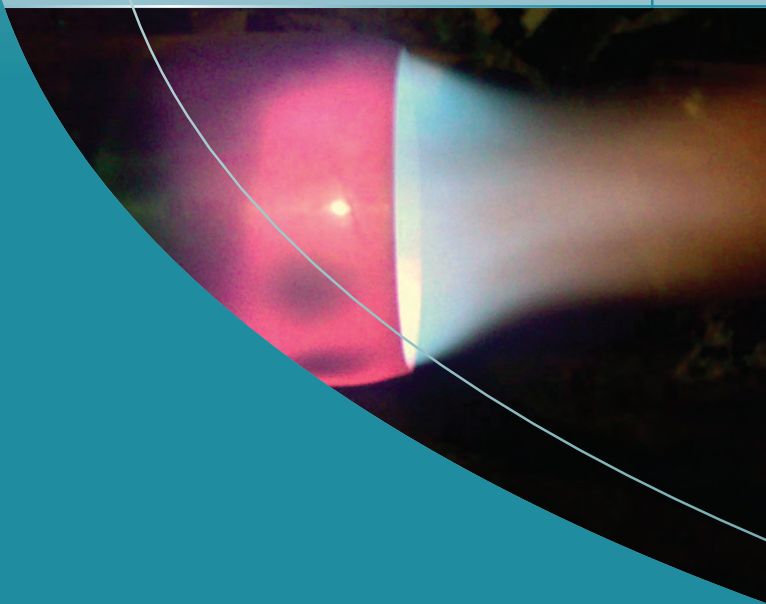


Ulla Lassi och Bodil Wikman (red.)

# FÖRGASNING AV BIOMASSA TILL VÄRME, ELEKTRICITET OCH BIOBRÄNSLEN

Publikation för HighBio-projektet



# FÖRGASNING AV BIOMASSA TILL VÄRME, ELEKTRICITET OCH BIOBRÄNSLEN

Publikation för HighBio-projektet

Red. av Ulla Lassi och Bodil Wikman

**HIGHBIO-INTERREG NORD**  
1.7.2008 – 30.6.2011

*Biomassan kaasutus lämmöksi, sähköksi ja biopolttoaineiksi*  
*Förgasning av biomassa till värme, el och biobränslen*  
*Gasification of biomass to heat, power and biofuels*



Gränslösa möjligheter



EUROPEISKA UNIONEN  
Europeiska regionala  
utvecklingsfonden

**INTERREG**  
**IV/NORD**

Jyväskylän yliopisto  
Karleby universitetscenter Chydenius  
Karleby 2011



JYVÄSKYLÄ UNIVERSITET  
KARLEBY UNIVERSITETSCENTER  
CHYDENIUS



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY OF OULU



**ETC**

LULEÅ  
TEKNISKA  
UNIVERSITET

Layout: Päivi Vuorio  
Pärmens bild: Yrjö Muilu

ISBN 978-951-39-4314-1 (hft.)  
ISBN 978-951-39-4315-8 (pdf)

Forsberg Rahkola  
Jakobstad 2011

## FÖRORD

---

Användning av förnybar energi och biomassa som råvara för energiproduktion främjar hållbar utveckling och mångsidig användning av naturresurser, på samma gång som det minskar beroendet av fossila bränslen. Från träflis kan man producera elektricitet, värme, biobränslen och nya kemiska råvaror för industrin. Att effektivt utnyttja biomassa kräver toppkunskap, utveckling av nya processer och ett nytt tänkesätt, inom vilket också internationellt samarbete har en central betydelse.

I HighBio-projektet, som verkat under perioden juli 2008 till juni 2011, har producerats ny kunskap om förgasning av biomassa, användning av den produktgas som fås vid förgasningen t.ex. vid tillverkning av biobränslen samt användningsmöjligheter för aska från förgasning av biomassa, inom ramen för en decentraliserad energiproduktion. I småskaliga CHP (Combined Heat and Power) –enheter kan man samtidigt producera elektricitet och värme genom att förgasa trä och förbränna den gas som bildas. Genom förgasning kan man producera partikelfri och energiintensiv gas, varför teknologin samtidigt är ett svar på de allt mer restriktiva miljökrav som Europeiska unionen ställer. Många små- och medelstora företag som verkar i norra Finland och norra Sverige har gjort pionjärbete i fråga om utveckling av teknologi för förgasning av trä. I detta utvecklingsarbete har också HighBio-projektet tillsammans med sina forskare deltagit aktivt.

Ökning av användningen av förnybar energi i energiproduktionen ger möjligheter för företagsamhet och utvecklandet av en livskraftig landsbygd. För att dessa möjligheter skall kunna utnyttjas till fullo behövs stödåtgärder som forskning, produktion av nya innovationer och framgångsrik kommersialisering av dessa. HighBio-projektet har för sin del försökt svara på dessa utmaningar bl.a. genom forsknings-samarbete, anordnande av projektseminarier och träffar med intressegrupper. Det regionala samarbetet med redan existerande nationella och internationella forskningsnätverk har utgjort ett stadigt fundament för denna verksamhet.

Till sist vill vi tacka alla samarbetspartners som har deltagit i projektet; forskare, finansiärer, aktiva företag, samt alla aktiva deltagare i seminarier och intressegruppsträffar. Ni har gjort detta projekt intressant, utmanande och i synnerhet viktigt för samhället.

Karleby den 12 maj 2011

Ulla Lassi  
Professor i tillämpad kemi  
Ansvarig ledare för HighBio-projektet

Bodil Wikman  
Projektkoordinator



Inom HighBio-projektet har ordnats seminarier och studiebesök växelvis av olika partners. På bilden den finska HighBio-delegationen på studiebesök till Smurfit Kappas kraftpappers- och bioenergiproduktionsanläggningar i Piteå, Sverige inom ramen för ett projektseminarium i maj 2010.

## INNEHÅLL

---

### EN UTLOKALISERAD ENERGIPRODUKTION

En utlokaliserad energiproduktion <i>Ulf-Peter Granö</i>	9
---	---

### FÖRGASNING AV BIOMASSA

ETC:s bidrag till HighBio-projektet <i>Magnus Marklund och Olov Öhrman</i>	19
---	----

Centrias medströmsbiomassaförgasare för småskalig CHP-produktion <i>Yrjö Muilu och Kari Pieniniemi</i>	31
--	----

Förgasning och analys av produktgasen <i>Kari Pieniniemi och Yrjö Muilu</i>	41
--	----

Förgasningsteknologins framtid <i>Jukka Konttinen</i>	50
--	----

Förgasningsteknologi ur användarens synvinkel <i>Pentti Etelämäki</i>	53
--	----

### BIOBRÄNSLEN OCH ANVÄNDNING AV PRODUKTGAS

Framtidens biobränslen <i>Kirsi Partanen och Ulla Lassi</i>	59
--	----

Nya kemiska produkter och nya tillämpningar från syntesgas <i>Henrik Romar, Pekka Tynjälä och Riikka Lahti</i>	68
---	----

## ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER FÖR ASKA

Kemiska studier för användningen av aska <i>Sari Kilpimaa, Toivo Kuokkanen och Ulla Lassi</i>	81
--	----

## TEKNISK-EKONOMISK UTVÄRDERING

Biobränslebaserad småskalig kraftvärme – ekonomiska förutsättningar <i>Joakim Lundgren</i>	91
Informationsblad från HighBio-projektet	98
Publikationer och rapporter med anknytning till HighBio-projektet	101
Finansiärer	104

# **EN UTLOKALISERAD ENERGIPRODUKTION**





## EN UTLOKALISERAD ENERGIPRODUKTION

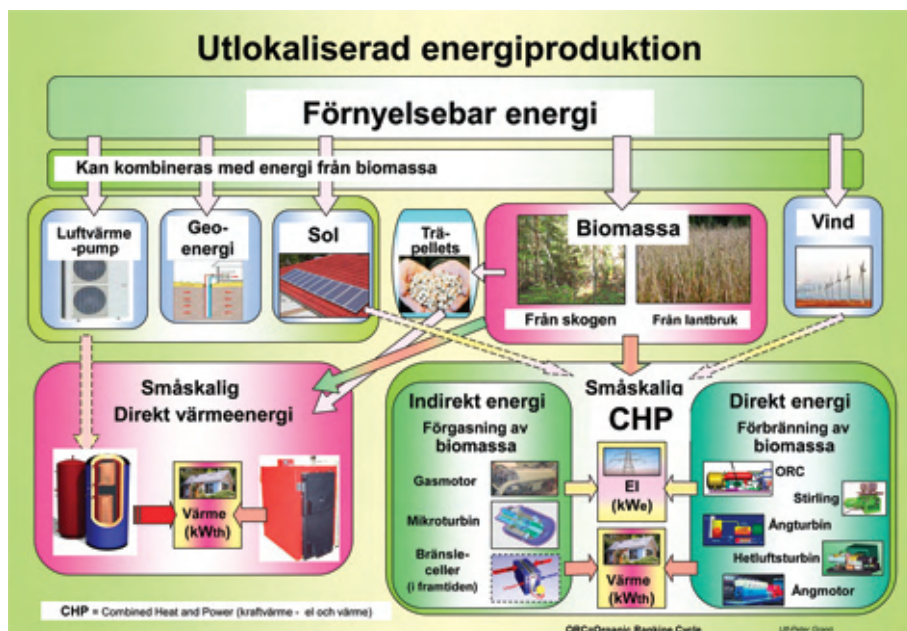
---

*Ulf-Peter Granö*

Småskaliga lösningar som är utlokaliserade, nära både råvaran och förbrukarna, är viktiga delar i den framtida nationella energiproduktionen. Vi har tyvärr fortfarande storskaliga företag i Finland som utnyttjar sina resurser för att motarbeta småskaliga lokala lösningar. Men vi får hoppas det sunda förnuftet segrar och också utlokaliserade energiproducerande verksamheter i mindre skala kan utvecklas. Speciellt mindre lokala CHP enheter (värme + el) kan bidra till utvecklingen för en hållbar energiproduktion.

### EN UTLOKALISERAD CHP-FÖRÄDLING AV BIOMASSA

I de finska och svenska skogarna finns det stora mängder outnyttjade biobränsleresurser. Dessa kunde nyttjas, förutom för el och värme också som råvaror för fordonsbränsle och som kemiska råvaror i framtiden. Teknikutvecklingen går snabbt framåt, idag forskas det över hela världen för enkla och driftsäkra lösningar för förädlingsprocesserna.

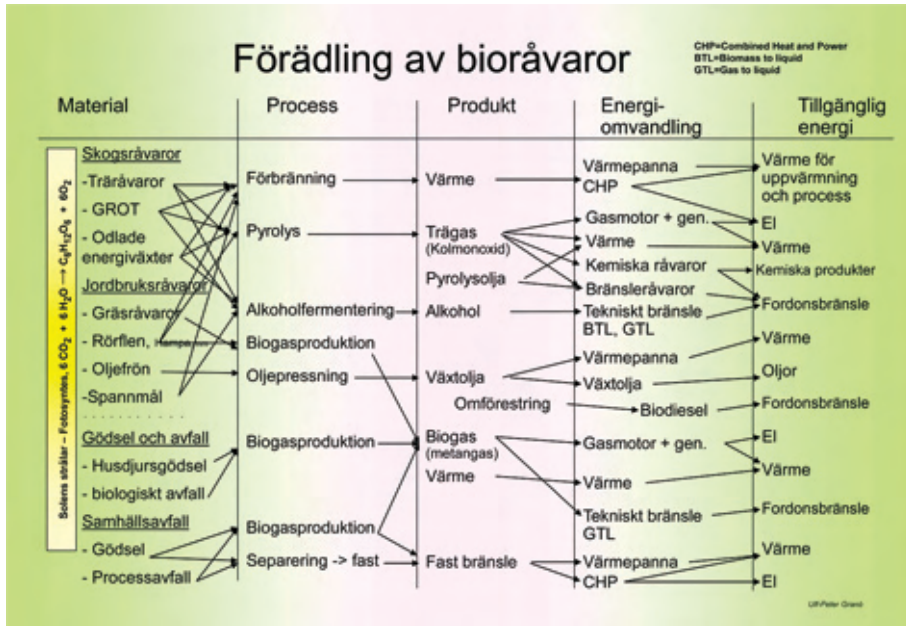


FIGUR 1. Utlokaliserad energiproduktion

Småskaliga lösningar för att förädla biomassan från närområdet för förbrukarna i den närliggande regionen har inte fått de utvecklingsresurser som varit önskvärda. Tyvärr är det speciellt ofta i Finland de stora aktörerna som syns och hörs vilket också gjort att både nationella och EU stöd ofta riktats till dessa. Myndigheter och beslutsfattare har inte haft intresse eller förmåga att se den verkligt stora potential som finns i småskaliga lösningar för t.ex. Kraftvärmeproduktion.

## SAMMANFATTANDE ÖVERSIKT – FÖRÄDLING AV BIOENERGIRÅVAROR

I bilden nedanför finns en grov översikt som sammanfattar exempel på vägar för förädling av olika bioråvaror. Bioråvarorna kan komma från skog, jordbruk, gödsel och avfall från lantbruk, samhällsavfall eller vara avfall från t.ex. processindustrin.



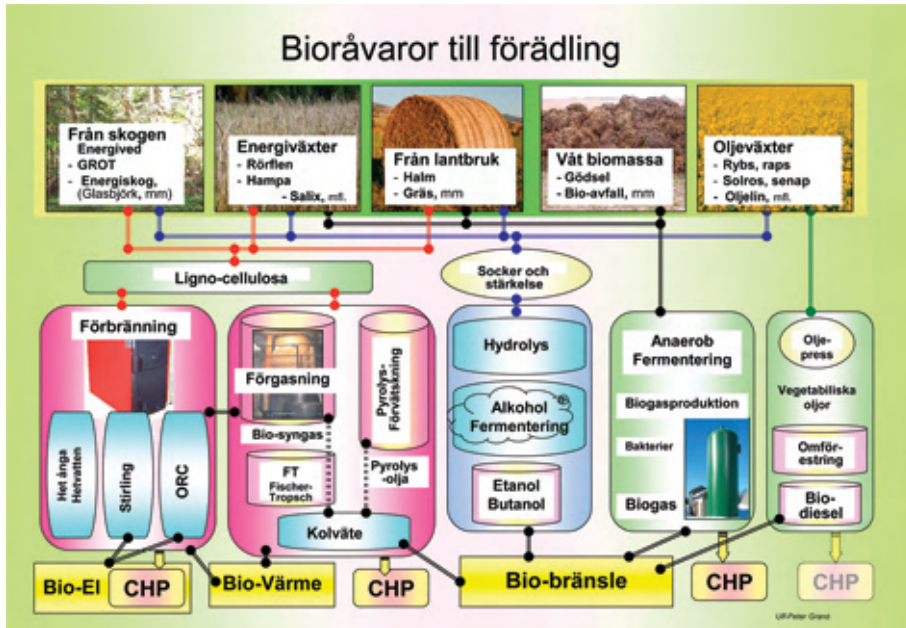
FIGUR 2. Förädling av bioråvaror

## CHP – KRAFTVÄRME

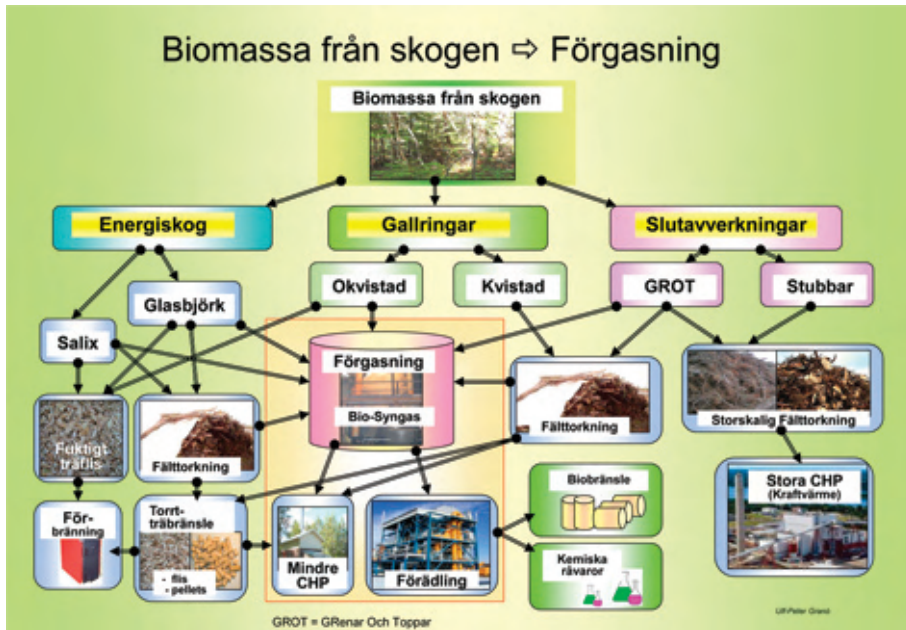
Utlokaliserade CHP enheter för el- och närvärme kan utformas på flera olika sätt, mycket beroende på inom vilken storlek på elproduktion man eftersträvar. En viktig faktor är det garanterade elpriset eller "elbidraget".

Några exempel på vilken typ av enhet det kan vara,

- Direkt förbränning av träflis/pellets + Stirling
- Direkt förbränning av träflis/pellets + ORC (Organic Rankine Cycle)
- Direkt förbränning av träflis/pellets + liten ångturbin
- Förgasning + direkt förbränning + Gasmotor eller Mikroturbin
- Förgasning + direkt förbränning + ORC
- Förgasning + Gasmotor (kolvmotor)
- Förgasning + Mikroturbin
- Biogas + Gasmotor
- Biogas + Mikroturbin
- Kombinerad Bio-Syngas och Biogas + Gasmotor eller Mikroturbin



FIGUR 3. Bioråvaror till förädling.



FIGUR 4. Biomassa från skogen.

## BIOMASSA OCH OLJEVÄXTER

Bioråvaror för grön energi från skogen och lantbruket kan komma från många olika råvarukällor. Nedanför en grov översikt;

**Biomassa från skogen** kan förenklat indelas i,

- **Energived**, av olika dimensioner från röjningar och gallringar.
- **GROT**, grenar och toppar från avverkningar.
- **Energiskog**, eller energiskog med kort rotation t.ex. odling av glasbjörk.

**Energiväxter** som odlas på åkermark,

- Rörflen, Hampa (fiberhampa för biomassa), elefantgräs, m.fl.
- Salix eller pil, odlas främst på åkermark och är en mellanform till energiskog.

**Från lantbruket**

- Halm, Gräs, och andra växter som odlats för biogasproduktion.

**Våt biomassa**

- Gödsel och bioavfall som t.ex. förstört ensilage i balar eller från silo.

**Oljeväxter**

- Rybs, Raps, Solrosor, Senap, Oljelin, m.fl., ur dessa kan bioolja pressas som i sin tur genom omförestring kan bli till biodiesel.

