 °C. Deltagande filterleverantörer var bl.a.

Coors Tek Inc. (USA) <http://www.coorstek.com/>

Pall Corporation (USA) <http://www.pall.com/>

McDermott International Inc. (USA) <http://www.mcdermott.com/>

Albany International Techniweave (USA)

<http://www.albint.com/web/techweav/techw.nsf>

Schumacher (Tyskland) <http://www.schumacher-filters.de/> (2002 köptes Schumacher upp av Pall Corporation och ingår numera i Pall Filtersystems GmbH).

3.2 TJÄRAVSKILJNING/KRACKNING

Det finns två grundläggande sätt att få bort tjärorna ur gasen

- fysikalisk avskiljning där kondenserad tjära i form av droppar skiljs av på liknande sätt som partiklar, och tjära i gasfas absorberas av ett lösningsmedel.
- katalytisk eller termisk krackning av tjäror.

Användandet av en våt skrubber för att ta bort tjäror kräver att gastemperaturen är 35-60 °C om det är en vattenskrubber. Tjärorna är hydrofoba och har en låg löslighet i vatten vilket gör att bara aerosoler avskiljs. Genom att använda lösningsmedel som är lipofila så att tjäror i gasfas löser sig i vätskan ökas skrubberns avskiljningsgrad. I förgasningsanläggningen i Güssing används t.ex. RME (Rapsmetylester) som skrubbeväska. Den använda, och med tjäror och kondensat mättade, skrubbeväska eldas sedan upp i förbränningsreaktorn.

Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) har utvecklat och patenterat OLGA (akronym för oljebaserad gastvätt på holländska). OLGA-processen¹³ är uppdelad i två skrubbesteg, ett steg där flytande tjäror avskiljs och ett steg där tjäror i gasfas absorberas. De flytande tjärorna separeras från skrubbeväska och recirkuleras till förgasaren. Tjärorna som tagits upp av skrubbeväska i absorptionssteget tas bort i en sk stripper. I fallet med luftblåst förgasare används luft för ”strippningen”. Luften, med innehåll av tjäror, används sedan som oxidationsmedel i förgasaren. Fördelar med OLGA är:

- Gasen renas så att daggpunkten för den tjära som återstår i den renade gasen understiger temperaturen i applikationen. Detta medför att ingen tjära faller ut nedströms om tjärtvätten.
- Tjärorna tas bort innan gasens vatteninnehåll kondenseras ut. På så sätt undviks problem med förorenat processvatten.
- Avskiljda tjäror kan återföras till förgasaren och problem med hantering av problematiska avfallsströmmar undviks.

Tjäror kan krackas termiskt vilket också sker i suspensionsförgasare som arbetar vid temperaturer på 1 000 °C eller högre och vid flerstegsförgasning där tjärrik gas genomgår partiell oxidation och utsätts för hög temperatur > 1 000 °C.

Tjärkrackning kan uppnås vid betydligt lägre temperaturer om katalytiskt aktiva material används. I en litteratursammanställning¹⁴ utförd 2002 vid National Renewable Laboratory går olika katalysatorer och deras förmåga att bryta ned tjära igenom. Rapporten visar att tjärnedbrytning på > 90 % kan uppnås vid temperaturer på 450-900 °C beroende på vilket katalytiskt material som används.

PSI och CTU har i labbförsök visat att man fick en total krackning av tjärorna i PSI:s kombinerade skift- och metaniseringsreaktor vid temperaturer på ca 350 °C. Problemet var bara att en del tjäror, tiofener (eng. thiophenes) innehöll svavel och nickelkatalysatorerna tvärdog efter ca 200 timmar på grund av svavelför-

giftning. Problemet är löst genom att tjärorna avskiljs via en RME-skrubber uppströms om skift- och metaniseringsreaktorn.

Nickelkatalysatorn förgiftas inte av svavel vid högre temperaturer och därför finns det idéer om att kracka tjäran katalytiskt direkt efter förgasaren eller till och med inne i själva förgasaren.

Bäddmaterial med nickel har testats och även om resultaten varit lovande så är miljöriskerna med nickel i aska och filter besvärande. En fransk forskargrupp har visat att olivin impregnerat med 10 % respektive 20 % järn ger motsvarande tjärnedbrytning som olivin impregnerat med nickel¹⁵.

Ett annat alternativ är att bygga in katalysatorerna i keramiska filter som integreras med förgasaren. Det porösa keramiska materialet hindrar partiklarnas mekaniska slitage av katalysatorytorna och minskar risken för deaktivering genom avlagringar och igensättning.

3.3 SVAVELRENING

Medan tjärbildningen till största delen beror på förgasarens driftbetingelser och mindre på biomassans sammansättning så är det tvärtom för svavel, klor och andra ämnen. Elementaranalys av råvaran bestämmer därför baskraven för gasreningen nedströms of förgasaren.

Tabell 4. Utdrag och översättning av data från ECN¹⁶.

Biomassa	Svavel (vikt% av torr och askfri råvara)	Klor (vikt% av torr och askfri råvara)
Trä, obehandlat	0,03	0,02
Trä, impregnerat	0,17	0,11
Halm	0,15	0,48
Kogödsel	0,95	1,66
RDF (Refuse derived fuel)	0,40	0,39
Kommunalt avfall	0,50	1,13

Vid produktion av syntesgas via förgasning är svavel närvarande, inte enbart i form av H₂S utan även som COS. Vissa tvättar, såsom Rectisol, kan ta bort COS tillsammans med H₂S, medan andra, i synnerhet amintvättar, kräver att COS omvandlas till H₂S för tillräcklig svavelborttagning¹⁷.

Processer baserade på fysikalisk absorption (t.ex Rectisol) är starkt tryckberoende. Vid låga tryck är fysisk absorption inte ekonomiskt konkurrenskraftig på grund av låg löslighet. Gränsen mellan fysikalisk och kemisk absorption anges¹⁶ till ca 7 bar. Processer baserade på fysikalisk eller kemisk absorption är lämpliga för behandling av stora gasflöden som innehåller H₂S och/eller COS. Standardtekniken för att omvandla avskilt H₂S till elementärt svavel är Clausprocessen. Normalt körs denna process parallellt med fysikalisk eller kemisk absorption. Generellt sett är Clausprocessen för dyr i den skala som associeras med biomassaförgasning. Även för storskaliga biomassaanläggningar är mängden

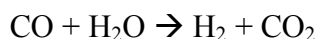
svavel relativt liten utom då råvara med hög svavelhalt används, t.ex. kommunalt avfall, utsorterat avfall, gödsel och slam. Det finns även biologiska processer där H₂S omvandlas till elementärt svavel av mikroorganismer i en reaktor, t.ex. Paques THIOPAQ-process.

Svavel kan också tas bort genom adsorption på fasta material. Lämpliga adsorbenter är Fe, Mn, Zn, Cu och Ca. Fasta adsorbenter är användbara vid låga svavelhalter. De flesta adsorbenter kan inte regenereras utan måste kvittblivas efter användning. Regenerativa processer är dock under utveckling. Adsorption genom molekylär sållning (t.ex. aktivt kol) är en gångbar option vid låga svavelhalter och om gasen innehåller tyngre svavelföreningar såsom merkaptaner och COS. Effekten på tiofener är dock begränsad.

I Güssing används aktivt kol för borttagning av huvuddelen av svavlet medan en bädd med ZnO används för att ta hand om resten av svavlet.

3.4 SKIFT OCH SYNTETISERING

Förhållandet mellan väte och koloxid kan justeras i en skiftreaktor genom att tillföra ånga. Processen som sker i skiftreaktorn är:



Beroende på önskad slutprodukt är olika förhållande mellan väte och koldioxid önskvärda i samband med syntetiseringen, se tabell 5 nedan.

Tabell 5. Syntetisering (utdrag ur Gas Production for Polygeneration Plants av H. Hofbauer)

Syntes	Stökiometriskt H ₂ /CO-förhållande	Syntesreaktion
Fischer-Tropsch	2	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{--[CH}_2\text{]--} + \text{H}_2\text{O}$
Metanol	2	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
Metanisering	3	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

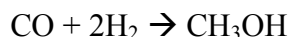
Genom att använda olika katalysatorer och processbetingelser kan man styra syntetiseringen. I Tabell 6 ges en översikt av lämpliga processbetingelser.

Tabell 6. Lämpliga processbetingelser vid syntetisering (utdrag ur Gas Production for Polygeneration Plants av H. Hofbauer)

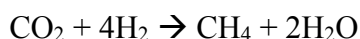
Syntes	Katalysator	Tryck [bar]	Temperatur [°C]
Fischer-Tropsch	Fe/Co/ZrO ₂ /SiO ₂	20-40	220-300
Metanol	Zn/Cr/Cu	50-300	220-380
Metanisering	Ni/Mg	1-10	200-400

Fischer-Tropsch-syntesen kan användas för att antingen producera en syntetisk råolja och lätta olefiner eller tunga kolväten (vaxer). Råoljan kan raffineras till bensin och diesel och de tunga kolvätena till specialvaxer, diesel, smörjolja och nafta⁴.

Vid metanolsyntes omvandlas väte, kolmonoxid och koldioxid i syntesgasen till metanol och vatten enligt följande reaktioner:



Vid metanisering omvandlas väte, kolmonoxid och koldioxid i syntesgasen till metan och vatten enligt följande reaktioner:



Metaniseringen sker vanligtvis över en nickelbaserad katalysator vid en temperatur på 250 – 450 °C. Metaniseringsprocessen är starkt exoterm och metaniseringsreaktorn kyls vanligen genom internt recirkulerad gas och värmeväxling. Den starka värmeutvecklingen är ett viktigt skäl till att välja förgasningsteknik och processbetingelser som gynnar metanbildning redan i förgasningssteget. Då blir det mindre andel väte, kolmonoxid och koldioxid som behöver metaniseras.