## GRÖN ENERGI – INTEGRERAD FÖRÄDLING AV BIOMASSA

Småskalig och utlokaliserad förädling av biomassa har goda möjligheter att i framtiden bli en viktig nyckel i ett regionalt miljötänkande. Genom forskning för ny teknik, anpassad till utlokaliserade förädlingsprocesser, kan den lokala biomassa råvaran förädlas för lokala- och närregionens kunder och förbrukare. Det finns ett ökat intresse för att integrera, och på olika sätt koppla ihop förädlingsprocesserna för att öka samordningen, och på så sätt skapa positiva synergieffekter.

## TRÄ-FÖRGASNING

Genom förgasning av biomassa kan man få en användbar produktgas som är en intressant gasråvara, den kan användas för direkt förbränning eller för en vidareförädling.

Bland de mest intressanta alternativen, med sikte mot bränsle eller kemiska råvaror, är Trä-förgasning av skogsbaserade bioenergiråvaror.

Syngasen eller produktgasen kan användas för en vidare förädling efter rening och anpassning. Användningsområden är bl.a.;

- **Direkt förbränning för värmeproduktion**
- **Direkt förbränning i CHP enhet, för el- och värmeproduktion**
- **Gasbränsle för elproduktion – CHP med,**
  - kolvmotor/gasmotor
  - gasturbin
  - bränsleceller (kommer i framtiden)
- **Förädling och uppgradering till,**
  - fordonsbränsle
  - kemiska råvaror

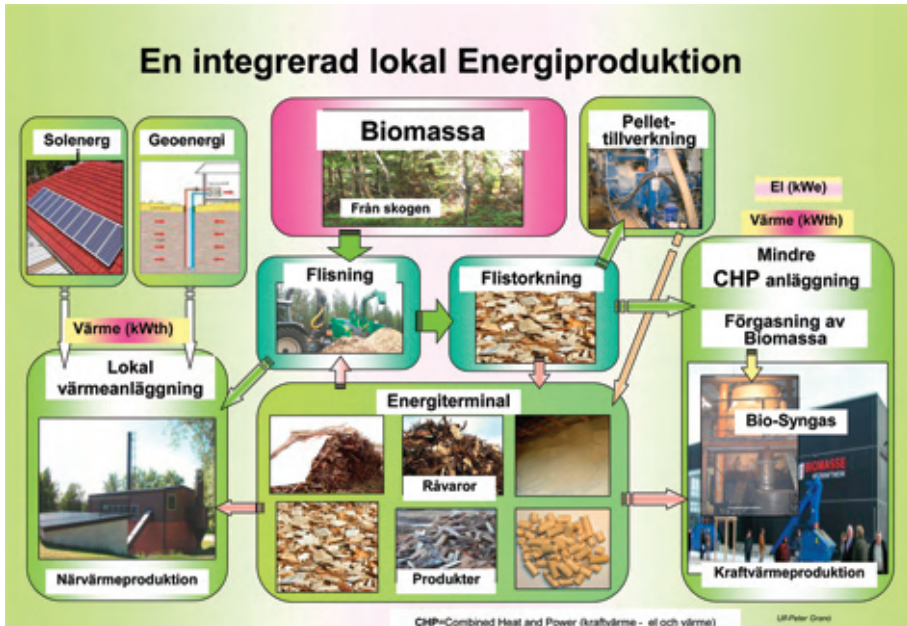
## INTEGRERINGSMÖJLIGHETER

Samordning av verksamheter kring en värmeenhet för närvärme kan ske på olika sätt och utvecklas allt efter som. Därför är det redan i etableringsstadiet av närvärmeenheten viktigt att försöka placera denna så att man kan göra en framtida utveckling på ett smidigt sätt. Det behövs markutrymmen och fungerande logistik i vägar samt el- och värmeförbindelser i form av ledningar och rör.

Några exempel på verksamheter i paletten för integrering kan vara;

- Flistorkning
- CHP enhet (kraftvärme, el + värme)
- Energiterminaler med en Integrerad hantering av biomassa- och förädlade råvaror
- Förgasning av biomassa
- Solenergi
- Geoenergi
- Pelletproduktion
- Biogasproduktion från lantbruk
- Biogasproduktion från närsamhälle
- Förädling till råvaror för fordonsbränsle

Vad som ska ingå beror främst på den lokala utvecklingen och intressen.



FIGUR 5. En integrerad lokal energiproduktion.

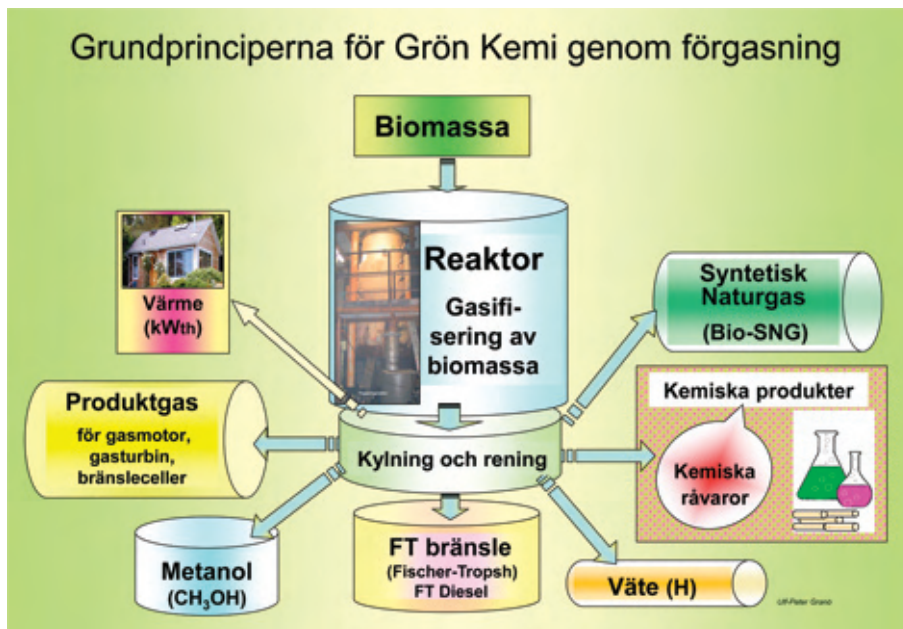
Integreringen utvecklas ofta stegvist, och är beroende på i vilken följd man vill ta de olika bitarna när man utvecklar den lokala verksamheten. Vad som prioriteras beror främst på intresset inom t.ex. det lokala energikooperativet samt närområdets behov och efterfråga.

## GRÖN KEMI

Genom en kemisk förädling av syngasen eller produktgasen, kan en mängd olika råvaror och olika produkter tas fram. De största förväntningarna finns i anslutning till fordonsbränsle som ersättning till de fossila bränslena. När biomassa från skogen är råvara konkurrerar inte denna med de åkergrödor som passar för livsmedelsproduktion.

Genom att utveckla den Gröna Kemin kan man minska beroendet av de fossila oljeprodukterna, de lokala bioenergi-resurserna kan nyttjas bättre, vilket kan öka sysselsättningen och självförsörjningsgraden i regionen.





FIGUR 6. Grundprinciperna för grön kemi genom förgasning.

## MINDRE ENHETER FÖR RAFFINERINGEN

Ett bra alternativ är att förgasningen och raffineringen ordnas i närheten av en CHP anläggning, då kan man effektivt nyttja värmen från förgasningsprocessen och uppgraderingen av produktgasen. På så sätt kan man både säkra att lågvärdig gas och värmen som produceras i anläggningen kan nyttjas i CHP anläggningen och dess fjärrvärmenät.

Mindre anläggningar som förgasar biomassa passar främst för produktion av el och värme i anslutning till lokala CHP anläggningar. Speciellt om man har tillgång till en av de framtida förgasningsreaktorerna som kan använda fuktigt eller torrt biobränsle och samtidigt producera en trägas utan tjärpartiklar. För CHP enheter med förgasning av biomassa som kräver torkning av bränslet samt också måste ha en effektiv rening från tjära, måste vara en tillräckligt stor anläggning för att få lönsamhet i gasproduktionen.

Det finns redan idag stora möjligheter att genom en utlokaliserad energiproduktion, nyttja lokala bioenergiråvaror och genom småskalig förädling bidra till en hållbar utveckling.

# **FÖRGASNING AV BIOMASSA**



## ETC:S BIDRAG TILL HIGHBIO-PROJEKTET

---

*Magnus Marklund och Olov Öhrman*  
*Energitekniskt Centrum, Piteå, Sverige*

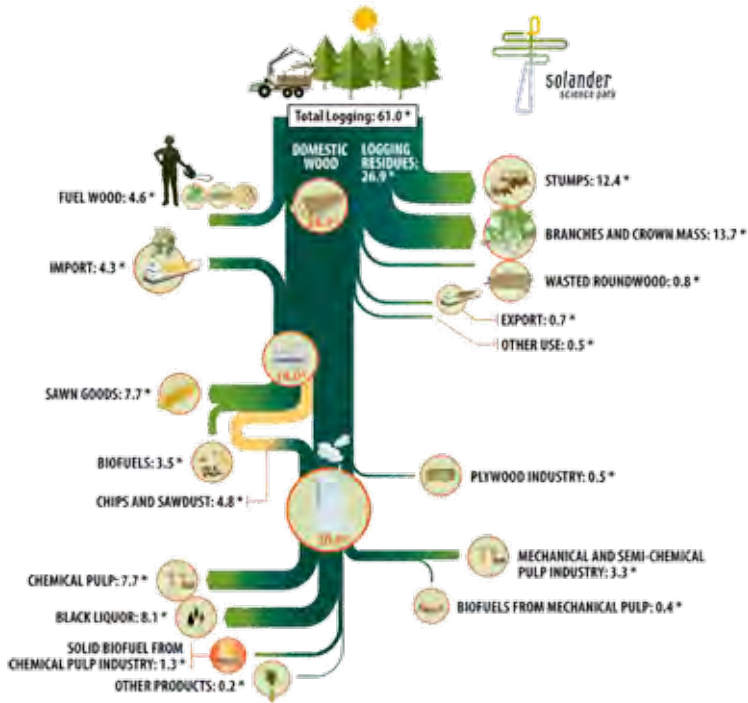
### MEDSTRÖMSFÖRGASNING I PILOTSKALA

Ett ökat energinyttjande av biomassa både nationellt och globalt kommer att bidra till att minska behovet av fossila bränslen och långsiktigt begränsa växthuseffekten. Utöver generering av elenergi kan biomassan effektivt omvandlas till värdefulla material, kemikalier och biodrivmedel via så kallade bioraffinaderier baserade på modern teknik. I Figur 1<sup>1</sup> presenteras materialflödet av den årligen avverkade skogsbiomassan i Sverige där ca 45 % är i form av hyggesavfall (motsvarar ca 70 TWh).

Vid Energitekniskt Centrum (ETC) i Piteå pågår arbete med ett pilotprojekt kring förgasning av biomassa som även varit en del inom High-Bio. Hitills har projektet omfattat design, konstruktion och driftsättning av pilotanläggningen som är baserad på trycksatt medströmsförgasning (Pressurised Entrained flow Biomass Gasification, PEBG). Målet är produktion av syntesgas från skogsavfall och annan biomassa som industrin inte konkurrerar om idag. Teknikkonceptet bygger på att vid hög temperatur (> 1200 grader C) förgasa pulverformig biomassa i en trycksatt medströmsförgasare med låg andel tjära och andra kolväten. Nackdelen med detta koncept i jämförelse med förgasning vid låg temperatur och långa uppehållstider är att bränslet måste finfördelas till ett fint pulver (partiklar < 1 mm) och att det omslutande materialet utsätts för hög värmelast och slaggande aska. De huvudsakliga tekniska utmaningarna för anläggningen är bränsleberedning och matning, kontroll på slaggbildningen samt optimal design av brännare och störtkylare för att säkerställa en jämn och stabil drift.

---

1 Nilsson P.O., Biomassaflöden i svensk skogsnäring 2004, Rapport 23-2006, Skogsstyrelsen, ISSN 1100-0295



FIGUR 1. Materialflödet för den årligen avvertrade skogsbiomassan i Sverige 2004.

När det gäller slaggningsavskavningen av askan så visar Tabell 1 innehållet av de olika delarna av trädet. T.ex. så ser man att andelen extraktivämnen<sup>2</sup> och aska är högre i barr och bark i jämförelse med stamveden. Detta betyder att avverkningsresterna från skogen har högre innehåll av extraktivämnen och askhalt p.g.a. barren och barken som följer med detta material i större utsträckning.

<sup>2</sup> Med extraktivämnen i vedmassa avses föreningar som är lösliga i petroleter, dietyleter, diklormetan, aceton, etanol och vatten. Till extraktivämnen, som är en heterogen grupp, hör bland annat lipider, terpenoider, fenoler, glykosider, småmolekylära kolhydrater, pektin, stärkelse och proteinföreningar.

**TABELL 1. Ungefärlig andel cellulosa, hemicellulosa, lignin, extraktivämnen och aska i barr och gran.<sup>3</sup>**

	Cellulosa	Hemicellulosa	Lignin [%] på torrsvikt	Extraktiv- ämnen	Aska
<b>Tall (ca 70 år)</b>					
Stamved	41	27	28	3	1
Bark, inre	36	26	29	4.5	2
Bark, yttre	25	20	48	3.5	2
Grenar	32	32	31	3.5	1
Barr	29	25	28	13	5
<b>Gran (ca 110 år)</b>					
Stamved	43	27	28	0.8	1
Bark	36	20	36	3.8	4
Grenar	29	30	37	1.7	2
Barr	28	25	35	6.1	5

PEBG-anläggningen vid ETC invigdes som 'IVAB-förgasaren' vid Solander-symposiet i november 2010 (se Figur 2 för en sidvy av anläggningen). Anläggningen togs i drift i april 2011 och alla delsystem har blivit systematiskt testade och inledande förbränningsförsök genomförda.



**FIGUR 2.**

PEBG-anläggningen vid ETC (döpt till 'IVAB-förgasaren') som tagits i bruk i april 2011.

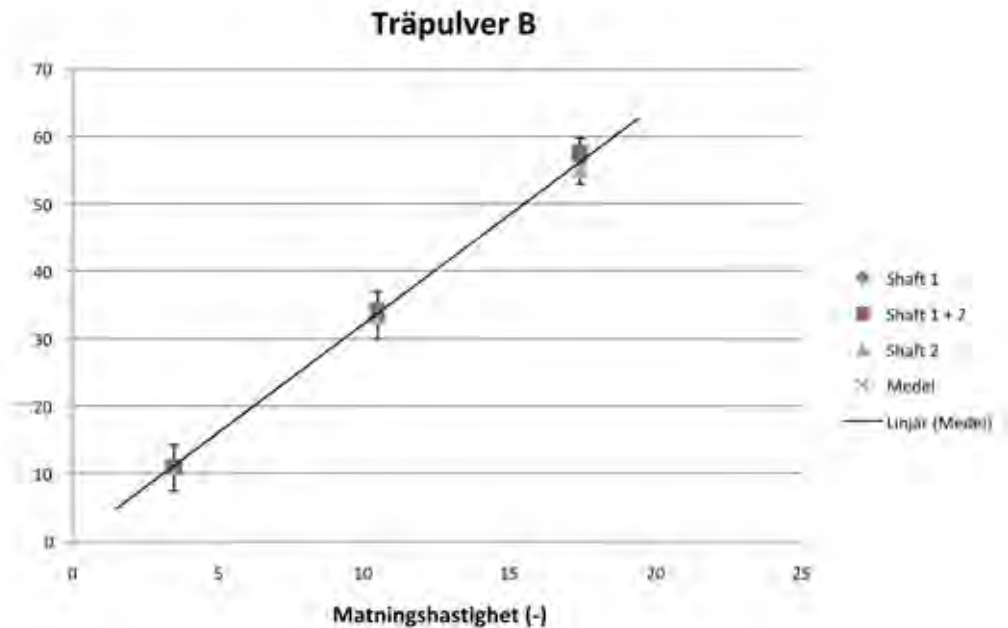
3 Eskilsson S., Hartler N., Svensk papperstidning nr. 2: 63-70 (1973)

De inledande förgasningskampanjerna i anläggningen kommer att fokuseras på atmosfärisk förgasning av stamved med en syntetisk luftblandning för att säkerställa säkerheten. Vidare kommer senare experimentkampanjer att genomföras under trycksatta förhållanden och med en ökad syrekoncentration för varierade bränslen (bark, stubbar och andra hyggesrester). Effekten är  $1 \text{ MW}_{\text{th}}$  vid 10 bars tryck, men den nominella driften kommer att ligga på  $500 \text{ kW}_{\text{th}}$  vid 5 bars absoluttryck.

## MATNING AV PULVER FRÅN BIOMASSA

Matning av biomassa i pulverform kan innebära problem p.g.a. fiberstrukturen i biomassan. Pulver från biomassa är huvudsakligen i form av små flisor som tenderar att haka i varandra och därmed bilda valv och bryggor när pulvret ska transporteras. Robusta och pålitliga matningssystem är en nödvändighet för alla typer av processer som hanterar biomassa i pulverform, speciellt när det rör förbränning och förgasning (t.ex. PEBG-processen). I dessa tillämpningar så krävs en jämn och stabil matning av pulvret. Det finns en mängd pneumatiska system för pulvertransport tillgängliga på marknaden för atmosfäriska processer, men dessa är inte lämpliga för trycksatta processer p.g.a. av den stora mängd transportgas som då krävs. Det mest lämpade matningskonceptet för trycksatt förgasning är av typen slussystem med parallella bränsletankar som kan alternera med fyllning och matning för att upprätthålla en kontinuerlig drift. För PEBG-anläggningen har ett sådant koncept uppförts och fungerat väl i de inledande testerna av detta delsystem.

De första testerna av matningssystem i PEBG-anläggningen utfördes med tre olika pulverbränslen under atmosfäriska förhållanden; ett barkpulver och två olika storleksfördelningar av stamvedspulver. Matningssystemet kalibrerades m.h.a. en våg som kunde logga bränsletransporten varje sekund. Linjäriteten på viktökningen i förhållande till matningshastigheten kan användas som ett stabilitetsmått på matningen. Vidare undersöktes också vilken inverkan bränsletyp, storleksfördelning och val av bränsletank har på stabiliteten. I Figur 3 visas en representativ bild över det linjära förhållandet mellan det uppmätta bränsleflödet och den ansatta matningshastigheten för ett pulver från stamved.



**FIGUR 3.** Relation mellan det uppmätta bränsleflödet (dimensionslös) och den ansatta matningshastigheten för ett pulver från stamved.

## BRÄNSLEBEREDNING

Under de senaste decennierna har pelletstillverkning och pulverförbränningen ökat stadigt. I båda processerna är bibränslemalning en viktig komponent. Detta gäller också för bibränsleförgasning i de anläggningar där träpulver används, exempelvis i cyklonförgasare eller medströmsförgasare. Kraven på pulvret skiljer sig dock mellan dessa tillämpningar. Vid pelletstillverkningen accepteras partiklar med storlek upp till 3 mm. Denna storlek måste sänkas till mindre än 1 mm vid pulverförbränning och förgasning. Det finns också krav på att en del motsvarande ca 10% av partiklarna i detta pulver är mindre än 100  $\mu\text{m}$ , vilket är viktigt för flammstabiliteten.