Den kombinerade skift- och metaniseringsreaktor som utvecklats vid Pauls Scherrer-institutet (PSI) i Schweiz är baserad på fluidiserad bädd-teknik. Den har enligt Dr. Samuel Stucki, chef för laboratoriet vid Energy and Materials Cycles på PSI visat sig fungera för väte/koldioxid-förhållanden inom ett så pass brett intervall som 1 till 5.

Utvecklingsarbete pågår för att hitta katalysatorer som är mer robusta och mindre känsliga för orenheter i gasen, framförallt svavel.

3.5 SLUTKONDITIONERING

Efter metaniseringen avskiljs koldioxiden genom konventionell teknik. En delmängd av den avskiljda koldioxiden kan används som inertgas vid bränsleinmatningen. Den våta gasen torkas och beroende på kravspecifikation avskiljs eventuellt överskott av vätgas. Vätgasens värmevärde är ca tre gånger lägre än metan per volymenhet och ju mindre andel vätgas desto högre värmevärde och Wobbeindex.

4. STATUS

Ett ökat fokus på klimatfrågor, försörjningstrygghet och behov av att reducera oljeberoendet, framförallt inom transportsektorn, har medfört en renässans för förgasning av biomassa. Det byggs och planeras för förgasningsanläggningar runt om i Europa med sikte på el- och värmeproduktion samt drivmedelsframställning. Medan det finns kommersiella anläggningar för el- och värmeproduktion baserade på förgasning av biomassa, väntar vi fortfarande på den första industriella anläggningen för framställning av drivmedel.

4.1 KRAFT- OCH VÄRMEPRODUKTION

Förgasningsanläggningar för kraft- och värmeproduktion konkurrerar med konventionell teknik baserad på förbränning av biobränsle och ångcykel. Elforsk har gjort en sammanställning¹⁸ över elverkningsgraden för olika anläggningar. Där anges elverkningsgraden för biobränsleeldad kraftvärme baserad på ångcykeln till 27 % för en anläggningstorlek på 10 MW_{el} motsvarande drygt 35 MW tillfört bränsle. Verkningsgraden sjunker snabbt i takt med minskad anläggningsstorlek. Detta ska jämföras med t.ex. förgasningsanläggningen i Oberwart som har en elverkningsgrad på drygt 32 % och är på 2.8 MW_{el} och 8.5 MW tillfört bränsle.

4.2 DRIVMEDELSFRAMSTÄLLNING

Vid anläggningen i Güssing har hela kedjan från träflis till framställning av bio-SNG, via förgasning och metanisering, och tankning av gasfordon demonstrerats. Medan förgasningstekniken, baserad på indirekt förgasning, ackumulerat tusentals drifttimmar är fortfarande den kombinerade skift- och metaniseringsreaktorn att betrakta som en kritisk komponent. Först när långtidstester genomförts, stabil drift och god tillgänglighet påvisats samt en viss erfarenhets- och kunskapsbank byggts upp kan metaniseringstekniken betraktas som mogen för kommersialisering.

Tabell 7. Gassammansättning¹⁹ efter konditionering i Güssinganläggningen.

Gaskomponent	Volymprocent
CH ₄	>94,5 %
H ₂	< 2 %
CO ₂	<0,5 %
CO	<1 %
N ₂	<2 %

Inom GoBiGas-projektet är målet att bygga en anläggning i industriell skala, i Göteborg, för framställning av bio-SNG via förgasning och metanisering av träflis. Anläggningen blir den första i världen som producerar bio-SNG utifrån ett

kommersiellt perspektiv. Projektet har beviljats stöd från Energimyndigheten med 222 miljoner kronor. Förgasningstekniken kommer från Repotec medan gasrenings- och metaniseringstekniken kommer från Haldor Topsoe.

Tyska Choren, i partnerskap med Daimler och Volkswagen, har byggt en 45 MW_{th} förgasningsanläggning i Freiberg för framställning av Fischer-Tropsch-Diesel. Drifttagningen har blivit försenad i olika omgångar. Säkerhetssystemet i anläggningen har gått igenom och uppdaterats. System för logistik och bränsleinmatning är på plats. Förgasaren har genomgått varma tester från och med december 2009. Kallprov av systemen för gaskonditionering och syntetisering har utförts. Värma prov förväntas genomföras under 2010. Produktion av drivmedel förväntas under andra kvartalet 2010²⁰.