Malningen av bibränslet är mer komplicerad och mer energikrävande än kolmalning pga att kolet är sprödare och därmed lättare att sönderdelas. Tidigare studier visar på att kolmalning kräver i storleksordningen 7-36 kWh/t, vilket är mindre än det energibehov som rapporterats för bi-bränsle på 20-200 kWh/t. Vid malning av pellets för pulvereldning behövs det normalt att det mesta av pulvret har en storlek på mindre än 1 mm samt att en viss mängd är under 0,2 mm. Tabell 2 visar ett antal pellets-



tillverkare och deras kvarnar. Bionorr utmärker sig med den högsta energiförbrukningen, ca 74 kWh/t. Detta beror på att Bionorr använder sig av en speciell process där malningen sker innan torkning. Normalt sker torkningen innan malningen och därmed minskar man elbehovet. Det är inte alla verk som loggar sina eluttag vid malning och vissa siffror i tabell 2 är inte säkra eftersom de bygger på uppskattningar av malkapacitet och effekten på motorn som driver kvarnen. Det är rimligt att anta ett medelvärde för energiförbrukningen på 25 kWh/t vid malning av bibränsle med en fukthalt på 10–12%.

Energibehovet ökar markant med fukthalten. Bionorr använder ca tre gånger mer energi för malning än det högsta energibehovet vid de andra anläggningarna. Bionorr använder råflis med fukthalt på ca 50 % jämfört med de andra anläggningarna som malar torkad flis eller kutterspån med fukthalt på ca 12 %. Erfarenheter visar att följande faktorer, utöver fukthalt, påverkar energibehovet vid malning:

1. Sälltäten
2. Sällskivarean
3. Strukturen i ingående material

**TABELL 2. Olika malningstekniker som används i Sverige.**

Ägare	Märke	Säll (mm)	Produktion t/h	Motoreffekt 8kW	Energi (kWh/t)	Typ av bränsle	Fukthalt %
1. Glommers	Rysk (okänd)	6	1,6	25	15,6	Kutterspån, torr flis	9–15
2. SCA Bionorr	ABB	vindsikt	10	736	73,6	Råflis	45–55
3. Laxå Pellets	Andritz Sprout	2,5	8	200	25,0	Tall/gran spån	10
4. Luleå Bioenergi	Buhler	3	(7–10)		24,7	Flis	10–15
5. Derome Bioenergi	Buhler	4–6	5	118	24,0	Sågspån	12
6. Lantmännen Agroenergi Ab	Andritz Sprout	4–6	10	315	31,5	Bearbetad flis (max 15 mm)	11
7. Vida Pellets	Andritz Sprout	5	16	12,5	12,5	Kutterspån	12

En annan förbehandlingsteknik är torrefiering som är en process för värmebehandling av bibränsle för att omvandla det från hydrofilt material till hydrofobt. Processen sker vid 250-300 °C i en inert miljö (rökgaser). Vid värmebehandling av torrt trä vid dessa temperaturer förändras strukturen hos bindningen mellan cellulosa, hemicellulosa och lignin (träets huvudkomponenter). Hemicellulosa är den minst värmestabila komponenten i trä och är källan till de flesta ämnen som produceras vid torrefiering. Nedbrytningen av hemicellulosa initierar också vissa strukturförändringar i ligninet, däremot påverkas inte cellulosan nämnvärt.

Tabell 3 visar en lista från olika referenser som rapporterar mass- och energiutbyten och vilka randvillkor som var gällande vid försöken. Tabellen visar att massutbytet varierar mellan 43 och 87 % beroende på träslaget, temperaturen och uppehållstiden. Energiutbytet visar också på stora variationer. Det lägsta energiutbytet ligger på 50 % och det högsta ca 93 %. Det finns vissa resultat som ligger högre än dessa.

**TABELL 3. Mass- och energiutbyte vid torrefiering.**

Material	Massutbyte (%)	Energiutbyte (%)	Värmevärde (MJ/kg)	Temp (°C)	Upphållstid (min)
Vetehalm	72,0	77,0	20,7	270	30
Rörflen	71,0	78,0	20,8		
Pilträ	80,0	86,0	21,7		
Vetehalm	55,1	65,8	22,6	290	30
Rörflen	61,2	69,0	21,8		
Pilträ	72,0	79,2	21,9		
Pilträ	87,0	95,0	19,4	250	30
Pilträ	67,0	79,0	21,0	300	10
Träavfall	56,0	65,0	22,8	270	30
Träavfall	54,0	62,0	23,0		60
Träavfall	54,0	62,0	23,0		90
Björk	68,9	88,3	21,1	280	120
Furu	72,1	92,9	22,3		
Bagass *	64,7	82,8	19,8		

\* Sockerrörsavfall

Trä innehåller tre huvudkomponenter; cellulosa, hemicellulosa och lignin. Dessa tre ämnen är polymerer med svaga kemiska bindningar. Vid värmebehandling av torrt trä i temperaturer över 200°C förändras strukturen hos dessa bindningar. Här skiljer sig hemicellulosan för mjuk- och hårdträ. Hemicellulosan i hårdträ innehåller 80-90 % xylan medan den i mjukträ innehåller 60-70% glukomannan och 15-30% arabinogalaktan. Xylan

är mer värmekänslig än de andra komponenterna och detta förklarar den högre massförlusten vid torrefiering av hårdträ och halm.

## PRODUKTGASSAMMANSÄTTNING

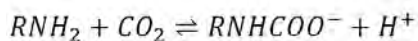
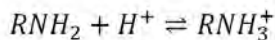
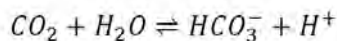
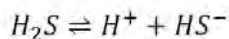
Vid förgasning av biomassa bildas en syntesgas bestående av  $H_2$  (vätgas), CO (kolmonoxid) och  $CO_2$  (koldioxid). Utöver dessa komponenter kan syntesgasen innehålla mindre mängder av föroreningar, t.ex.  $H_2S$  (svavelväte), COS (karbonylsulfid), merkaptaner, tyngre kolväten (tjära) och partiklar. Det kan också förekomma spårämnen som halider och HCN (cyanväte). Beroende på vad syntesgasen skall användas till behöver den renas olika mycket. Generellt gäller att om gasen ska användas för katalytisk syntes av transportbränsle krävs en högre rening än om gasen skall användas för kraftproduktion. Olika gasreningstekniker existerar idag. De tekniker som kan vara aktuella för att rena syntesgas från en biomassaeförgasare är följande och beskrivs nedan:

- Fysikalisk och kemisk gastvätt (absorption)
- Adsorption
- Termisk eller katalytisk omvandling
- Membran

## ABSORPTION

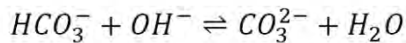
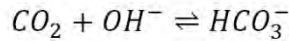
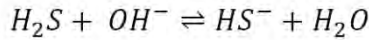
När en gas löser sig i en vätska sker absorption. Det finns två typer av absorption; kemisk och fysisk. Ett exempel på kemisk absorption är amin-tvätt som kan användas för att rena syntesgas från  $H_2S$  och  $CO_2$ . Det finns många olika typer av aminer som används.

De generella reaktioner som sker är:

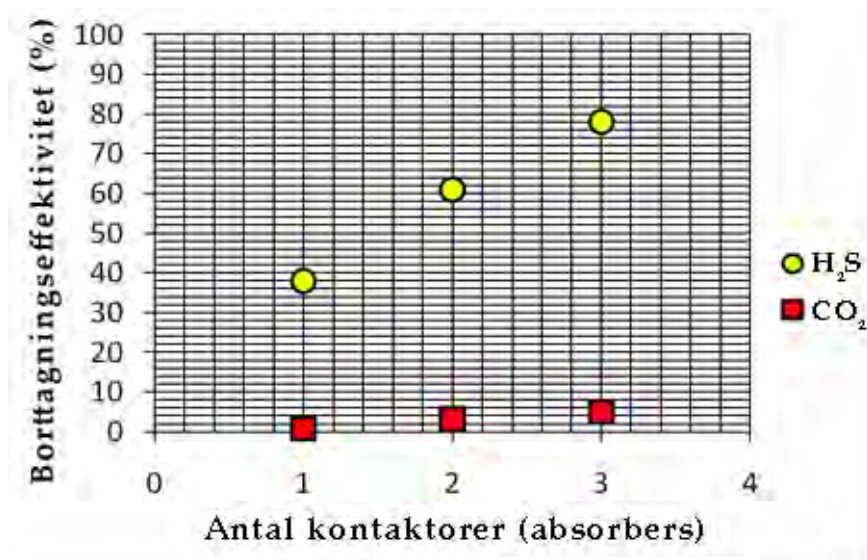


Även alkaliska lösningar kan användas för att rena syntesgas. Ofta används lösningar av  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (natriumkarbonat) eller  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (kaliumkarbonat) vid pH 9-11.

De reaktioner som sker är:



Ett exempel på rening av  $\text{H}_2\text{S}$  från syntesgas framställd i svartlutsförgasning visas i figur 4. Grafen visar hur mycket av  $\text{H}_2\text{S}$  som kan tas bort från syntesgasen med hjälp av korttidskontakter som innehåller utspädd grönlut. Det är alltså fråga om en slags alkalisk tvätt av gasen. I experimentet kunde 78 % av  $\text{H}_2\text{S}$  tas bort från syntesgasen med 3 stycken korttidskontakter.



FIGUR 4. Rening av  $\text{H}_2\text{S}$  med utspädd grönlut vid 50 °C. På bilden presenteras borttagningseffektiviteten som funktion av antalet korttidskontakter.

Exempel på kommersiella processer som använder sig av alkaliska lösningar är: Benfield, Catacarb, Flexsorb, Giammarco-Vetrocoke, Seabord, Vacuum Carbonate, Vacasulf och Alkacid, etc.

När stora mängder föroreningar behöver tas bort kan en fysisk absorption vara lämplig. Organiska lösningsmedel såsom metanol används för att absorbera föroreningarna. Från reningsanläggningen fås förutom en renad syntesgas också rena gasströmmar bestående av t.ex.  $H_2S$  och  $CO_2$ . Exempel på kommersiella tekniker är Selexol, Sepasolv, Purisol och Rectisol.

Två olika processer där både kemisk och fysisk absorption sker är Sulfinol och Amisol. Den fysiska absorptionen används för att ta bort det mesta av föroreningarna och den kemiska för att rena till slutlig halt. I tex Amisolprocessen används metanol för fysisk absorption och en alkylamin som kemiskt lösningsmedel.

## ADSORPTION

Adsorption sker oftast vid låg temperatur. Liksom för absorption kan adsorption vara fysisk eller kemisk. Vid adsorption binds en gas till ytan på ett material med hög yta t.ex.  $500 \text{ m}^2/\text{g}$ . Exempel på material som används i adsorption är aktivt kol eller zeoliter. Aktivt kol används för att ta upp tyngre kolväten ur en gasström. Zeoliter kan användas för att ta bort  $CO_2$  ur en produktgas. Regenerering av adsorbenterna kan ske genom att de hettas upp eller genom tryck. Zinkoxid ( $ZnO$ ) kan användas för att ta bort  $H_2S$  ur en gasström.  $H_2S$  reagerar med  $ZnO$  och bildar zinksulfid ( $ZnS$ ) vid förhöjd temperatur.  $ZnS$  är svår att regenerera. Med anledning av detta används detta enbart för att ta bort små mängder av förorening innan gasen leds till katalysatorerna för framställning av transportbränsle.

## TERMISK ELLER KATALYTISK OMVANDLING

Föroreningar kan också tas bort via termisk eller katalytisk omvandling. Odörer och flyktiga organiska föroreningar kan oxideras termiskt. Via katalytiska omvandlingar kan föroreningar tas bort vid lägre temperaturer.

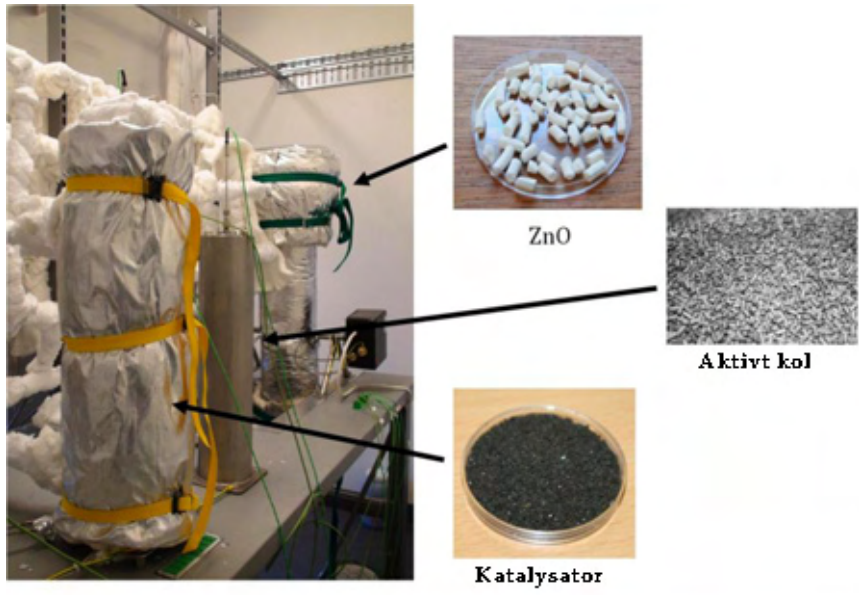
## MEMBRAN

På senare tid har membran börjat användas i gasrening. Zeolitmembran eller polymermembran används för att selektivt separera ut en speciell komponent ut en gasström. På ETC har nyligen CO<sub>2</sub>-selektiva zeolitmembran testats framgångsrikt vid höga tryck. Membranen har stor potential att kunna användas i biodrivmedelproduktion eftersom syntesgasen från en biomassafergasare behöver renas från CO<sub>2</sub>.

## SYNTESGAS TILL HÖGVÄRDIGA PRODUKTER

Flera olika forskningsprojekt pågår inom detta område. I BioDME projektet som pågår i bland annat Piteå skall DME (dimetyleter) tillverkas i pilotskala (4 ton/dygn) från syntesgas som framställts i svartlutsfergasning. DME skulle i sin tur enkelt kunna omvandlas till bensin. På liknande sätt kan diesel framställas från syntesgas och i Finland pågår forskning och utveckling kring detta. Syntesgas har under lång tid omvandlats till många olika produkter. Vid biomassafergasning är det viktigt att den bildade syntesgasen kan renas till lämplig kvalitet för den teknik som används idag. Alternativt kan det finnas utrymme för innovationer inom gasrening och katalytisk syntes anpassade för syntesgas från biomassafergasning, exempelvis zeolitmembran för rening av syntesgasen.

På ETC har en anläggning i bänkskala för katalytisk syntes av metanol och DME konstruerats. Under en vecka år 2010 genomfördes den första syntesen av metanol via svartlutsfergasning. Gasen från svartlutsfergasaren renades först från bensen med ett kolfilter (adsorption) och sedan från svavelkomponenter med en bädd av zinkoxid. Den rena gasen fördes sedan in till en reaktor med katalysator där gasen omvandlades till metanol. Figur 5 visar en bild på anläggningen. Totalt tillverkades ungefär 0,6 dm<sup>3</sup> flytande bio-metanol, se Figur 6.



**FIGUR 5.** Anläggning för katalytisk syntes av metanol från syntesgas. Anläggningen innehåller kolfilter och zinkoxid för rening av gasen och en reaktor med katalysator för metanolsyntesen.



**FIGUR 6.** Metanol tappas ut från testanläggningen. Metanolen var tillverkad via svartlutsförgasning.

## CENTRIAS MEDSTRÖMS BIOMASSAFÖRGASARE FÖR SMÅSKALIG CHP- PRODUKTION

---

*Yrjö Muilu & Kari Pieniniemi*

*Mellersta Österbottens Yrkeshögskola*

*CENTRIA Forskning och Utveckling, Ylivieska, Finland*

Under de senaste åren har förgasning av biomassa blivit ett populärt ämne inom industri och forskning. Produktgas (traditionellt kallad gengas eller trägas) eller syntesgas som fås vid förgasning av biomassa kan användas i småskaliga CHP (combined heat and power)-anläggningar för produktion av värme och kraft (elektricitet). Dessutom kan produktgasen också användas vid produktion av biobränslen och kemikalier. Småskaliga CHP-enheter kan definieras som kombinerade värme- och kraftgenererande system med en eleffekt på mindre än 100 kW. Termen mikro CHP-enheter används ofta för att benämna småskaliga CHP-system med en elektrisk kapacitet som är mindre än 15 kW<sub>e</sub> (Dong L. 2009).

Centrias medströmsförgasare, som har studerats i HighBio-forskningsprojektet (se figur 1), baserar sig på den kommersiellt tillgängliga EK-förgasningsteknologin, som patenterats. Värmeproduktionseffekten för Centrias forskningsförgasare är 100 kW<sub>th</sub> och elproduktionseffekten är 50 kW<sub>e</sub>.

Centrias medströmsförgasare består av ett inmatningssystem för flis, en föruppvärmare för luft och ett lager, en förgasare med teknik för avlägsnande av aska och ett gasreningssystem (figur 1). Centrias forskningsförgasare baserar sig på traditionell förgasning av trä, men vissa tekniska förbättringar har gjorts som gör den unik och speciellt användbar för decentraliserad CHP-produktion. För förgasning av biomassa med EK-teknologi är kvaliteten på bränslet inte så kritisk som för traditionella förgasare. Detta gör att t.ex. lufttorkad flis (fukthalt 30-40%) tillverkad av björk, gran, o.s.v., och som innehåller bark, kan användas i förgasaren.





FIGUR 1. CENTRIAs medströmsförgasare baserar sig på patenterad EK-förgasningsteknologi.

Processförutsättningar för att Centrias medströmsförgasare skall fungera stabilt presenteras i processflödesdiagrammet i figur 2.

TABELL 1. Processförutsättningar Centrias medströmsförgasare.