Chemrecs teknik för svartlutsförgasning och Haldor Topsoes teknik för DME-syntes är vitala delar av utvecklingsaktiviteterna vid Energitekniskt Centrum (ETC) i Piteå. Förgasningstekniken har provats i en 3 MW pilotanläggning belägen vid pappersmassabruket Smurfit Kappa Kraftliner. En anläggning har byggts för syntetisering av syntesgasen till DME. Detta görs i ett samarbete mellan Volvo (koordinator), Chemrec, Haldor Topsoe, Preem, Total, Delphi och ETC inom EU-projektet Bio-DME. 14 Volvobilar ska gå var 10 000 mil/år, i genomsnitt, i verklig drift under perioden 2010-2013. Vidare planeras en anläggning i industriell skala, 75 MW, vid Domsjö i Örnsköldsvik. Projektet har beviljats stöd från Energimyndigheten med 500 miljoner kronor.

4.3 KOMMERSIELLA ANLÄGGNINGAR

Nedan anges exempel på anläggningar som byggts för kommersiell användning alternativt försäljning av slutprodukten.

Indirekt förgasning

Anläggningen i Oberwart (Österrike), baserad på tekniken med indirekt förgasning, inkluderar två gasmotorer från Jenbacher och en ORC (Organic Rankine Cycle) för elproduktion. Anläggningen producerar redan idag en kvävefri syntesgas och det finns inga egentliga hinder för en framtida SNG-produktion om anläggningen kompletteras med skift- och metanisering. Anläggningen har varit i drift sedan 2008/2009.

Luftblåst trycksatt bubblande fluidiserad bädd-förgasning

Anläggningen i Skive²¹ (Danmark), baserad på Carbonas teknik, inkluderar katalytisk tjärkrackning innan gasen kyls ner och filtreras samt 3 Jenbacher gasmotorer för elproduktion. Tjärkrackern är utvecklad av VTT (Finland).

Anläggningen är designad att gå på 30-140 % last. 140 % last motsvarar 28 MW_{th}. Förgasaren arbetar med ett övertryck på maximalt 2 bar och med en temperatur på 850 °C. Kallprov genomfördes under hösten 2007. Varmprov genomfördes med förgasare, gaskylning, filter och gaspanna som ett oberoende system. När detta system klarade av att leverera värme till fjärrvärmesystemet startade arbetet med gasreningen. Baserat på omfattande mätningar av gaskvaliteten i samband med varmproven av gaspannan beslutades att koppla in en av de tre gasmotorerna. Några dagar senare, i maj 2008, uppnåddes full drift med generatören ansluten till

elnätet. Projektet har drabbats av många förseningar men är efter injusteringar och driftoptimering i kontinuerlig drift.

Luftblåst atmosfärisk cirkulerande fluidiserad bädd-förgasning

Götaverken (ingår numera i Metso Power), levererade en förgasningsanläggning på 28 MW_{th} till Värö Bruk där den producerade gasen används i mesaugnen. Mesaugnar återfinns inom kemisk massaindustri baserad på sulfatprocessen. Mesa är en benämning på ett slam som huvudsakligen består av kalciumkarbonat, CaCO₃, bildat vid kausticering av grönlut. Genom upphettning av mesan avgår koldioxid och CaCO₃ omvandlas till CaO (bränd kalk). Kalken ingår i sin tur i massabrukets kemikalieåtervinning. Förgasaren som använder bark som råvara har varit i drift sedan 1987²².

Förgasningsanläggningen i Lathi (Finland), baserad på Foster Wheelers CFB-teknik, används för att producera en gas som samledas med pulveriserat kol i en panna. Anläggningen producerar el- och värme via konventionell ångcykel. Genom förgasningen kan lågvärdiga bränslen såsom papper, kartong, utsorterat avfall och plast användas i en effektiv kolpanna med ångdata på 540 °C och 170 bar. Förgasningskapaciteten på 40-70 MW_{th} utgör ca 15 % av kolpannans genomsnittliga kapacitet.

Foster Wheeler har i mitten av 80-talet levererat CFB-förgasare för framställning av gas till mesaugnar i Sverige (Karlsborg och Norrsundets Bruk), Finland och Portugal.

Luftblåst motströmsförgasning

Anläggningen i Harboøre (Danmark), baserad på Babcock & Wilcox Vølunds teknik, inkluderar bland annat en 3.5 MW_{th} luftblåst updraft-förgasare, gasrening, två Jenbacher gasmotorer för elproduktion och en panna för förbränning av avskild tjära. Anläggningen har ackumulerat mer än 100 000 drifttimmar.

Januari 2007 togs en 7.5 MW_{th} updraft-förgasare, baserad på Babcock & Wilcox Vølunds teknik, i drift i Yamagata, Japan. Effekten anges till 2 MW.

Luftblåst medströmsförgasning

Belgiska Xylowatt SA har levererat 5 luftblåsta downdraft-förgasare²³ för el- och värmeproduktion under perioden 2003-2006. Effekten anges till 300 kW och anläggningarna är helautomatiserade för dygnet runt-drift.

5. MARKNADSPPOSITION OCH EKONOMI⁴

I många fall är det små entreprenörsföretag som är engagerade i utvecklingen av förgasningsteknologi. Dessa har sällan den finansiella styrkan att ta helhetsansvar för byggnationen och tillmötesgå investerarens krav på ekonomiska garantier. Samtidigt kan inte investeraren motivera högre kostnader än för annan tillgänglig teknik som kan leverera samma slutprodukt. Då större ingenjör- och konstruktionsfirmor föredrar att begränsa sin egen riskexponering till konventionella komponenter blir, av nödvändighet, fler aktörer ofta involverade. Detta skapar fler gränssnitt, vilket i sin tur ofta förlänger projektiden och kräver att många olika kontraktsmässiga överenskommelser träffas.

5.1 EXEMPEL PÅ LEVERANTÖRER

Repotec, Österrike, är ett litet företag med åtta anställda, som gör ”basic engineering” och i viss utsträckning tar ansvar för byggnation. Man samarbetar med lokala leverantörer. Repotec har byggt anläggningen i Güssing och gjort ”basic engineering” för anläggningen i Oberwart. Repotec är inblandad i två nya anläggningar i Tyskland. Anläggningen i Senden på 14,3 MW_{th} och 5 MW_{el}, förväntas tas i kommersiell drift under 2011. Anläggningen i Türkheim (nära Geislingen) är på 10 MW_{th} och 3,3 MW_{el}. Anläggningen är designad för att köras med Absorption Enhanced Reforming (AER) vilket ger en gas med hög andel vätgas och ingen koldioxid.

Ortner GmbH, Österrike, byggde anläggningen i Oberwart och är inblandad i anläggningarna i Villach och Klagenfurt. Det var förvånande att det blev Ortner GmbH och inte Repotec som fick kontraktet för anläggningen i Oberwart då Ortner GmbH sedan tidigare inte hade någon erfarenhet av att bygga förgasningsanläggningar. Å andra sidan har Ortner GmbH helt andra finansiella resurser jämfört med Repotec.

Tyska M+W Zander fick i uppdrag av H2Herten GmbH att ansvara för planering, inköp och byggövervakning i samband med uppförandet av en Blue Tower-anläggning, 13 MW_{th} och 5 MW_{el}, baserad på indirekt förgasning i Herten, Tyskland²⁴. Det är Blue Tower GmbH, en del av Solar Millenium Group, som äger rättigheterna till Blue Tower-teknologin och har rättighet att utfärda licenser.

Babcock & Wilcox Vølund har vidareutvecklat konceptet med updraft-förgasare och gasmotor att även inkludera en ångcykel. Babcock & Wilcox Vølund har tecknat ett avtal med Advanced Renewable Energy Ltd avseende utveckling, konstruktion och implementering av upp till 25 decentraliserade anläggningar för produktion av el och värme i Italien. Anläggningarna är designade att producera 4 MW el och 5 MW värme.

Carbona är ett finländskt företag med rötter i den utveckling som genomförs vid Gas Technology Institute i USA. 2006 gick Andritz Oy, som är en ledande leverantör för pappers- och massaindustrin, in som minoritetsägare i Carbona. Fokus ligger på förgasning baserad på storskalig fluidiserad bädd-teknik.

Xylo watt är ett spin-off företag till Université Catholique de Louvain i Belgien. Genom samarbete med Electrabel kan kunderna erbjudas kompletta lösningar. Fokus ligger på små downdraft-förgasare i kombination med en gasmotor.

5.2 EKONOMI

I en jämförande studie²⁵ utförd 2008 konstateras att produktionskostnaden för framställning av bio-SNG ligger i intervallet 380-410 kr/MWh vilket klart överstiger den i studien antagna kostnaden för naturgas om 250 kr/MWh exklusive skatt. I en efterföljande studie²⁶ påpekas det att det, utifrån pågående planering för anläggningar i Sverige, finns indikationer på att kostnaden för produktion av bio-SNG sannolikt är högre.

Olika styrmedel och skatter såsom elcertifikat, handel med utsläppsrätter, energi- och miljöskatter tillsammans med politiska ambitioner att öka andelen energi från förnybara resurser talar för förgasning av biomassa. Förgasning möjliggör en storskalig introduktion av förnybara drivmedel inom transportsektorn och möjligheten att producera el med hög verkningsgrad på små värmeunderlag. När det gäller politiska ambitioner eller tvingande direktiv att öka andelen förnybart är det viktigt att komma ihåg att produktionskostnaden för det förnybara bränslet/drivmedlet inte ska ställas i relation till de fossila bränslena utan till andra konkurrerande förnybara alternativ. Det innebär att teknik med hög omvandlingsverkningsgrad från råvara till slutprodukt är önskvärd, speciellt som råvarupriserna förväntas öka i takt med ökad konkurrens om råvaran. De tekniker som baseras på anläggningar som är mindre kapitalintensiva och tekniskt komplexa jämfört med alternativen kommer troligtvis att kommersialiseras först.