Egenskap	Värde
Inmatningshastighet, kg/h	45
Luftflödeshastighet, Nm <sup>3</sup> /h	52
Lufttemperatur, °C	16
Reaktortemperatur, °C	1200
Hastighet för avlägsnande av bottenaska, kg/h	0,4
Produktgasflödeshastighet, Nm <sup>3</sup> /h	78

Forskningen vid Centrias laboratorium strävar till en mer omfattande förståelse av verksamhetsförutsättningarna för förgasaren och av sammansättningen för den producerade produkt- och syngasen. Man studerar vilka är de optimala faktorerna för samtidig värme- och elektricitetsproduktion från syngas som har tillverkats av förnyelsebara källor såsom träflis och klenvirke, liksom av andra biomassa råvaror från jordbruket. Forskningsmålsättningen är i enlighet med EU:s strategi att minska be-

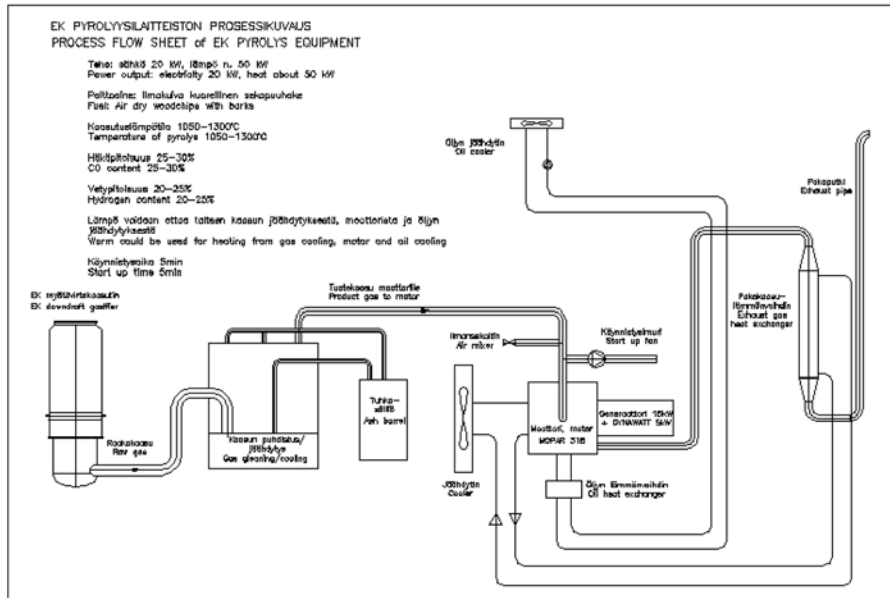
roendet av fossila bränslen, minska växthusgasutsläpp och nå de hårda kraven på minskade utsläpp av koldioxid, CO<sub>2</sub>.

I CHP-system som baserar sig på biomassabränslen används vanligen förbrännings- och ångturbiner, speciellt för stora och medelstora system (tabell 2). CHP-system med förgasare kan potentiellt ha en högre effekt på elektricitetseffekten än en CHP-anläggning med direkt förbränning. Gasen som fås vid förgasningen kan användas i en diesel-, gas-, stirling- eller dubbelbränsle (dual fuel) -motor, eller i en gasturbin. (Verigan 2009)

**TABELL 2. De viktigaste energikonversionsteknologierna för CHP-system baserade på biomassabränslen (Dong L., 2009)**

Primär teknologi	Sekundär teknologi
Förbränning som producerar ånga, hett vatten	Ångmotor; ångturbin; Stirlingmotor; Organic Rankine Cycle (ORC)
Förgasning som producerar gasformiga bränslen	Förbränningsmotor (IC); mikroturbin; gasturbin; bränslecell; Stirlingmotor
Pyrolys som producerar gasformiga och flytande bränslen	Förbränningsmotor
Biokemiska/biologiska processer som producerar etanol, biogas	Förbränningsmotor
Kemiska /mekaniska processer som producerar biodiesel	Förbränningsmotor

Medströmsförgasning kan anses som en av de mest lämpliga teknologierna för decentraliserad småskalig biomassabaserad kombinerad produktion av värme och kraft upp till ca 1 MW<sub>th</sub>. Det finns sammanlagt cirka 50 kommersiella tillverkare av förgasningsreaktorer i Europa, i USA och i Canada. Av dessa var ca 75% av typen fastbäddsmedströmsförgasare, 20% svävande bäddsystem, 2,5% motströmsförgasartyper, och 2,5% var av olika andra modeller (H. Knoef 2000).



FIGUR 2. Processflödesdiagram av Centrias FoU-förgasare vid laboratoriet för förnybar energi.

## SPECIFIK BRÄNSLEKONSUMTION OCH SPECIFIK BELASTNINGSUPPSKATTNING FÖR FÖRGASAREN

Den specifika gasproduktionen för Centrias FoU-laboratorieförgasare och trögaskonsumtion för den modifierade förbränningsmotorn bestämdes genom att använda olika elektriska belastningar på 9 kW, 18 kW och 27 kW (figur 3).



**FIGUR 3.** Undersökning av gasproduktion och bränslekonsumtion för den modifierade 8 liters, 6-cylindriga förbränningsmotorn. Elektrisk kraftbelastning på 9 kW användes i experimentet (till vänster) och förbränningsgasmotorn (till höger).

I tabell 3 presenteras fukthalt och uppmätta högre och lägre värmevärden av flisen använd i denna studie. Fukthalten var ganska hög, 44,6 %.

**TABELL 3. Uppmätta egenskaper för träflisen som använts i experimentet.**

Egenskaper för träflisen	Enhet	Uppmätt värde
Fukthalt vid ankomst	%	44,6
Aska (på basen av torrsvikt)	%	1,9
Högre värmevärde (HHV(torr))	MJ/kg	19,71
Lägre värmevärde (LHV(torr))	MJ/kg	18,3
Lägre värmevärde (LHV)	MJ/kg	9,5

Gas- och träkonsumtionen för förbränningsmotorn bestämdes genom att stegvis öka den elektriska belastningen från noll till 27 kW med 9 kW i taget genom att använda elektriska värmare med 9 kW effekt (Figur 3). Gaskonsumtionen för förbränningsmotorn vid nollbelastning är ganska hög, d.v.s. det åtgår 70,4 Nm<sup>3</sup> av trägas för att producera 1 kWh elektrisk energi, medan det vid belastning behövs enbart 2,6 – 3,0 Nm<sup>3</sup> trägas för att producera 1 kWh elektrisk energi (Tabell 4).

**TABELL 4 . Uppmätta data för bestämning av trägaskonsumtion för förbränningsmotorn .**

Mätning	Enhet	Testkörn 1	Testkörn 2	Testkörn 3	Testkörn 4
Produktgasens flödes hastighet, medeltal	Nm <sup>3</sup> /h	70	94	124	151
Konsumtion av träflis	kg/h		39,78	-	58,84
Värme	kW	22		45	52,5
Elektricitet	kWh	0	9	18	27
Specifik gaskonsumtion	Nm <sup>3</sup> /kWh	70,4	2,6	3,0	3,0

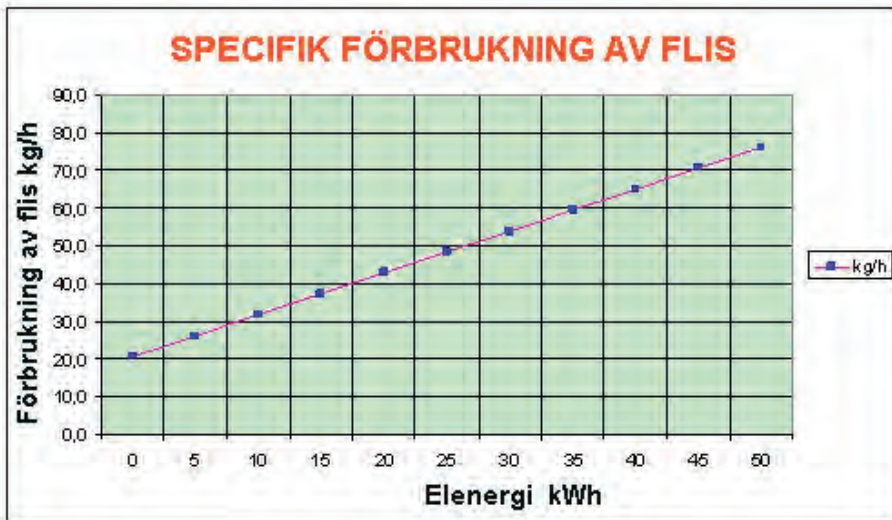
Den specifika träfliskonsumtionen uppskattades från mätningen som presenteras i tabell 4 till 1,06 kg/kWh och den specifika gasproduktionen beräknades till 2,45–2,83 Nm<sup>3</sup>/kg.

Träfliskonsumtionen bestämdes också med Oilon naturgasförbrännare som modifierats för att passa för användning av trägas. Den samma förbrännaren kan också användas i en CHP-enhet med Stirlingmotor (Figur 5). På basen av beräkningarna så var konsumtionen av lufttorkad träflis (fukthalt 35 %) 57 liter/ h, vilket är ca 16 kg / h (uppskattad specifik tyngd 280 kg/m<sup>3</sup>). Trägasproduktionen mättes genom att använda en gasometer och uppmättes till 7,49 Nm<sup>3</sup>/h (Figur 4). I enlighet med mätningen producerar 1 kg träflis 3,6 Nm<sup>3</sup> gas, vilket är förhållandevis högt jämfört med de värden som presenteras i tabell 5.



**FIGUR 4.** Utvärdering av specifik gasproduktion med en gasbrännare. Gasbrännare som matats med trägas (till vänster) och testanordning (till höger).

Uppmätt träkonsumtion för Centrias CHP-anläggning som funktion av producerad elenergi presenteras grafiskt i figur 5.



FIGUR 5. Trägaskonsumtion (kg/h) som funktion av producerad elenergi (kWh).

Den uppmätta specifika gasproduktionen och bränslekonsumtionen är jämförbara med värden som hittas i litteraturen (Tabell 5).

TABELL 5. Uppmätta förgasningsparametrar jämförda med typiska värden i litteraturen.

Förgasningsparameter	Enhet	Uppmätta värden (Centrias förgasare)	Typiska värden (Knoef 2005)
Specifik gasproduktion	Nm <sup>3</sup> /kg	2,5 -2,8	2 - 3
Specifik gasproduktion	Nm <sup>3</sup> /kW <sub>e</sub>	2,6-3,0	2 - 3
Specifik bränsle-konsumtion	kg/kW <sub>e</sub>	1,06	1 – 1,3
Specifik belastning	kg/m <sup>2</sup> .hr	2510	500 – 2000

Det bör nämnas att fukthalten för träflisen som användes i detta experiment var omkring 45 %, vilket är mycket högre än litteratuvärdet för den högsta accepterade fukthalten för en medströmsförgasare, d.v.s. 25 % (H. Knoef 2005). Det lägre värmevärdet för flisen som använts i detta experi-

ment var omkring 9.0 MJ/kg, vilket är mycket lägre än litteraturvärdet på 13,5 MJ/kg för träflis med en fukthalt på 25 %.

## ANVÄNDNING AV PRODUKTGAS

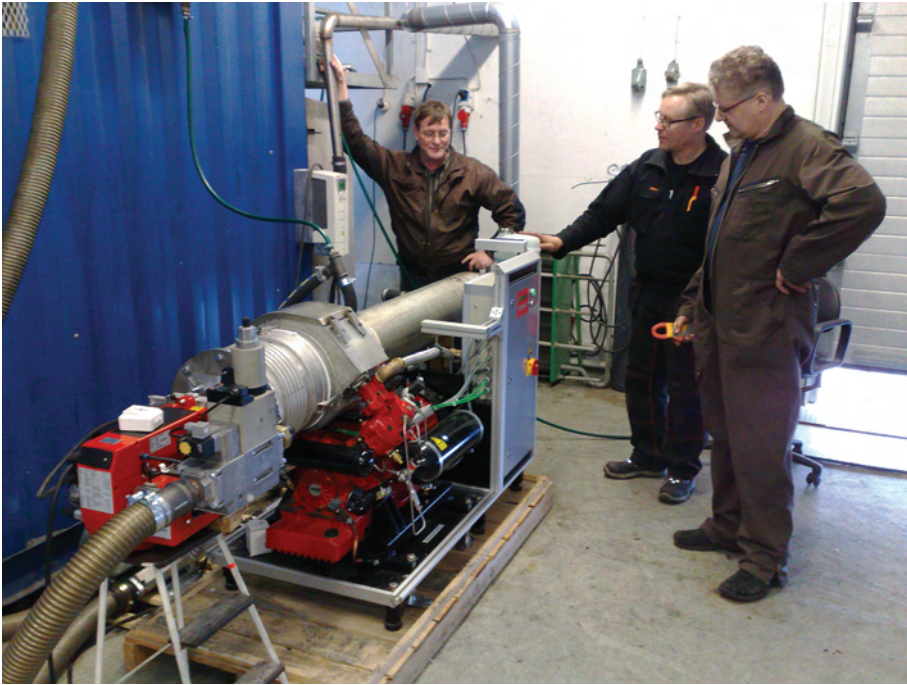
Förgasning av biomassa vid hög temperatur (1200–1400 °C) resulterar i biosyngas (förhållande mellan vätgasen  $H_2$  och kolmonoxiden  $CO$  är 2:1), som kan användas som råmaterial i den kemiska industrin för att producera flytande bränslen (t.ex. etanol, metanol, och Fischer-Tropsch diesel), för att generera värme och kraft och för att syntetisera andra kemikalier samt för att producera vätgas  $H_2$ .

Förgasning av biomassa vid låg temperatur (800–1000 °C), resulterar å andra sidan i en produktgas som innehåller huvudsakligen  $CO$ ,  $H_2$ , koldioxid  $CO_2$ , vatten  $H_2O$ , metan  $CH_4$ , kväve  $N_2$ , en del kolväten med längre kedjor och tjära. Denna produktgas kan användas som ett bränsle för en gas- eller Stirlingmotor för att producera el tillsammans med värme. Efter krackning (sönderdelning) av tjäran, rening och omformning kan produktgasen användas såsom biosyngas med flera olika användningsområden, t.ex. såsom bränsle för produktion av syntetisk naturgas (SNG).

Tillsats av ånga eller syre till förgasningsprocessen resulterar i att ånga bildas och biosyngas produceras. Denna kan användas för att matas in i en Fischer-Tropsch reaktion för att tillverka högre kolväten (kolväten med längre kedjor), eller för övergång till vattengas (WGS Water Gas Shift reaction) för att producera väte. För närvarande används väte vanligen i den kemiska industrin, men i framtiden kan det komma att bli ett viktigt bränsle för att användas t.ex. i bilar (Holladay, et al. 2009).

## MIKRO CHP-ENHET BASERAD PÅ EN STIRLING-MOTOR VID CENTRIAS FoU -LABORATORIUM FÖR FÖRNYBAR ENERGI

En Stirlingmotor som kopplats till en biomassaförgasare är den senaste installationen vid Centrias FoU-laboratorium för förnybar energi.



**FIGUR 6.** Installation av SOLO Stirling 161-motorn för kombinerad värme- och elproduktion vid Centrias FoU-laboratorium för förnybar energi.

En Stirlingmotor är en värmemotor som fungerar genom cyklisk kompression och expansion av luft eller en annan gas, arbetsfluidum. Den opererar vid olika temperaturnivåer så att det uppstår en nettoomvandling av värmeenergi till mekaniskt arbete. Stirlingmotorn är känd för sin höga effektivitet jämfört med ångmotorer, sin tysta funktion samt flexibiliteten i användning av värmekälla. Denna kompatibilitet med alternativa och förnybara energikällor har blivit allt mer viktigt för att minska beroendet av fossila bränslen och för att minska utsläpp av koldioxid  $\text{CO}_2$  ([http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)).

Värmen från förbränningen av bränsle överförs till arbetsgasen vid en hög temperatur (vanligen  $700^\circ\text{C}$ – $750^\circ\text{C}$ ) och den extra värmen, som inte förvandlats till arbete, överförs till kylvattnet vid  $40^\circ\text{C}$ – $85^\circ\text{C}$ .



Det finns vissa viktiga fördelar med Stirling mikro-CHP-enheterna jämfört med konventionella förbränningsmotorer för kombinerad värme- och kraftproduktion. Till exempel är serviceintervallen för Stirlingmotorer mycket längre jämfört med Otto-motorer, vanligen 5000 till 8000 timmar. Utsläppen av skadliga ämnen från nuvarande Stirling-förbrännare kan dessutom vara 10 gånger lägre än utsläpp från Otto-motorer med katalytisk omvandlare som matats med gas (SOLO STIRLING GmbH version 1.9, juli 2003). Stirling-motorns kapacitet är 9 kW elektrisk kraft och 26 kW värmekraft. En totaleffektivitet på över 95 % kan uppnås.

## KÄLLOR

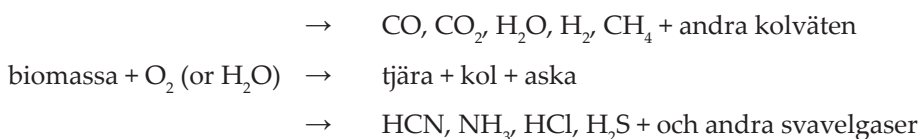
- Dong L., Liu H. and Riffat S. "Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems –A literature review." *Applied Thermal Engineering* 29, 2009: 2119–2126.
- Holladay, J.D., J. Hu, D.L. King, and Y. Wang. "An overview of hydrogen production technologies." *Catalysis Today* 139. 2009. 244 – 260.
- Knoef, H. *Inventory of biomass gasifier manufacturers and installations*. Enschede: Final Report to European Commission, Contract DIS/1734/98-NL, Biomass Technology Group BV, University of Twente, 2000.
- Knoef, H.A.M., ed. *Handbook Biomass Gasification*. BTG biomass technology group BV, The Netherlands, 2005.
- SOLO STIRLING GmbH. *Technical Documentation. Solo Stirling 161 Combined Heat and Power (CHP) Module*. Sildeffingen: [www.stirling-engine.de](http://www.stirling-engine.de), version 1.9, July 2003.
- Verigan, H.J. "Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste." *ECN publication.*, 2009: Available from: [http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa\\_voordelen.pdf](http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf).