6. LISTA MED LÄNKAR FÖR MER INFORMATION

BioEnergy List: Gasifiers & Gasification

<http://gasifiers.bioenergylists.org> är en hemsida som administreras av T. R., Miles Technical Consultants, USA. Hemsidan innehåller bl.a. länkar till tillverkare och leverantörer av förgasningsutrustning samt ett diskussionsforum. Här finns möjlighet att ansluta sig till en email-lista och på elektronisk väg ta del av det aktiva diskussionsforumet.

Bio-SNG

<http://www.bio-sng.com> är ett numera avslutat europeiskt projekt där metan från träflis demonstrerats i MW-skalan under 2008/2009. SGC satt med i projektets styrgrupp.

BioSNG

<http://www.biosng.com> är en hemsida som underhålls av Energy Research Centre of the Netherlands, ECN. Här beskrivs konceptet med "Green Natural Gas", dvs förnybar gas av naturgaskavalité, producerad via mikrobiell eller termokemisk nedbrytning av organiskt material och efterföljande gasrening/uppgradering/konditionering. Hemsidan innehåller länkar till relevanta ECN-rapporter och en kort beskrivning av pågående utvecklingsaktiviteter.

BTG Biomass Technology Group

BTG är ett oberoende, privat företag som specialiserat sig på processer för omvandling av biomassa till biobränsle och bioenergi. På hemsidan www.btgworld.com finns det en hel del om teknikstatus. Klicka på "RTD" och därefter "Technologies". BTG var med och initierade det europeiska nätverket GasNet. Här kan man även beställa "Handbook on Biomass Gasification" som beskrivs närmare under litteratur, längre bak i den här rapporten. Klicka på "References" och därefter "Books".

ERA-NET Bioenergy

På ERA-NET Bioenergy:s hemsida <http://www.eranetbioenergy.net> finns bakgrundsinformation och projektbeskrivningar avseende europeisk bioenergiforskning. Det finns ett s k Joint Work Programme inriktat mot Synthetic natural gas from biomass som koordineras av Tekes, Finland. Syftet är att göra en genomgång av FoU-behov och industrins behov av demonstrationer samt ta fram rekommendationer. Inga beslut har dock tagits än (2011-06-20).

Gasification Guide

Gasification guide www.gasification-guide.eu är ett projekt inom Intelligent Energy for Europe avseende hälso-, säkerhets- och miljöaspekter vid biomassa-förgasning. Inom projektet har ett mjukvaruprogram som heter Risk Analyzer tagits fram. Det går att ladda ned Risk Analyzer och en manual från hemsidan.

Gasifier Inventory

Gasifier Inventory ger överblick av existerande bibränslebaserade förgasningsanläggningar och utrustningstillverkare runt om i världen. Databasen innehåller förgasare baserade på olika förgasningsteknik, kapacitet och tillverkare. Databasen innehåller inte anläggningar i labbskala. För mer info besök www.gasifiers.org. Juni 2011 var databasen nere. Enligt Harrie Knoef, BTG World, som ansvarar för hemsidan, är det bara temporärt (pga byte av leverantör) och tanken är att databasen ska fungera som tidigare.

GasNet (projektet är nedlagt och hemsidan är stängd)

GasNet var ett europeiskt nätverk inom området biomassa-förgasning som koordinerades av Hermann Hofbauer, TU Wien och stöttades av Intelligent Energy for Europe. På hemsidan fanns det information om applikationer och förgasningstekniker med mera. GasNet newsletter kunde enkelt laddas ned via hemsidan www.gasnet.uk.net. Rapporterna kunde också beställas i tryckt version utan kostnad via GasNet:s hemsida eller genom att kontakta den svenska representanten, Eva Larsson, TPS Termiska Processer AB, 611 82 NYKÖPING, tel. 0155 22 13 54, eva.larsson@tps.se

IEA Bioenergy. Task 33 Thermal Gasification of Biomass

Syftet med Task 33 är att utbyta information globalt, stimulera industriellt engagemang och koordinerad forskning, utveckling och demonstration inom medlemsgruppen. Mer info finns på www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=33. Under "Media Centre" finns det många förgasningsrelaterade rapporter i pdf-format, t.ex.

From 1st to 2nd-Generation Biofuel Technologies: An overview of current industry and RD&D activities, November 2008.

Biomass pyrolysis, February 2007.

Observations on the Current Status of Biomass Gasification, May 2005.

Biomass Gasification Success Stories, December 2004

Thermal Gasification of Biomass, June 2002

SGC

Förgasningsdatabas

Från och med sommaren 2011 kommer det att finnas en förgasningsdatabas med information om olika bibränslebaserade förgasningsanläggningar i världen på SGC:s hemsida. Databasen har byggts upp inom ramen för ett SGC-projekt, se SGC-rapport 234 för mer detaljer. Syftet med databasen är att försöka tillgodose behovet av indata i samband med datorsimuleringar av förgasningsprocesser och förgasningssystem.

Förgasningsseminarier

International seminar on gasification 2011 www.sgc.se/gasification2011

International seminar on gasification 2010 www.sgc.se/gasification2010

International seminar on gasification 2009 www.sgc.se/gasification2009

International seminar on gasification 2008 www.sgc.se/gasification2008

International seminar on gasification 2007 www.sgc.se/gasification2007

Rapporter

SGC-rapport 234 [Biomass Gasifier Database – for computer Simulation Purposes.](#) Christian Hulteberg, 2011.

SGC-rapport 232 [Förgasning – teknik och status.](#) Jörgen Held, 2011.

SGC-rapport 213 [International Seminar on Gasification 2009 – Biomass Gasification, Gas Clean-up and Gas Treatment.](#) Jörgen Held (editor), 2009.

SGC-rapport 212. [Marknadsförutsättningar för SNG i Sverige och i Europa.](#) Linda Colmsjö och Ronny Nilsson, 2009.

SGC-rapport 193 [International Seminar on Gasification 2008.](#) Jörgen Held (editor), 2008.

SGC-rapport 187 [Substitute natural gas from biomass gasification.](#) Per Tunå, 2008.

SGC-rapport 185 [System- och marknadsstudie för biometan \(SNG\) från bio-bränslen.](#) Martin Valleskog, Åsa Marbe och Linda Colmsjö, 2008.

SGC-rapport 168 [The potentials for integration of black liquor gasification with gas fired paper drying processes – A study from the energy cost perspective.](#) Kristian Lindell och Stig Stenström, LTH, 2006.

SGC-rapport 156 [Förnybar Naturgas – Förgasning av biobränslen för framställning av metan eller vätgas.](#) David Malm och Staffan Karlsson 2005.

Rapporterna kan kostnadsfritt laddas ned via SGC:s hemsida, www.sgc.se, klicka på ”Publikationer” och därefter ”Rapporter”.

TarWebNet

TarWebNet är en hemsida som handlar om internationell standard för tjär- och partikelmätningar i biomassabaserad produktgas. www.tarweb.net

ECN Holland koordinerar projektet och från Sverige deltar Truls Liljedahl, Kemiteknik, KTH, tel 08 108579, truls@ket.kth.se

ThermalNet (projektet är avslutat)

ThermalNet behandlade tre teknologier, pyrolys (PyNe), förgasning (GasNet) och förbränning (CombNet) och finansierades via Altener, Intelligent Energy for Europe inom DG TREN. Hemsidan nås via www.thermalnet.co.uk. Här finns även länkar vidare till PyNe, GasNet och CombNet. Den enda hemsida som fortfarande är aktiv är PyNe.

Unique

EU-projektet Unique har som mål att integrera fluidiserande bädd-förgasning av biomassa, gasrening och konditionering i en reaktor. www.uniqueproject.eu.

Woodgas

Tom Reed, tidigare professor vid MIT och Colorado Scholes of Mine har utvecklat en hemsida relaterad till förgasning av biomassa, www.woodgas.com. Sidan är pedagogiskt upplagd och innehåller bland annat en animation av förgasningsprocessen. Här finns även en bokhandel med relevant litteratur.

LITTERATUR

A V Bridgwater, H Hofbauer and S van Loo (Eds.). *Thermal Biomass Conversion*. ISBN 978-1-872691-53-4, 2009.

429 sidor med förbränning, pyrolys och förgasning av biomassa. Innehåller en hel del bilder i fyrfärg. Tre kapitel behandlar gasrening, syntetisering och konditionering. Icke-tekniska barriärer och HSE (Health, Safety and Environment) har fått vars ett eget kapitel.

Boken kan beställas på <http://www.cplbookshop.com/contents/C3568.htm> för £125, drygt 1300 kr.

Basu, Prabir. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. ISBN 0849333962. Taylor & Francis 2006.

473 sidor om förbränning och förgasning i fluidiserande bäddar. Innehåller en del bilder, ekvationer och diagram (alla i svart-vitt). Påminner om en lärobok med inlagda räkneexempel.

Boken kan beställas på <http://www.adlibris.se> för ca 1122 kr.

Highman, C. and van der Burgt, M. *Gasification*. ISBN 978-0-7506-7707-3. Elsevier, 2003.

391 sidor om kol- och biomassaförgasning. Boken behandlar förgasning från ett relativt teoretiskt perspektiv.

Boken kan köpas på <http://www.bokus.com> för ca 452 kr

Knoef, H.A.M. *Handbook Biomass Gasification*. ISBN 90-810068-1-9. Biomass technology group, the Netherlands, 2005.

378 sidor om biomassaförgasning. Behandlar förgasning utifrån ett mer praktiskt perspektiv med många hänvisningar till verkliga anläggningar. Boken är relativt påkostad med ett stort antal färgbilder på anläggningar, komponenter, process-scheman etcetera. Boken kan beställas på <http://www.btgworld.com> för ca 90 €.

Prins, Mark Jan. *Thermodynamic analysis of biomass gasification*. ISBN 978-3-639-10006-8, 2008.