# FÖRGASNING OCH ANALYS AV PRODUKTGASEN

*Kari Pieniniemi och Yrjö Muilu*  
*Mellersta österbottens Yrkehögskola,*  
*CENTRIA Forskning och Utveckling, Ylivieska, Finland*

## FÖRGASNING AV BIOMASSA

Förgasning av biomassa är en termisk behandlingsprocess som baserar sig på torkning, pyrolys, oxidation (syretillsats,  $O_2$ ) och förgasning av kol, vilket resulterar i gasformiga produkter och små kvantiteter av organiska föroreningar, tjära och aska. Förgasningen sker vid höga temperaturer för att kunna optimera gasproduktionen. Den gas som bildas benämns produktgas och är en blandning av kolmonoxid ( $CO$ ), väte ( $H_2$ ), och metan ( $CH_4$ ), tillsammans med koldioxid ( $CO_2$ ) och kväve ( $N_2$ ) och vissa organiska föroreningar (tjära) tillsammans med damm, saltsyra  $HCl$ , svavelväte  $H_2S$ , ammoniak  $NH_3$  o.s.v. (Figur 1)



**FIGUR 1.** Innehållet i produktgas som bildats vid förgasning av biomassa.

Pyrolys är det första steget vid all termokemisk omvandling av biomassa. Pyrolys är den termokemiska nedbrytningen av organiskt material vid höga temperaturer utan syretillgång. Traditionell långsam pyrolys (förkolning) har använts huvudsakligen för produktion av träkol. Snabb pyrolys resulterar i flytande bio-oljor (60–75 vikt%), en del fast träkol (15–25 vikt%), och icke-kondenserbara gaser (0–20 vikt%). Blixtpyrolys (flash pyrolysis) anses vara en förbättrad version av snabb pyrolys med reaktionshastigheter på bara några sekunder. (Tabell 1)

**TABELL 1. Pyrolysförutsättningar vid långsam, snabb och blixtpyrolys.**

	Långsam pyrolys	Snabb pyrolys	Blixtpyrolys
Pyrolystemperatur (°C)	300–700	600–1000	800–1000
Upphettningshastighet (°C/s)	0.1–1	10–200	>1000
Partikelstorlek (mm)	5–50	<1	<0,2
Tid som fast ämne (s)	300–550	0,5–10	<0,5

De organiska föreningarna varierar från kolväten med låg molekylvikt till polynukleära aromatiska kolväten (PAH) med hög molekylvikt, d.v.s. tjära (Figur 2). I takt med att temperaturen ökar börjar sekundära reaktioner ske i gasfasen och oxiderade tjärkomponenter omvandlas till lätta kolväten, aromatiska kolväten, högre kolväten och sist till stora PAH-föreningar i tertiära processer. Omvandling av tjära från primära produkter till aromatiska kolväten som en funktion av temperaturen presenteras i Figur 2. (Li C. 2009)

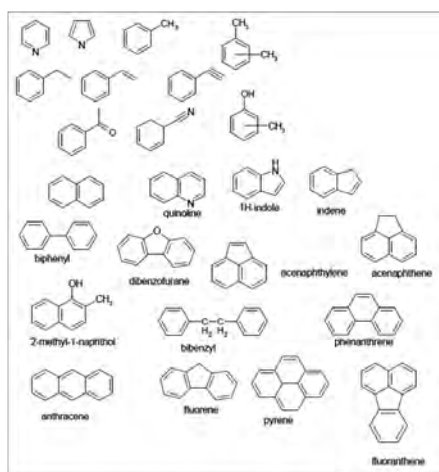
**FIGUR 2.** Tjärbildningsschema vid förgasning av biomassa enligt Elliot (Elliott, 1988)

Tjärkomponenter kan indelas i fem grupper beroende på deras molekylvikt, vilket visas i tabell 2.

**TABELL 2. Tjärkomponenter kan indelas i fem olika klasser (Li C., 2009)**

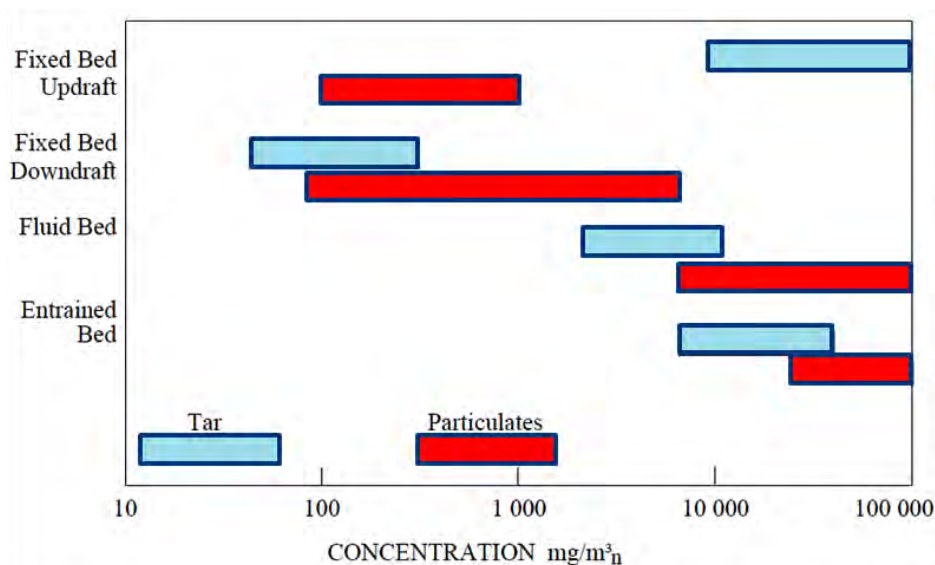
Tjärka- tegori	Kategorinamn	Egenskaper	Typiska föreningar
1	Omöjliga att påvisa med GC	Mycket tunga tjäror, kan inte påvisas med GC (gaskromatograf)	Bestäms genom att subtrahera den tjärfraktion som kan påvisas med GC från den totala gravimetriska (enligt vikt) tjäran
2	Heterocykliska aromatiska föreningar	Tjäror som innehåller heteroatomer; mycket vattenlösliga	Pyridin, fenol, cresoler, kinolin, isokinolin, dibensofenol
3	Lätta aromatiska föreningar (1 ring)	Vanligen lätta kolväten med en enda ring; har inte problem att kondensera och lösa sig	Toluen, etylbensen, xylene, styren
4	Lätta PAH föreningar (2–3 ringar)	Föreningar med 2 och 3 ringar; kondenserar vid låga temperaturer t.o.m vid mycket låga koncentrationer	Inden, naftalen, metylnaftalen, bifenylnaftalen, fluoren, fenantren, antracen
5	Tunga PAH föreningar (4–7 ringar)	Större än 3 ringar, dessa föreningar kondenserar vid höga temperaturer i låga koncentrationer	Fluoranten, pyren, krysen, perylen, koronen

Förgasning, t.o.m. vid så höga temperaturer som 800-1000 °C, producerar en betydande mängd tjära, vilket fortsättningsvis är det största problemet i förgasningsprocessen. Därför anses avlägsnande av tjära som ett av de viktigaste tekniska problemen för utveckling av förgasningsteknologi.



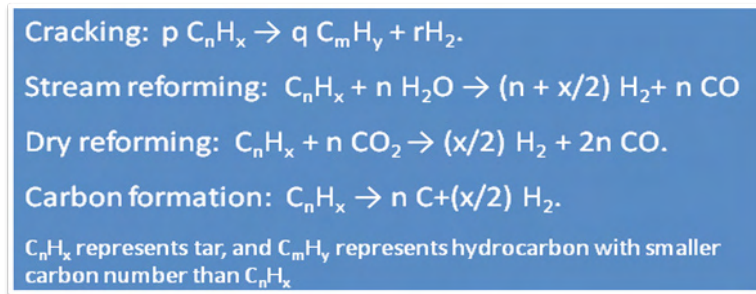
FIGUR 3. Exempel på några vanliga tjärföreningar.

Tjära kan definieras som en samling av organiska föreningar med molekylvikt större än bensen. Sammansättningen och andelen tjära som produceras vid förgasning av biomassa beror på typ av biomassa, typ av förgasare och förhållanden i förgasaren. Medelkoncentrationen på tjära är cirka  $100 \text{ g/Nm}^3$  i en motströmsförgasare,  $10 \text{ g/Nm}^3$  i en förgasare med fluidiserande bädd och  $1 \text{ g/Nm}^3$  i en medströmsförgasare (Neeft J. 1999) (Figur 4).



FIGUR 4. Typiska partikel- och tjärbeläggningar i förgasare för biomassa (tjärens kokpunkt >  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Stålberg P. 1998)

De viktigaste nedbrytningsprocesserna för tjära är krackning (sönderdelning), och ång- och torreformering (Figur 5).

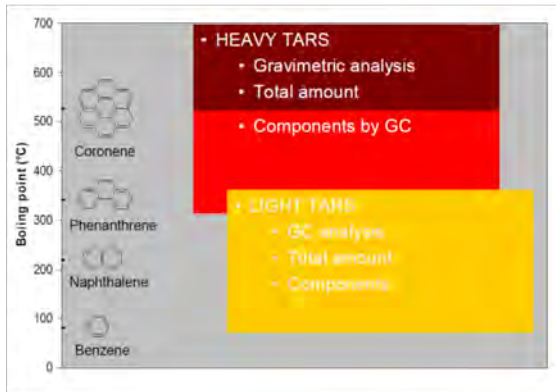


FIGUR 5. De viktigaste nedbrytningsprocesserna för tjära.

Tjära kan reduceras i själva förgasaren genom att modifiera förgasningsförhållandena eller uppbyggnaden på förgasaren (*primära åtgärder*), genom mekanisk separation eller genom termisk eller katalytisk krackning efter att gasen bildats (*sekundära åtgärder*). I den förgasare som används vid Centrias försökslaboratorium (EK-förgasare) reduceras tjäran huvudsakligen genom en modern design av förgasaren, medan som sekundära gasreningsåtgärder används rening med vatten (wet scrubber).

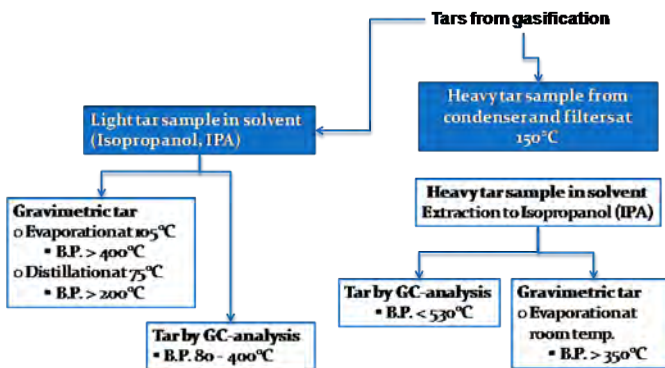
## ANALYS AV TJÄROR I PRODUKTGAS

Analysen av föroreningar i produktgasen görs vanligen genom *gaskromatografi* (GC) eller *gravimetriskt* (genom vägning). Provtagning för tjäranalysmetoderna grundar sig vanligen på att man fångar tjäran i ett organiskt lösningsmedel eller genom adsorption på lämpliga adsorbenter (Li C. 2009). Traditionella metoder för provtagning av tjära baserar sig på kondensering i kylfälla kombinerad med absorption i lösningsmedel. Flera olika lösningsmedel används för insamling av tjära, men 2-propanol har rekommenderats av tjärprotokollet (Tar Protocol), som beskriver standardmetoder för insamling av tjära (Neef 2005). (Figur 6)



FIGUR 6.

Lätta tjäror kan analyseras med gaskromatografi medan andelen tunga tjäror bestäms gravimetriskt genom vägning (Reinikainen 2009).



Utöver tjärprotokollet har vi på Centrias laboratorium använt en metod baserad på adsorption på fast fas (SPA - Solid Phase Adsorption) för att bestämma det totala innehållet av tjära i produktgasen som producerats av EK-medströmsförgasaren. Biomassan som användes i detta experiment var träflis med en fukthalt på ca 30 %. Tjäran adsorberades på den fasta adsorbenten (XAD) och adsorbenten extraherades med diklorometan (DCM) med hjälp av en Soxhlet-apparat. DCM-extraktet avdunstades och återstoden vägdes (gravimetrisk metod). Det uppmätta tjärinnehållet av produktgasen under halv och full belastning var 143 mg/Nm<sup>3</sup> och 138 mg/Nm<sup>3</sup> (Tabell 3).

TABELL 3. Total tjärkoncentration för produktgasen bildad av Centrias FoU pilotförgasare före och efter rening

Styrka	Tjärinnehåll för produktgasen mg/m <sup>3</sup> n (torr, normal temperatur och tryck: 0°C, 1 atm)
50 %	143
100 %	138



**FIGUR 7.** Centrias FoU FTIR gasanalysator Gasmeter Dx4000N.

Produktgas från förgasaren innehåller huvudsakligen de permanenta gaserna kolmonoxid, vätegas, koldioxid, metan och kvävgas ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  och  $\text{N}_2$ ). Gaskoncentrationer för permanenta gaser och kvaliteten på produktgasen kan kontinuerligt följas genom att mäta innehållet av  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  och  $\text{CH}_4$  och etan- och etylenkoncentrationer liksom bensen med hjälp av en FTIR gasanalysator (Gasmeter Dx4000N). Fourier transformerad infraröd spektroskopi (FTIR) är en spektroskopisk mätmetod som jämför den absorberade energin från en infraröd ljuskälla. Gaser med två atomer (väte och kväve) kan analyseras kontinuerligt med en mikrogaskromatograf. Väte kan också mätas genom en Dräger X-am 3000 rökgasanalysator (flue gas analyzer) efter utspädning av produktgasen, eftersom mätintervall av rökgasen är enbart upp till 0,5 volym % av  $\text{H}_2$ .

Under tjärprovtagningen (Tabell 3) mättes produktgasen kontinuerlig med FTIR gasanalysatorn och de uppmätta koncentrationerna av de permanenta gaserna presenteras i Tabell 4 .

**TABELL 4. FTIR analys av produktgas från Centrias FoU förgasare (NTP 0°C, 1 atm). Koncentrationer för de viktigaste gaskomponenterna (permanent gaser).**

Kraft	$\text{H}_2\text{O}$ vol%	$\text{CO}_2$ vol%	$\text{CO}$ mg/ $\text{Nm}^3$	$\text{CH}_4$ mg/ $\text{Nm}^3$
50 %	7,0	11,0	138	9
100 %	6,3	9,4	171	11

Typiska innehåll och koncentrationer för produktgasen från Centrias forskningsförgasare presenteras i tabell 5. Det typiska gasinnehållet mättes genom gaskromatografi efter provtagning med Tedlar-provpåsar.



**TABELL 5. Typiskt innehåll och koncentrationer av produktgasen från Centrias FoU pilotförgasare.**

Komponent i produktgasen	vol-%	g/Nm <sup>3</sup> (NTP 0°C, 1 atm)
CO	15	187
H <sub>2</sub>	15	14
CH <sub>4</sub>	2,5	18
CO <sub>2</sub>	15	295
N <sub>2</sub>	50	
Andra gasformiga föreningar	2,5	

Under hela tjärprovtagningen (Tabell 3) mättes utsläppen av förbränningsmotorn genom att kontinuerligt mäta koncentrationer av syrgas, koldioxid, kolmonoxid, kväveföreningar och svaveldioxid (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub>) i rökgasen. Kontinuerliga utsläppsmätningar vid torra förhållanden baserades på paramagnetism (O<sub>2</sub>), infraröd (IR) absorption (CO, CO<sub>2</sub>), ultraviolett (UV)-fluorescens (SO<sub>2</sub>) och kemiluminescens (NO<sub>x</sub>). Resultaten av de kontinuerliga utsläppsmätningarna med uppskattad mätosäkerhet presenteras i Tabell 6.

**TABELL 6. Sammansättning och koncentrationer för de viktigaste gasformiga komponenterna under tjärprovtagningen jämte uppskattad total kombinerad mätosäkerhet.**

Uppmätt komponent i rökgasen	Uppmätt rökgas-sammansättning	Koncentration (torr, NTP: 0°C, 1 atm)
O <sub>2</sub>	0,4 ±0,04 vol%	-
CO <sub>2</sub>	17±2 vol%	-
CO	568±63 ppm	170 ±19 mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	8±1 ppm	25 ±4 mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	162±37 ppm	332 ±37 mg/Nm <sup>3</sup>

**FIGUR 8. Mätning av utsläpp från förbränningsmotorn**

## KÄLLOR

- Elliott, DC. "Relation of reaction time and temperature to chemical composition of pyrolysis oils." *Proceedings of the ACS symposium series 376, pyrolysis oils from biomass*. 1988.
- Li C., Suzuki K. "Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009: 594–604.
- Neef, J.P.A. "Rationale for setup of impinger train as used in the Technical Specification of Sampling and Analysis of Tar and Particles in the Product Gases of Biomass Gasification." *Technical background document CEN BT/TF 143. Organic contaminants ("tar")*. January 2005. <http://www.tarweb.net>.
- Neeft J., Knoef H., Onaji P. J. *Neeft, H. Knoef, P. Onaji, Behaviour of Tar in Biomass Gasification Systems, Tar Related Problems and Their Solutions*. Report No. 9919, Energy from Waste and Biomass, 1999.
- Neeft, J.P.A., "Rationale for setup of impinger train as used in the Technical Specification of Sampling and Analysis of Tar and Particles in the Product Gases of Biomass Gasification." *Technical background document CEN BT/TF 143 "Organic contaminants ("tar")*, 1999.
- Reinikainen, M. "Synthesis Gas Characterization at VTT laboratories and test facilities." VTT Finland , 2009.
- Stålberg P., et.al. *Sampling of contaminants from product gases of biomass gasifiers, VTT Research Notes 1903*. Technical Research Center of Finland, 1998.

## FÖRGASNINGSTEKNOLOGINS FRAMTID

---

*Jukka Konttinen*  
*Jyväskylän universitet, Finland*

I Finland har man bedrivit forskning om förgasning av biomassa i åtminstone 30 år (Salo, 2009). Under första hälften av 1990-talet var förgasningsteknologin intressant i Finland för produktion av el och värme i s.k. CHP-anläggningar (Combined Heat and Power). Man talade om så kallad IGCC-teknologi (Integrated Gasification Combined Cycle), en teknologi där biomassa förgasas vid högt tryck och hög temperatur, gasen renas och leds till ett kombinationskraftverk. Ett kombinationskraftverk omfattar en kombination av gas- och ångturbin samt avfallsvärmepanna (Kurkela, 2006). I Finland fanns till och med två demonstrationsprojekt baserade på IGCC-teknologi för biomassa i kommersiell storlek, men ingetdera förverkligades. Under samma period gjorde det låga priset på konkurrerande energiformer som olja och naturgas att investeringar i kraftverk för fasta bränslen blev ointressanta. Dessutom kan man konstatera att skogsbolagen, trots stora offentliga investeringsstöd, inte var tillräckligt villiga att ta risker för att utveckla IGCC-teknologin i anslutning till cellulosafabrikerna.

IGCC-teknologin utvecklades också för fossila råvaror (stenkol, olja).

Då vi närmar oss slutet av 2000-talets första decennium har scenariet förändrats. Tillgången på och osäkerheten i prissättningen av fossil råolja, utsläppen av växthusgaser samt skogindustrins behov att utveckla nya alternativa produkter till papper och kartong har gjort bioraffinaderier som baseras på förgasning av biomassa intressanta. I praktiken har alla finländska skogsbolag, såsom UPM Kymmene Ab, Stora Enso Ab samt Metsäliitto, egna bioraffinaderiprojekt i kommersialiseringskedet (Kurkela, 2009). I de nämnda projekten försöker man demonstrera en trycksatt förgasning av biomassa, rening av gasen samt en katalytisk omvandling av syntesgasen till biobränslen. Biodiesel är det mest intressanta av de

vätskeformiga bränslena, sannolikt på grund av att produktion av syntetisk biodiesel från kol eller naturgas är en teknologi som redan visat sig fungera.