148 sidor om biomassaförgasning. Behandlar förgasning ur ett termodynamiskt perspektiv men tar även upp torrefaktion, värmebehandling av trä för ökad energitäthet. Boken innehåller många ekvationer och diagram men är skriven på ett relativt lättförståeligt sätt.

Boken kan beställas på <http://www.adlibris.se> för ca 415 kr.

Rezaiyan, John och Cheremisinoff, Nicholas, P. *Gasification Technologies – A Primer for Engineers and Scientists*. ISBN 0824722477, 2005.

336 sidor med kol- och biomassaförgasning. Innehåller få bilder och diagram jämfört med de övriga böckerna. Har ett omfattande kapitel (ca 100 sidor) om gasreningen.

Boken kan beställas på <http://www.adlibris.se> för ca 1025 kr.

REFERENSER

- ¹ Energigas och miljö. GasAkademin, Svenskt Gastekniskt Center AB, 2006.
- ² Peter Haventon. *Gengas – dokument från en bister tid*. ISBN 91-87005-14-X. 2005.
- ³ Review of Finnish biomass gasification technologies, OPET Report 4, 2002
- ⁴ H.A.M. Knoef (editor). *Handbook Biomass Gasification*. BTG biomass technology group, 2005.
- ⁵ M. Lindblom and I. Landälv. Chemrec's Atmospheric & Pressurized BLG (Black Liquor Gasification) Technology – Status and Future Plans. 2007 International Chemical Recovery Conference.
- ⁶ H. Thunman. Re-buidling of the Chalmers CFB furnace to accomodate an indirect gasfier. International Seminar on Gasification and Methanation, 20-21 September 2007, Gothenburg.
- ⁷ Babu, Suresh P. Perspectives on Biomass Gasification. IEA Bioenergy Task 33 Thermal Gasification of Biomass. Work Shop No 1, May 2006.
- ⁸ Vogels., J. The Carbo-V® gasification process for the production of syngas. International seminar on gasification and methanation, Gothenburg, September 2007. Svenskt Gastekniskt Center AB.
- ⁹ D. J. Stevens. Hot Gas Conditioning. Rapport NREL/SR-510-29952, National Renewable Energy Laboratory, August 2001.
- ¹⁰ J. Rezaian and N.P. Cheremisinoff. *Gasification Technologies – A Promer for Engineers and Scientists*. ISBN 0-8247-2247-7.
- ¹¹ Prabir Basu. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. ISBN 0-8493-3396-2. 2005.
- ¹² M.A. Alvin. Filter Componet Assessment – Ceramic Candles. Final Report DOE/NETL Contract No. DE-AC21-94MC31147. April 2004.
- ¹³ H. Boerrigter et al. OLGA Optimum. Improving the economics of integrated biomass gasification plants by extension of the functionalities of the OLGA tar washer. ECN-rapport ECN-E--06-048, July 2006.
- ¹⁴ D. Dayton. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. NREL/TP-510-32815, National Renewable Energy Laboratory, December 2002.
- ¹⁵ M. Virgine et al. Comparison between olivine and M/olivine (M=Fe,Ni) for tar removal and additional hydrogen production by water gas shift reaction. International Conference on Polygeneration Strategies. Vienna, September 2009.
- ¹⁶ R.W.R. Zwart. Gas cleaning downstream biomass gasification. ECN-E—08-078, 2009.
- ¹⁷ C. Higman and M. van der Brugt. *Gasification*. ISBN 978-0-7506-7707-3.
- ¹⁸ Elforsk rapport 07:50. El från nya anläggningar. Elforsk 2007.
- ¹⁹ M. Schaub. Personal communication through e-mail 2009-01-13.
- ²⁰ M. Rudloff. Synthetic Gas to Fischer-Tropsch and other fuels. Föredrag på seminariet Biomass Gasification for Homes and Transport, Göteborg, Januari 2010, <http://www.monolithica.com/downloads-594514>
- ²¹ K. Salo and A. Horvath. Biomass gasification in Skive: Opening Doors in Denmark. Renewable Energy World, Januari 2009, www.renewableenergyworld.com
- ²² P. Saarivirta. Development and Experience of Biomass Gasification in Metso Power. International Seminar on Gasification 9-10 October 2008, Malmö.
- ²³ I. Sintzoff. Fixed bed gasification CHP innovations & opportunities. 15th European Biomass Conference. Berlin, May 2009.
- ²⁴ Pressrelease från M+W Group, 17 mars 2009.
- ²⁵ M. Valleskog, Å. Marbe och L. Colmsjö. System- och marknadsstudie för biometan (SNG) från biobränslen. SGC Rapport 185, ISRN SGC-R-185-SE, Svenskt Gastekniskt Center, mars 2008.
- ²⁶ L. Colmsjö och R. Nilsson. Marknadsförutsättningar för SNG i Sverige och i Europa. SGC Rapport 212. ISRN SGC-R-212-SE, Svenskt Gastekniskt Center, juni 2009.



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