Nya katalytiska processer för konvertering av syntesgas från förgasning, vilka utgör alternativ till produktion av biodiesel, är under utveckling. Exempelvis i Piteå, Sverige bygger företaget Chemrec en anläggning för produktion och fördelning av DME (dimetyleter) och metanol. Med i projektet finns också biltillverkaren Volvo (Gebart, 2011). Demonstrationsanläggningar för framställning av biobränslen baserade på förgasning är under utveckling förutom i de nordiska länderna också i Mellaneuropa och i Nordamerika (Bacovsky, 2009). Av fungerande förgasningsanläggningar kan man nämna REPOTEC-processen i Österrike. Anläggningen baseras på produktion av el och värme via förgasning av biomassa; men den producerade syntesgasen har också använts till produktion av biodiesel och syntetisk naturgas (SNG). SNG kan användas som fordonsbränsle på samma sätt som naturgas. REPOTEC-teknologin kommer att tas i bruk i större skala i Sverige i det så kallade CoBiGas-projektet (Rauch, 2011).

Det beräknas att produktionen av biobränslen globalt kommer att öka 3-6 -fald fram till år 2020 (Sohlström, 2010). Av produktionen kommer en betydande del att bestå av förädling av biomassa genom förgasning i industriell skala, med så kallad andra generationens teknologi. En fördel med förgasning är att man kan använda råvaror som inte stör livsmedelsproduktionen.

Förgasning av biomassa i form av trä och fast avfall kan medföra betydande öknings i CHP-produktion, i så kallad decentraliserad skala eller en elproduktion som omfattar 10–1000 kW<sub>e</sub>. Man talar om småskalig eller mikroskalig CHP-teknologi. Utrustning baserad på förgasning utvecklas i såväl de nordiska länderna som Mellaneuropa. En central roll har gassanläggningen eller medströmsförgasaren (Kontinen, 2011). Även om småskalig CHP inte är en lösning för produktion av basenergi på nationell nivå kan det tillföra landsbygden ny företagsverksamhet och nya arbetsplatser samt förbättra Finlands egenförsörjning när det gäller energi. Dessutom kan man få nya teknologiska exportprodukter. Småskalig CHP kan också kombineras till hybridlösningar med andra produktionssätt för förnybar energi som biogas samt sol- och vindkraft.

Förgasning i större skala har i Finland kommersialiserats i och med 160 MW<sub>th</sub> CHP-anläggningen i Lahti som använder avfall som bränsle. Genom användningen av avfall som bränsle ersätter man fossilt kol i produktionen av värme och el. Sedan 1998 har man i Lahti använt en förgasare för avfall och biomassa i kombination med en stenkolspanna. (Lahti Energia, 2011). Relevansen för den på biomassa baserade IGCC-teknologin har inte heller försvunnit helt (Kurkela, 2006).

Förutom prissättningen på konkurrerande energikällor har en bidragande orsak till den långsamma kommersialiseringen av förgasningsteknologin varit misslyckade demonstrationer. I samtliga ovan nämnda projekt baserade på förgasningsteknologi är utmaningen att påvisa en hög användbarhet under ett längre tidsperspektiv samtidigt som man måste kunna producera el, värme och flytande biobränslen till ett konkurrenskraftigt pris. De teknologiska utvecklingsbehoven finns i första hand inom gasreningen.

## KÄLLOR

- Bacovsky, N.: Overview on Wide Spread Implementation of 2nd Gen Biofuel Demonstration Plants in the World. 4<sup>th</sup> BTLtec, Graz, Österrike, september 2009.
- Gebart, R.: Swedish Research on Forest Biomass Gasification and Syngas Conversion into Second Generation Motor Fuels. Swedish-Finnish Flame Days, 2011, Piteå, Sverige, januari 2011. [http://www.ffrc.fi/FlameDays\\_2011/Session\\_4\\_Gasification/27gebart.pdf](http://www.ffrc.fi/FlameDays_2011/Session_4_Gasification/27gebart.pdf)
- Konttinen, J.: Onko jo pien-CHP:n aika? Motivan bioenergiapäivät, Varkaus, Finland, december 2010. [http://www.motiva.fi/files/3765/Varkaus\\_Konttinen.pdf](http://www.motiva.fi/files/3765/Varkaus_Konttinen.pdf)
- Kurkela, E.: Biomassan ja jätteen kaasutus. Liekkipäivä 2006, Åbo, Finland, januari 2006. [http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/Liekkipaiva2006\\_BiomassaJateKaasutus\\_KURKELA.pdf](http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/Liekkipaiva2006_BiomassaJateKaasutus_KURKELA.pdf)
- Kurkela, E. : Gasification R&D Activities in Finland. Finnish-Swedish Flame Days 2009, Nådendal, Finland 2009. <http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/FinSweFlameDays09/Kurkela.pdf>
- Lahti Energia, [www.roskatenergiaksi.fi](http://www.roskatenergiaksi.fi). Kollad 4.4.2011
- Rauch, R.: Development of the biomass CHP Güssing to a biosyngas platform; Kraftwerk Güssing GmbH & Co KG; Austria. GREENSYNGAS workshop, Güssing, Österrike, februari 2011.
- Salo, K. (Carbona Oy): Privat diskussion, 2010.
- Sohlström, H.: Biorefineries – UPM and Biofuels. FOREST BIOENERGY conference, Tammerfors, Finland, september 2009.

## FÖRGASNINGSTEKNOLOGI UR ANVÄNDARENS SYNVINKEL

---

*Pentti Etelämäki*

*Keski-Pohjanmaan metsänomistajien liitto ry<sup>1</sup>, Finland*

*Keski-Pohjanmaan Metsämarkkinointi Oy<sup>2</sup>*

*Lohtajan energiaosuuskunta<sup>3</sup>*

Värmeproducenter och energiandelslag använder i Finland vanligtvis anläggningar i storleksklassen 0,3-2,0 MW. Hittills har de nästan enbart koncentrerat sig på att producera värme för sina kunder. Kunderna är i de mest kostnadseffektiva lösningarna stora i förhållande till anläggningsstorleken och mycket nära värmeproduktionsenheten. De största anläggningarna har vanligen mera kunder, värmeöverföringskanalen är längre och värmeproduktionen är av fjärrvärmetyyp, men ändå s.k. närenergi. Kunderna är vanligtvis kommuner, städer, församlingar och företagare. Man har kommit överens om en avtalslösning om värmeproduktionen med t.ex. en nära liggande skola, fabrikskällare, höghus, äldreboende, etc., vilka redan är stora förbrukare av vattenburen uppvärmning. Som bränsle används för det mesta flis, men på områden med torvfyndigheter även torv. En blandning av flis och torv används i synnerhet under de tider som man har hög konsumtion av värme. Vissa energiandelslag har förbundit sig att använda enbart trä som råvara.

Energiandelslag har i Finland grundats sedan 1990-talets början ända in på början av 2000-talet. Under de senaste åren har just inga andelslag grundats. Man kan nu klart märka att de anläggningar som koncentrerar sig på enbart värmeproduktion fortsätter till livscykelns slut med sina existerande anläggningar, och efter detta behövs något nytt. EU:s och

- 
- 1 Mellersta Österbottens skogsägarens förbund r. f.
  - 2 Mellersta Österbottens Skogsmarknadsföring AB
  - 3 Lochteå energiandelslag

Finlands energipolitik med sina mål gällande förnyelsebara energikällor styr nya investeringar mot en höjning av förädlingsgraden på energin. I denna utveckling står CHP (Combined Heat and Power) –anläggningar i en nyckelställning som en av möjliga lösningar.

Värmeföretagarnas och energiandelslagens förväntningar på CHP-anläggningarna är stora. De tekniska lösningarna måste vara fungerande, så enkla som möjligt och det måste vara lätt att administrera styrsystemen. Om anläggningarna kan produceras i moduler är detta en fördel, då kan komponenter sättas till och tas bort i enlighet med belastning och behov. Grundstorleken på anläggningarna borde ha 0,3-2,0 MW värme-produktionseffekt och el/gaseffekten borde vara cirka 50% utöver detta. Vad gäller verkningsgrad på anläggningarna förväntas 3000-4000 timmars topp effekt, t.ex. en 0,3 MW anläggning borde i året producera minst ca 600 MWh värme och cirka 300 Mwh el/gas. Det bör vara smidigt att ta i bruk den nya tekniken. Producenterna av anläggningarna borde garantera service t.ex. genom lösningar såsom leasing eller ett täckande servicenätverk. Återbetalningstiden för investeringen bör vara närmare fem än tio år.

Det kommer säkert att finnas kundpotential för elproduktion och närenergi. Potentiella användare är sådana som förbrukar över 100 000 kWh (100 MWh) el i kombination med värme eller nedkylning. Denna tröskel sänks ytterligare då elen blir dyrare och stöd som gynnar små anläggningar eventuellt införs i enlighet med den modell som förekommer i Mellaneuropa. Konkurrenskraften för produktion av värme förbättras då konkurrerande energiformer, såsom lätt brännolja, blir dyrare. Förutom olika sporrande energistöd finns alternativt ännu investeringsstöd och förmånlig lånefinansiering att tillgå. Närenergi har nämnts i många intresseorganisationers strategier, bl.a. av de finska lantbruksproducenternas förbund (MTK). Fördelarna med små anläggningar är obestridliga ifråga om transport och för att skapa arbetsplatser på landsbygden.

Tekniken med förgasning av trä erbjuder möjligheter till att tillverka många högre förädlade energiprodukter och användning av dessa lokalt. Gasen kan tas tillvara med många olika tekniker i motorer och generatorer. Den producerade elen och gasen är lätt att flytta/överföra och sälja på närområdet. Jämfört med detta är värmeöverföring mindre förmånligt p.g.a. dyra investeringar i värmekanaler och överföringssvinnet.

I traditionell värmeproduktion uppnår små anläggningar på årsbasis en verkningsgrad på 75-85%. På verkningsgraden inverkar anläggningens dimensionering (tiden för den högsta förbrukningen), längden på värmeöverföringsnätet, kvaliteten på bränslet, rengöring av pannan och reglering av förbränningsprocessen. På sommaren är verkningsgraden naturligtvis mycket sämre än på vintern. Man har också kunnat konstatera att två för- enade pannor är en bränslesnålare lösning än en stor. D.v.s. en anläggning

med ett verkningskrav på 1 MW fungerar med en bättre verkningsgrad med två 0,5 MW:s pannor, varav den ena står kall under största delen av året. Den egna elförbrukningen för värmeanläggningar har konstaterats vara ungefär 1-2% av den producerade värmeenergin, varför största delen av den el som produceras med CHP-anläggningar av energiandelslag eller värmeföretag skulle gå till försäljning.

Flisens bränsleeffektivitet förbättras ju torrare råmaterialet är. Då förbättras också kostnadseffektiviteten genom att det går åt mindre flis, flisframställnings- och transportkostnaderna blir mindre och funktionsstörningarna minskar. En bra råvara för värmeproduktion är flis med en fukthalt på 30-35%. Energiandelslagen har under många år skolats för att uppnå detta kvalitetskrav. Jag har förstått att flisens kvalitetskrav (fukthalt) vid CHP-produktion är av samma klass.

Finlands regering har uppgjort ett åtgärds paket, i vilket man har definierat målsättningar för förnyelsebar energi fram till år 2020. För att uppnå dessa mål har man beslutat om höjda energiskatter för fossila bränslen och också för torv. De egentliga sporrarna, såsom inmatningstariff, värmepremier, elproduktionsstöd kopplat till utsläppshandel, energistöd för klenved och andra investeringar, stöd för ändring av värmesystem, är ännu (i början av år 2011) inte fullständigt godkända. Nya små anläggningar och redan existerande små anläggningar har i förslaget behandlats illa ifråga om anläggningsstorleksgränser och minimiproduktionsmängder. En graderad inmatningstariff enligt modellen i Mellaneuropa är inte heller på kommande. Också kvartalsgranskningarna förorsakar spekulativa lösningar, om dessa kvarstår som sådana.

Det skulle vara önskvärt att man främjar mångsidig produktion av närenergi med kloka insatser. På så sätt får man positiva effekter på allt från antalet arbetsplatser, den tekniska utvecklingen, förädling av bioenergi, skogsskötsel, riskfri energiproduktion till mindre miljöbelastning.





# **BIOBRÄNSLEN OCH ANVÄNDNING AV PRODUKTGAS**



## FRAMTIDENS BIOBRÄNSLEN

---

*Kirsi Partanen<sup>1</sup>, Ulla Lassi<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Uleåborgs universitet, Institutionen för kemi, <sup>2</sup>Karleby universitetscenter  
Chydenius, Finland*

### INLEDNING

Behovet av energi har uppskattats växa med över 50% fram till år 2050 under förutsättning att den ekonomiska tillväxten fortsätter med nuvarande hastighet. Det ökade behovet av energi beror till största delen på en ökad förbrukning i utvecklingsländerna. De minskade tillgångarna på fossila bränslen och den förväntade fortsatta ökningen av världsmarknadspriset har fått företag, forskningsinrättningar och politiska beslutfattare att söka alternativa lösningar till de fossila bränslen som idag används som fordonsbränslen.

I ett EU-direktiv (Direktiv 2003/30/EU) uppställs mål för en ökad användning av biobaserade bränslen inom EU-området. Enligt målsättningarna i direktivet borde andelen biobaserade bränslen uppgå till 2 % fram till slutet av 2005 och till 5,75 % fram till slutet av 2010. Ett flertal stater, bland dem Finland, har tillsvidare inte kunnat uppfylla målsättningarna.

I diskussioner om biobränslen, liksom vid forskning och produktion av dessa, har man hittills fokuserat främst på framställning av bioetanol och -diesel (etrar). Energivärdet för etanol är dock betydligt lägre än motsvarande värde för fossila bränslen (bensin, diesel). Av denna orsak är det viktigt att undersöka också andra organiska föreningar som kan vara möjliga att användas som fordonsbränslen, exempelvis alkoholer som butanol och pentanol, samt furfural och furanföreningar.

Butanol har betydande fördelar jämfört med etanol. Uppskattningsvis cirka 0,7 liter butanol motsvarar till energitätheten en liter etanol. Dessutom har butanol ett bättre luft-till-bränsle-förhållande och kan direkt användas i moderna förbränningsmotorer. Problemet med framställning av

butanol har fram till nu varit ett lågt utbyte, speciellt om butanolen framställs utgående från biobaserade råämnen.

5-Hydroximetylfurfural har tidigare producerats utgående från fruktos, men kan tack vare joniska lösningar och katalysatorer effektivt framställas också från glukos. 2,5-dimetylfuran har en energitäthet som är 40 % högre än etanolens. Framställning av furfural blir av denna orsak ett intressant alternativ för produktion av biobränslen, samtidigt som det tillför nya perspektiv för användning av biomassa.

## FORDONSBRÄNSLEN

De vanligaste bränslen som används för fordonsbruk är fossila bränslen, bensin och diesel. Globalt sett förbrukas dessa närmare 5 biljoner liter årligen. Av de bilar som är bruk använder 97 % fossila bränslen som energikälla. Alternativa bränslen använder tillsvidare endast 3 % och av dessa är 1-2 % bränslen som framställs från förnybara energikällor.

Fordonens beroende av olja kan minskas genom att utveckla nya alternativa och förnybara bränslen samt motorer som kan använda mera mångsidiga energikällor. Som alternativa fordonsbränslen används eller planeras biodiesel, natur- och biogas, flytgas, alkoholer som metanol, etanol och butanol, derivat av furfural samt väte.

Vid sidan om vätske- och gasformiga bränslen utförs forskning om energikällor som exempelvis bilar som drivs av litiumjonbatterier. De första tillämpningarna av dessa finns redan på marknaden och nästan varje biltillverkare har redan ett koncept med hybridbilar. Med elbilar minskar man beroendet av flytande bränslen. Det är dock skäl att komma ihåg att energin för elbilar måste produceras. Sättet på hur energin produceras bestämmer långt hur pass "ekologiska" dessa fordon är.

## Fysikaliska och kemiska egenskaper hos fordonsbränslen

I tabell 1 finns kemiska och fysikaliska egenskaper för bensin, diesel och alkoholbaserade bränslen samlade. Energitätheten för etanol som normalt används är betydligt lägre än för exempelvis butanol och 2,5-dimetylfuran (DMF). För en blandning av etanol och bensin är minskningen i totalenergi trots allt inte så betydande jämfört med andra bränslen eftersom största tillåtna etanolhalt i dagsläget åtminstone i Finland är endast 10 volym-% (E10-bensin).

**TABELL 1. Fysikaliska och kemiska egenskaper för bensin, diesel och alkoholer använda som bränslen. (Gautam et al., 2000)**

BRÄNSLE	Energitäthet (MJ/l)	RON*	MON**	Löslighet i vatten (%)	Förhållande luft-bränsle	Viskositet (20°C)
Bensin	32	91–99	81–89	obefintlig	14.6	0.4–0.8
Diesel	35.5	-	-	obefintlig	(60–100 vid tomgång) 14.7	4 (40°C)
n-Pentanol	27.8	Lågt	Lågt	0	11.68	-
n-Butanol	29.2	96	78	7	11.12	3.64
Etanol	19.6	130	96	100	8.94	1.52
Metanol	16	136	104	100	6.43	0.64
2,5-dimetyl furan (DMF)	30	119		2.3	-	-

\* RON = Oktantal bestämt vid 600 rpm (Research Octane Number)

\*\* MON = Oktantal bestämt vid 900 rpm (Motor Octane Number)

## EU:s lagstiftning gällande bränslen

I Europeiska Unionens gemensamma regler finns stadgar angående egenskaper för biobränslen samt om tillåtna halter av vissa ämnen. Europeiska bränsledirektivet (2003) och kvalitetsstandardEN 228 (2004) tillåter en syrehalt i på maximalt 3,7 mass-%, enligt dessa kan alkoholer och furaner inte direkt användas som fordonsbränslen, i stället är biobränslen blandningar av flera ämnen. Också när det gäller bränslet E85, där etanolhalten är högre, rekommenderar man att det används enbart i bilar avsedda för detta bränsle. I tabell 2 anges maximivärden för olika parametrar enligt europeiska bränsledirektivet.

**TABELL 2. Lista över olika parametrar och deras maxvärden enligt europeiska bränsledirektivet. (Europeiska bränsledirektiv, 2003).**

PARAMETER	ENHET	MAXVÄRDE
Ångtryck, sommartid *	kPa	60,0**
Olefiner	volym- %	18,0
Aromatiska föreningar	volym- %	35,0
Benzen	volym- %	1,0
Syrehalt	mass- %	3,7
Metanol	volym- %	3,0
Etanol	volym- %	10,0
Etrar (ex .DMF)	volym- %	22,0
Andra oxidanter	volym- %	15,0

\*) Inleds senast 1.5 och slutar tidigast 30.9. För medlemsstater med arktiska eller mycket hårda vinterförhållanden, inleds senast 1.6 och slutar tidigast 31.8

\*\*\*) För medlemsstater med mycket hårda vinterförhållanden, under sommartid högst 70 kPa.

Vid framställning av biobränslen bör man även beakta exempelvis bränsleblandningens resistans mot oxidation, eftersom bränslen kan komma i kontakt med luftens syre vid förvaring. Vid oxidation kan det bildas fällningar som täpper till bränslefilter i motorer. Av säkerhetsskäl får flampunkten för biobränslen inte vara lägre än 55 °C. (Motiva, 2006)

Europaparlamentet godkände i december 2008 ett direktiv om användning av förnybar energi (2008/19). Enligt detta skall andelen förnybar energi uppgå till 20 % år 2020. Som råvaror för biobränslen borde organiska avfallsmaterial gynnas, biomassor av non-food typ och lignocellulosa som exempelvis avfallsslam från cellulosaindustrin. Om råmaterialet för biobränslen odlas på områden som är olämpliga för livsmedelsproduktion kan bonus beviljas för koldioxidutsläpp. Angående användningen av förnybar energi stadgas för varje enskild medlemsstat nationella mål.

## Användning av biomassor vid bränsleproduktion

Av tradition har olika typer av biomassa som också lämpar sig för livsmedelsframställning använts för framställning av biobränslen, på grund av detta har man globalt sett minskat livsmedelsproduktionen. Begränsningar har dock införts för ett dylikt förfarande eftersom effekterna har varit en ökad hungersnöd och stigande priser på livsmedel; i dagsläget lider närmare en miljard människor av hungersnöd. Också en förändrad kost-

nadsstruktur för tillverkning av biobränslen har vänt forskningens intresse mot biomassa i industriellt och kommunalt avfall. I Finland kan man använda skogsindustrins restprodukter för framställning av biobränslen, detta avfall har ett högt cellulosa- och energiinnehåll, dessutom används avfall från livsmedelsindustrin.

Biomassa från industrins avfall kan vara problematiska att använda vid biobränsleproduktion eftersom de innehåller olika fraktioner samt rester av olika produktionskemikalier. Dessa faktorer bromsar upp och stör tillverkningsprocessen. Restmaterial bör behandlas på ett för miljön så fördelaktigt sätt som möjligt, så att användningen av dem blir ekologisk. Avfallsbiomassa har ett högt energiinnehåll varför de lämpar sig bra för förgasning (Sricharoenchaikul et al., 2002). Vid förgasning av biomassa minskar behovet av förbehandling men gasreningen blir viktigare.

## ALKOHOLER SOM FORDONSBRÄNSLEN

Alkoholbaserade bränslen kan användas för att ersätta fossila bränslen i förbränningsmotorer och i bränsleceller. Av alkoholer används metanol, etanol, propanol och butanol som bränslen eller som komponenter i bränslen. Ett flertal långkedjade alkoholer kunde användas som bränslen på basen av deras fysikaliska och kemiska egenskaper men tillsvidare är en kommersiell produktion för ändamålet inte lönsam. Användning av etanol är vanligast tack vare dess låga toxicitet samt välkända tillverkningsprocesser (Minteer, 2006).

### Etanol som fordonsbränsle

Bioetanol är det vanligaste alkoholbaserade fordonsbränslet. Etanol används vanligen uppblandat i bensin. Den dåliga effekten hos etanol har ofta kritiserats, däremot är användningen som bränsle och tillverkningen väl kända. Produktionen av etanol har förorsakat betydande miljöskador i länder, speciellt i Syd-Amerika, där värdefull regnskog har skövats för att ge rum för odling av grödor för bioenergiproduktion.

### Butanol som fordonsbränsle

n-Butanol är en envärd alkohol. Den kan direkt användas eller med små justeringar av motorn som bränsle för bensindrivna fordon vid sidan om de fossila bränslena. På grund av de höga produktionskostnaderna för bu-



tanol finns de kommersiella användningarna för butanol tillsvidare inom kemikalie- och lösningsmedelsindustrin. Fördelar med butanol är dess låga löslighet i vatten, något som minskar skadeeffekterna om butanol kommer i kontakt med grundvatten. Dessutom har butanol ett lågt ångtryck varför fördelning och tankning av butanol kan ske med nuvarande distributionsnät (bensinstationer). (Ramey et al, 2000)

## Andra alkoholer

Användningen av tyngre alkoholer som fordonsbränslen i stället för etanol är ett alternativ tack vare en högre energitäthet och en lägre löslighet i vatten. Förgrenade alkoholer har ett högre oktantal jämfört med alkoholer med samma antal kolatomer men med raka kedjor. Förgrenade alkoholer kan tillsvidare inte syntetiseras tillräckligt ekonomiskt med hjälp av naturliga mikro-organismer.

Metanol har inte undersökts i lika hög grad som etanol när det gäller användning som fordonsbränsle. Forskning om metanol har främst koncentrerats till syntes i gasfas samt till metanolens användning i bränsleceller. Tillsvidare används metanol främst som råvara för och som tillsatsämne i andra bränslen, t.ex. vid tillverkning av dimetyleter (Minteer, 2006).

## Furaner och furfuraler som fordonsbränslen

Furfuraler och furaner har i diskussionen om biobränslen lyfts fram som alternativ, främst på grund av att framställningen av dem utgående från socker lyckas relativt bra med kända metoder. Föreningarna har dessutom goda egenskaper som bränslen. Exempelvis är energitätheten hos 2,5-dimetylfuran (DMF) cirka 40 % högre än hos etanol (Hadlington, 2007; Zhao et al., 2007; Román-Leshkov et al., 2007). Framställning av 2,5-DMF har tidigare skett främst utgående från fruktos men en ny metod gör det möjligt att använda också glukos som råvara (Zhao et al., 2007). Det här gör det möjligt att använda cellulosahaltiga avfallsmassor från skogsindustrin som råvaror.

## TILLVERKNING AV ALKOHOLER

Alkoholer tillverkas allmänt genom fermentering av socker genom enzymatisk katalys. Katalytiska metoder där biomassa först förgasas till syntes-

gas är under utveckling och de första kommersiella producenterna finns redan, bland annat i Amerika.

## Tillverkning genom enzymatisk katalys

Tillverkning av alkoholer genom enzymatisk katalys är en välkänd process. Den naturliga jäsningsförmågan hos socker har länge använts för att framställa olika alkoholdrycker. Den mest kända metoden för att framställa etanol från sockerhaltiga råvaror är att använda enzym från *Saccharomyces cerevisiae* eller bagerijäst (Glazer et al, 1995; Helle et al., 2004; Lawford et al., 2002).

## Framställning av etanol

Jäst använder socker som energikälla (kolkälla). Detta sker i en anaerob jäsningsreaktion. Kemiskt är det fråga om en redoxreaktion där det inte sker någon nettoreducering eller -oxidering. Som slutprodukter av jäsningen bildas föreningen som cellen utsöndrar till omgivningen. Etanol separeras från den vattenbaserade lösningen genom destillering. Allt vatten kan inte fås bort på detta sätt, utan man måste dessutom tillsätta olika torkningskemikalier.

## Framställning av butanol

Vid framställning av butanol används olika bakterier av släktet *Clostridium*. Butanol framställs i en fermenteringsmetod i två steg (FBB metoden). det första steget är det så kallade acidogena steget där pH hålls neutralt, som produkter fås ättik- och smörsyra. Det andra steget är den så kallade solvatogena fasen som utförs vid lågt pH (cirka 4,3–4,4). Som produkter från den andra fasen fås aceton, butanol och etanol. Ett tredje steg blir den alkogena fasen där produkterna (butanol, aceton och etanol) separeras från varandra.

## Framställning av katalysatorer

Katalytiska tillämpningar är mycket vanliga vid förädling av råolja. I de här fallen kan reaktionstemperaturen uppgå till flera hundra grader och reaktionerna sker på gränssytan mellan gas och fast ämne. Den termiska stabiliteten för biomassa är mycket lägre än för råolja. Behandlingspro-

cesser för biomassa bör därför utföras i vätskefas eller mycket varsamt i gasfas i de fall man vill undvika att biomassa nedbryts till syntesgas. Processerna blir därför långsammare och reaktorvolymerna som behövs blir större (Klass, 2004).

Globalt sett har de första kommersiella teknikerna, där biobränslen framställs genom att biomassa förgasas samt en katalytisk omvandling av gasen, utvecklats. Företag som utvecklat dessa tekniker är bland annat Choren, Coscata och Range Fuels. Genom förgasning av biomassa tillverkar företagen främst etanol och alkaner (Lin et al., 2009). De mest kända processerna är metanolsyntes och Fischer–Tropsch –syntes. Vid konvertering av biomassa till syntesgas krävs oftast flera olika delsteg som förgasning av biomassa, rening av gasen (oftast en konverteringsenhet för vattengas) och slutligen konvertering av syntesgasen (Klass, 2004).

## KÄLLOR

- Direktiv 2003/30/EU. Official journal of the European Union, L123/42, 17.5.2003, DIRECTIVE 2003/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, “on the promotion of the use of bio-fuels or other renewable fuels for transport”, last på internet 25.8.2009: [http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en\\_final.pdf](http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en_final.pdf)
- Direktiv om användning av förnybar energi (2008/19). Renewable Energy Directive (COM (2008) 19), 24.8.2009, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FI:PDF>
- Europeiska bränsledirektivet (2003). Europeiska unionens officiella tidning L 76/10, 22.3.2003, läst på internet 29.3.2010: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:076:0010:0019:FI:PDF>
- Europeiska kvalitetsstandardEN 228 (2004). European standard, EN 228:2004, Automobile fuels – Unleaded petrol – Requirements and test methods. Läst på internet 29.3.2010: [http://www.aspen.se/Files/Technology/standards/EN%20228%20vers%202008\\_07\\_II\\_.pdf](http://www.aspen.se/Files/Technology/standards/EN%20228%20vers%202008_07_II_.pdf)
- Gautam, M., Martin II, D.W., Proc. Inst. Mech. Engrs, 2000, 214 A, 497
- Glazer, A.N., Nikaido, H.; Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology, W.H. Freeman and Company. USA, 1995, 327–358
- Hadlington S. Chemistry World, news, 2007
- Helle, S.S., Murray, A., Lam, J., Cameron, D.R., Duff, S.J.B, Bioresour. Technol. 2004, 92, 163
- Klass, D.L, in Encyclopedia of Energy, ed. C.J. Cleveland, Elsevier, London, 2004, 193-212

- Lawford, H.G., Rosseau, J.D., Appl. Biochem. Biotechnol., 2002, 98-100, 429
- Lin, Y-C, Huber, G.W., Energy and Environmental Science, 2009, 2, 68
- Minteer, S., Alcoholic fuels, 1st edition, CRC Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006, 1-3
- Motiva, 2006. Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot –opas, Motiva, 2006. Läst på internet 29.3.2010: [http://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset\\_polttoaineet\\_ja\\_ajoneuvot.pdf](http://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset_polttoaineet_ja_ajoneuvot.pdf)
- Ramey, D., Yang, S-T, Production of Buturic Acid from Biomass, Final Report, for U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, 2000
- Román-Leshkov, Y., Barrett, C.J., Liu, Z.Y., Dumesic, J.A. Nature, 2007, 447, 982
- Sricharoenchaikul, V., Agrawal, P., Frederick, W.J., Jr., Ind. Eng. Chem. Res. 2002, 41, 5640
- Zhao, H., Holladay, J.E., Brown, H., Zhang, Z.C. Sciencemag., 2007, 316, 1597

## NYA KEMISKA PRODUKTER OCH NYA TILLÄMPNINGAR FRÅN SYNTESGAS

---

*Henrik Romar<sup>1</sup>, Pekka Tynjälä<sup>1,2</sup>, Riikka Lahti<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Karleby universitetscenter Chydenius, <sup>2</sup>Uleåborgs universitet, Finland*

### BIOBASERADE FORDONSBRÄNSLEN

Biomassa är en förnybar resurs som har en stor potential för omvandling till biobaserade bränslen. Genom termisk behandling av biomassa (förgasning) fås gaser, som utgör utgångsämnen för framställning av bränslen och kemikalier. Det pågår i dag en intensiv forskning för att finna nya, biobaserade fordonsbränslen som ersättning för de fossila bränslen som nu används. Såväl globalt som inom EU har man satt upp mål att öka andelen biobaserade bränslen. EU:s mål är att öka andelen biobaserade bränslen från 5,75 % år 2010 till 10 % år 2020. År 2009 var andelen endast 1,4 %.

### FÖRSTA OCH ANDRA GENERATIONENS BIOBRÄNSLEN

Biobränslen indelas i första och andra generationens bränslen beroende på vilka råvaror som används vid produktionen. För första generationens biobränslen används råvaror som exempelvis vete, majs och sockerrör, alltså råvaror som också kunde användas för att framställa livsmedel (se tabell 1).

TABELL 1. Första generationens biobränslen.

Första generationens biobränslen			
Typ av bränsle	Benämning	Råvara	Produktionsprocess
Bioetanol	Konventionell bioetanol	Sockerrör, sockerbetor Vete, majs	Hydrolys + fermentering
Vegetabiliska oljor	Rena växtoljor	Raps, ryps	Kallpressning Extrahering
Biodiesel	RME (rapsolja-metylater) FAME (fettsyrametylater)	Raps, ryps	Kallpressning Extrahering Transförestning
Biodiesel	Biodiesel från avfall	Avfallsfetter och oljor, djurfett	Transförestning
Biogas	Uppgraderad biogas	(Våt) biomassa	Metabolisering
Bio-ETBE*		Bioetanol	Kemisk syntes

\* ETBE= etyl-tert-butyleter används vanligen som ett syrehaltigt tillsatämne vid produktion av bensin från råolja.

Som råvaror för andra generationens biobränslen (se tabell 2) används främst lignocellulosahaltigt avfall som hyggesavfall, avfall från lantbruk samt rivningsvirke och specialodlade energigrödor som rörflen. I viss mån kan också restprodukter från livsmedelsproduktion användas, exempelvis stärkelsehaltigt avfall från potatisindustrin. Tanken bakom andra generationens bränslen är att råvarorna inte skall konkurrera med livsmedelsproduktionen utan man använder avfalls- och restprodukter.

På grund av att materialet består av lignocellulosa krävs "hårdare" behandling för att frigöra föreningarna. Använda tekniker är enzymatisk eller sur hydrolys till fria sockerarter följt av fermentering, alternativt direkt förgasning, varvid biomassan omvandlas till vätgas och kolmonoxid, så kallad produktgas.

TABELL 2. Andra generationens biobränslen.

Andra generationens biobränslen			
Typ av bränsle	Benämning	Råvara	Produktionsprocess
Bioetanol	Cellulosabaserad bioetanol	Lignocellulosa	Avancerad hydrolys + fermentering
Syntetiska bio-bränslen	Biomass-to-liquid (BTL) Fischer-Tropsch diesel Biometanol Blandade alkoholer Bio-dimetyleter (Bio-DME)	Lignocellulosa	Förgasning + syntes
Biodiesel	Vätebehandlad biodiesel	Växtolja Djurfett	Hydrering
Biogas	SNG (syntetisk naturgas)	Lignocellulosa	Förgasning + syntes
Bioväte	Bioväte	Lignocellulosa	Förgasning + syntes alternativt Biologiska processer

## VILKA TILLVERKNINGSPROCESSER KOMMER MAN ATT ANVÄNDA I FRAMTIDEN?

För en storskalig produktion av biobränsle bör hela processen bedömas ur ett flertal synvinklar när bränslet introduceras på en marknad som behärskas av fossila bränslen. Särskilt fyra kriterier är viktiga, nämligen: effektivitet, ekonomi, miljöpåverkan och slutanvändning. Dessutom finns det ytterligare ett flertal synpunkter som bör beaktas:

1. Bränslet produceras via en förgasningsprocess som kan behandla olika typer av biomassa, såväl träbaserad som lantbruksavfall och kommunalt avfall
2. Tillverkningsprocessen tillåter flexibel produktion från såväl bio-baserade som fossila material
3. Det finns en existerande infrastruktur för fördelning och distribution.

4. Biobränslet är blandbart med existerande bränslen.
5. Bränslet har en hög energitäthet.
6. Bränslet kan enkelt användas i bränsleceller.
7. Det finns en hög effektivitet i hela kedjan från källa till hjul\*.
8. Produktionen och användningen belastar miljön så lite som möjligt.
9. Priset är lågt, lägre eller obetydligt högre än för motsvarande fossila bränsle.
10. Det används en välutvecklad teknologi vid produktionen.

\**Källa till hjul* (från engelska well-to-wheel) innebär att alla relevanta steg av bränslekedjan har räknats in, det vill säga odlingen och skörden av råvaran, transporterna till anläggningen där bränslet framställs, framställningen av bränslet, distributionen till tankstället och förbrukningen i fordonet.

## BIOBRÄNSLEN FRÅN SYNTESGAS

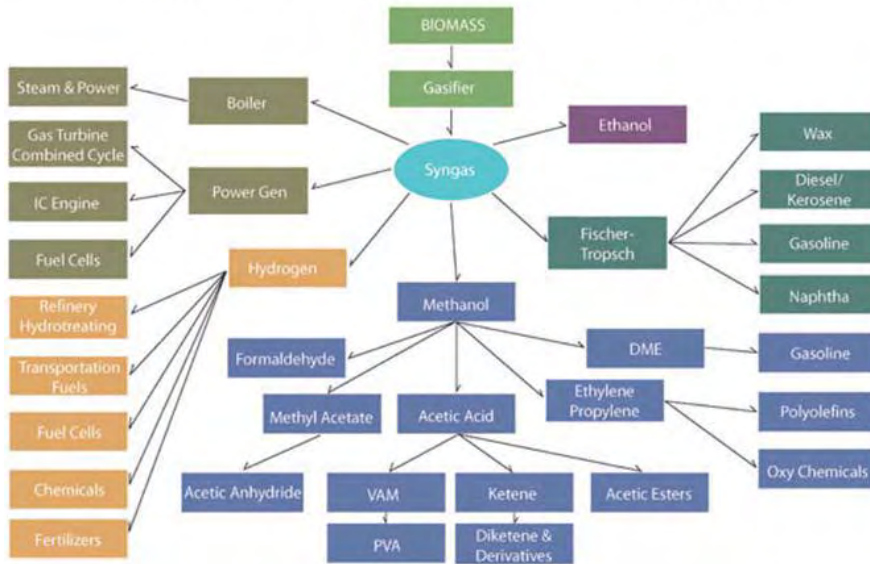
Genom förgasning av biologiskt material bildas så kallad syntesgas (bio-SNG). Syntesgasen innehåller främst vätgas ( $H_2$ ) och kolmonoxid (CO) men också spår av olika svavelföreningar samt tjära.

Syntesgas kan användas för ett flertal ändamål

- Direkt energiproduktion genom förbränning
- Vätgasen kan användas som sådan eller för att framställa olika kemikalier.
- Genom katalytisk omvandling (den så kallade Fischer-Tropsch reaktionen, se nedan) kan man framställa organiska föreningar från bensin och biodiesel till olika vaxer.

Via reaktionsvägen över metanol kan man också framställa bränslen genom en reaktion som omfattar dimetyleter (DME) samt olika kemikalier baserade på metanol.





FIGUR 1. Möjliga användningsområden utgående från förgasad biomassa.

## RENING AV PRODUKTGAS TILL SYNTESGAS

Vid förgasning av biomassa bildas förutom huvudkomponenterna vätgas och kolmonoxid ( $H_2$  och  $CO$ ) ett flertal andra kemiska föreningar. De flesta av dessa föreningar är oönskade och kommer att påverka den fortsatta användningen av gasen. Vilka föreningar som bildas och i vilka halter de återfinns i gasen bestäms av faktorer som råvara, förgasningsteknik och kanske viktigast, förgasningstemperatur. En allmän princip är att ju högre förgasningstemperatur desto lägre halter bildas av de störande föreningarna. Om gasen skall renas till syntesgas, som har mycket strikta begränsningar, kommer kostnaderna för reningsprocessen att bli mycket höga, enligt vissa beräkningar kan de uppgå till över 50 % av de totala kostnaderna.

## KATALYSATORER OCH KOMPONENTER SOM INGÅR I EN KATALYSATOR

En katalysator är en komponent som försnabbar en kemisk reaktion utan att själv delta i reaktionen. Genom att använda katalysatorer blir det möj-

ligt att utföra kemiska reaktioner under mildare förhållanden och med mindre energiförbrukning.

En katalysator består i allmänhet av en aktiv metall, ett stödämne och en promotor. Den aktiva komponenten bestämmer katalysatorns kemiska aktivitet. Valet av aktiv komponent baseras främst på om katalysatorn skall användas till oxidations- eller reduktionsreaktioner samt under vilka förhållanden katalysatorn används. Andra viktiga egenskaper är löslighet och reducerbarhet. Normalt fås den katalytiska metallen från prekursorsalt som kan vara exempelvis nitrater, klorider etc. Val av stödämne påverkas av hur katalysatorn kommer att användas och av reaktionsförhållanden som temperatur och pH. Viktiga egenskaper är att ge en stor specifik yta åt katalysatorn samt goda mekaniska egenskaper, stabilitet, och att underlätta en jämn fördelning (dispersion) av den aktiva komponenten på ytan. Vanliga stödämnena är aluminium, kisel, aktivt kol och kolbaserade nanorör samt olika zeoliter.

Promotorn kan kopplas antingen till stödämnet eller till den aktiva komponenten. I stödämnet inverkar den på katalysatorns struktur samt för att öka/dämpa aktiviteten. Kopplad till den aktiva komponenten kan promotorn påverka exempelvis katalysatorns elektriska egenskaper samt förhindra förgiftning av katalysatorn.

## FISCHER-TROPSCH-SYNTESEN

De tyska forskarna Franz Fischer och Hans Tropsch utvecklade redan år 1923 den så kallade Fischer-Tropsch-syntesen (FTS), där man framställer alifatiska kolväten, alltså diesel, utgående från syntesgas. Som katalysatorer användes kobolt (Co), järn (Fe) och rutenium (Ru). Redan 1925 patenterades den nya Fischer-Tropsch-processen och den första kommersiella FT-anläggningen installerades 1935 i Tyskland. Under andra världskriget upplevde FT-processen en produktionstopp när Tyskland behövde producera flytande bränslen.

Från medlet av 1950-talet var produktionen av FT-bränslen inte längre lönsam eftersom oljan från Mellanöstern var billig och de fossila bränslena erövrade världsmarknaden. Under 1950-talet uppfördes nya FT-anläggningar i Sydafrika (med användning av CTL-metoden, coal to liquid) eftersom landet var i det närmaste utan olja på grund av handelsbojkotten förorsakad av apartheidpolitiken. Företaget Sasol i Sydafrika tillverkade flytande bränslen utgående från förgasat kol genom FT-syntes med hjälp av järnkatalysator och gjorde landet oberoende av olja.

Under oljekrisen på 1970-talet började såväl USA som Europiska Unionen på nytt finansiera FT-forskningen. I Finland har cellulosaproducenten

UPM planer på att bygga en anläggning för att producera FT-biodiesel från den avfallsbiomassa som uppstår vid tillverkning av papper och cellulosa. VTT (Statens tekniska forskningsanstalt), Stora Enso och Neste Oil har ett samprojekt (NSE Biofuels Oy) där man uppför en försöksanläggning i megawattstorlek för framställning av andra generations biobränslen utgående från biomassa (trä) vid fabriken i Varkaus. Den försöksanläggning som nämns ovan är i storleksordningen 12MW och har byggts i anslutning till en existerande massafabrik för att kunna använda befintlig infrastruktur. Fischer-Tropsch-syntes i decentraliserad, mindre skala har däremot inte genomförts i praktiken.

Fischer-Tropsch-syntesen genomförs under förhållanden med relativt högt tryck (20-60 Bar) och hög temperatur (200-450 °C). De aggressiva reaktionsförhållandena i kombination med reaktionsgasernas egenskaper (H<sub>2</sub> (vätgas) är explosiv och CO (kolmonoxid) är toxisk) gör att reaktionen måste utföras under mycket kontrollerade förhållanden och med höga krav på säkerhet. Genom FT-reaktionen kan man framställa ett flertal produkter. Vilka produkter som bildas bestäms av ett antal olika faktorer:

- Syntesgasens sammansättning, varierar beroende på råmaterialet vid förgasningen, speciellt viktigt är förhållandet H<sub>2</sub>/CO. För produktion av bränslen (diesel och bensin) används ett förhållande H<sub>2</sub>/CO på 2,0 till 2,5. Bio-SNG framställd genom förgasning av träbaserat material har ett H<sub>2</sub>/CO omkring 1, halten H<sub>2</sub> måste ökas genom tillsats av vatten (se reaktion 2 nedan).
- Reaktionsförhållanden så som temperatur, tryck och reaktionstid. Reaktionen utförs vid temperaturer mellan 200 och 250 °C och tryck mellan 20 och 60 Bar.
- Val av katalysator och katalysatorns egenskaper. Som katalysatorer vid framställningen av bränslen används Fe- eller Co-baserade katalysatorer. Sällan används katalysatorn i ren form utan uppblandad med någon bärare.

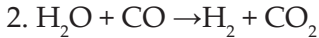
## REAKTIONER

1. Vätgas reagerar med kolmonoxid, bildas kolväten och vatten

$$(2n+1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{(2n+2)} + nH_2O$$

Detta är den egentliga Fischer-Tropsch reaktionen. Vid reaktionen bildas ett flertal olika organiska föreningar, det är i praktiken omöjligt att med reaktionen framställa en enda ren komponent.

Förhållandet  $H_2/CO$  kan regleras genom tillsats av vatten:



Även om reaktionen ovan ger en önskad bildning av  $CO_2$  ger den ökade mängden  $H_2$  fördelar som överväger de negativa. Reaktionen används framför allt när man använder råvaror som ger syntesgas med ett lågt  $H_2/CO$  förhållande, exempelvis träbaserat material.

## UTVECKLING AV FISCHER-TROPSCH SYNTESEN INOM HIGHBIO-PROJEKTET

### Bakgrund

Målsättningen med ett av delområdena i HighBio-projektet är att utveckla nya kemiska produkter utgående från förgasningsprodukterna vätgas ( $H_2$ ) och kolmonoxid ( $CO$ ). Ett av målen är att katalytiskt omvandla syntesgasen till fordonsbränslen via den så kallade Fischer-Tropsch processen. Som nämntes ovan är FT-reaktionen en katalytisk reaktion där syntesgas (väte och kolmonoxid) omvandlas till kolväten i en trycksatt reaktor vid temperaturer mellan 200 och 300 grader Celsius. Vid Karleby universitetscenter Chydenius har vi inom ramen för HighBio-projektet framställt olika katalysatorer samt testat katalysatorerna för att optimera FT-reaktionen.

Inom projektet har vi fokuserat på några centrala punkter som berör omvandlingen av syntesgas till kemiska föreningar, nämligen själva reaktorsystemet för att testa våra katalysatorer, för det andra utvecklingen av aktiva och stabila katalysatorer för FT-reaktionen och slutligen en utveckling av analyserna för att dels kunna mäta och identifiera de kemiska komponenter som bildas och dels för att mäta tjärhalten i den produktgas som bildas vid förgasningen.

Det första utvecklingsområdet har gällt själva reaktorsystemet. Ett fungerande testningsreaktorsystem har byggts upp från i princip noll. En schematisk bild av reaktorn finns i Figur 2. Reaktorsystemet består av följande komponenter:

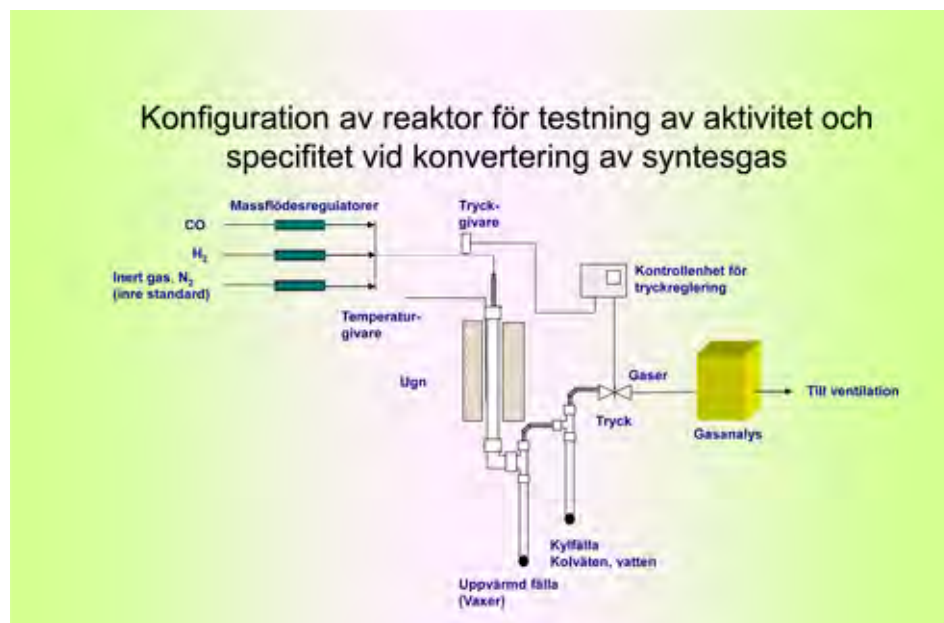
- En reaktor monterad i en ugn, under projektets gång har ugnen bytts ut för att få mera ändamålsenlig temperaturstyrning
- Temperaturgivare (Pt 1000, K-typ) monterad mitt i katalysatorbädden
- Massflödesmätare för individuell kontroll av gasflöden (väte, kolmonoxid och kväve)
- Tryckregulator som styrs via en tryckgivare och en kontrollenhet

- Uppsamlingsenheter för de produkter som bildats, en uppvärmd för långa kolkedjor och vaxer och en kyld för lätta kolväten
- On-line analysatorer (gaskromatograf med flamjonisationsdetektor och termisk konduktivitetsdetektor GC-FID/TCD) för analys av bildade, gasformiga produkter

Reaktorsystemet har under projektets gång modifierats ett flertal gånger för att motsvara uppkomna behov. Den senaste ombyggnaden omfattar en tillbyggnad för testning av katalysatorer för krackning (sönderdelning) av tjärkomponenter i gas. Samtliga katalysatorer testades under projektets gång har genomförts med ovan nämnda reaktor.

Utvecklingen av katalysatorer för omvandling av syntesgas till exempelvis fordonsbränslen är den viktigaste delen av det arbete som utförts inom detta delområde av HighBio-projektet. Framställningen och testningen av katalysatorer är en mycket tidskrävande process. Olika bärare- och katalysatormaterial har testats, samtliga bärare har donerats från Sasol i Tyskland.

Också när det gäller den aktiva metallen i katalysatorerna har olika metaller och metallsalter testats för att få en optimalt aktiv katalysator. Undersökningar av effekten av tillsatser av olika ädel- och halvädelmetaller har studerats. De framställda katalysatorerna har testats med såväl rena gaser som med syntetisk syntesgas.



FIGUR 2. En schematisk bild över det reaktorsystem som byggts upp vid Chydenius.

## STEG I UTVECKLINGEN AV KATALYSATORER

- Katalysatorn (oftast ett metallsalt) löst i vatten impregneras på en porös bärare
- Torkning avlägsnar vattnet
- Kalcinering vid 300-600 grader, metallsaltet omvandlas till en oxid av metallen
- Reducering av metallen, metalloxiden omvandlas till ren metall
- Testning av katalysatorn i reaktor
- Analys av reaktionsprodukterna

## ANALYSMETODER

För att kunna bedöma hur katalysatorerna ovan fungerar krävdes en utveckling av analysmetoder för vätskeformiga och gasformiga organiska föreningar. För analys av de organiska föreningar som bildas används två olika analysmetoder:

FT-IR (Fourier-transformerad infraröd spektrometri), ger information om vilka kemiska bindningar som ingår i föreningarna.

GC-MS (gaskromatografi i kombination med masspektrometer), ger information om vilka föreningar som bildas samt om föreningarnas procentuella fördelning.

De första analyserna för identifiering av organiska föreningar gjordes med FT-IR. Metoden ger bara information om vilka typer av bindningar som ingår i ett prov, däremot är informationen begränsad om vilka kemiska föreningar som ingår.

Gaskromatografiska metoder har utvecklats, först via GC-FID (gaskromatograf med flamjonisationsdetektor) senare GC-MS. Den förstnämnda tekniken ger en tillräcklig separering medan det är svårare att identifiera de enskilda komponenterna. GC-MS som är den bästa tekniken för separering och identifiering av organiska föreningar har, efter lång metodutveckling, visat sig ge mycket detaljerade uppgifter om sammansättningen av de bildade föreningarna.

För analys av gasformiga, icke kondenserbara föreningar från reaktorn införskaffades (med finansiering från ett annat projekt) en gaskromatograf med flamjonisationsdetektor och termisk konduktivitetsdetektor (GC-FID/TCD) för analys av så kallade permanenta gaser (väte, kolmonoxid, kväve, koldioxid och metan) och gasformiga kolväten. Utrustningen monterades on-line till reaktorn och de inledande försöken har gett mycket ny och nyttig information om hur våra katalysatorer uppför sig.

Tjära är en mycket problematisk grupp av organiska föreningar som bildas vid förgasning av biomassa. För insamling av gasprov för bestämning av tjärkomponenter i produktgas har en insamlingsutrustning byggts upp och testats inom ramen för projektet. De insamlade föreningarna har analyserats med den GC-MS som beskrevs ovan.

## SLUTSATSER AV UTVECKLINGSARBETET

- Det reaktorsystem som utvecklats under projektet är ett bra verktyg för fortsatta studier av katalysatorer och deras verkningsmekanismer
- Med de katalysatorer vi använder har vi lyckats framställa föreningar som till sin sammansättning påminner om diesel framställd från råolja
- En fortsatt testning av katalysatorerna är dock nödvändig, i första hand långtidstestningar och testningar med trycksatt realgas, "riktig" syntesgas framställd från biomassa
- Det krävs effektiva reningssteg för att omvandla den produktgas som erhålls vid förgasning av biomassa till syntesgas, reningen kräver fortsatt utvecklingsarbete
- Fortsatta studier över halten tjärkomponenter i gasen är nödvändiga för att kunna utveckla nödvändiga reningssteg och -processer

# **ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER FÖR ASKA**





# KEMISKA STUDIER FÖR ANVÄNDNINGEN AV ASKA

---

*Sari Kilpimaa, Toivo Kuokkanen och Ulla Lassi*  
*Uleåborgs universitet, Institutionen för kemi, Finland*

## INLEDNING

Bioenergi används allt mera för att ersätta fossila bränslen. Det ökade trycket på elpriset och användning av olika miljöcertifikat har gjort att intresset för biomassabaserad värme- och kraftproduktion är större än någonsin tidigare. Det finns många fördelar med användningen av biomassa. Den är förnybar, den kan användas lokalt och den skapar jobb speciellt på gleset bebyggda områden. Bioaska uppkommer som en biprodukt vid förbränning och förgasning av biomassa. Förgasning är en ofullständig förbränningsprocess som omvandlar råmaterial som innehåller kolväten, såsom biomassa, till biogas. Biomassan omvandlas vid höga temperaturer (1200-1400 °C) till biosyngas som innehåller främst kolmonoxid CO och väte H<sub>2</sub>. Vid låga temperaturer (800-1000 °C) bildas produktgas som innehåller CO, H<sub>2</sub>, metan CH<sub>4</sub> och andra kolväten C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>. Biosyngas och produktgas kan efter rening användas i katalytiska processer för att syntetisera produkter såsom metanol och oljor. (Knoef, 2005)

Användningen av bioaska från förbränningsprocesser t.ex. som gödselämne inom jord- och skogsbruk har undersökts mycket. Askans fysikaliska, kemiska och lösningsegenskaper måste bestämmas med vederbörliga metoder före den kan användas. I lagstiftningen har bestämts de högsta tillåtna värdena för innehållet av tungmetaller i gödsel och jordförbättringsämnen. Egenskaperna hos bioaskor som bildats vid förgasning och förbränning kan variera, och därför är det möjligt att deras användningsområden också kan skilja sig från varandra.

I denna studie har vi jämfört egenskaperna hos bioaska som bildats vid förgasning och förbränning av finskt trä, och deras potentiella användningsområden. Vi undersökte fyra olika askprov: två askprov från

förgasning av biomassa och två askprov från förbränning av biomassa. Alla askprover hade producerats i norra Finland och råmaterialet i askproverna 1-3 var finskt trä. Askprov 1 är bioförgasningsaska och det har producerats av den av det finska företaget Entimos sålda förgasaren, som är en kombination av en motströms- och medströmsförgasare. Askprov 2 är var bioförgasningsaska och har erhållits från medströmsförgasare. Askprov 3 har bildats vid förbränningsprocessen i ett värmekraftverk. Askan från värmekraftverket är till stora delar bottenaska, men det finns litet flygaska med, eftersom båda askorna går till samma behållare i processen. Askprov 4 är flygaska från förbränningen i ett värmekraftverk som har en boiler med en bubblande fluidiserande bädd. Råmaterialet i aska 4 var huvudsakligen finskt trä (75 %) och torv (25 %).

## POTENTIELLA ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER

Ett antal studier har gjorts för att undersöka användningen av aska som bildats vid förbränning av biomassa, men användningsmetoderna kan inte nödvändigtvis direkt tillämpas på aska som bildats vid förgasning. Användningen av askan bör alltid bedömas från fall till fall. Askornas egenskaper beror bl.a. på det råmaterial som skall förgasas, förgasningstekniken och temperaturen.

Traditionellt har askor som bildats vid förbränning använts som gödselämne och som jordförbättringsämne. Askor som bildas vid förgasning tycks ha mindre goda gödslingsegenskaper än askor som bildats vid förbränning. Neutraliseringsvärdet beskriver askans förmåga att fungera som kalk och är en viktig indikator för användningspotentialen som jordförbättringsmedel på försurade områden. Neutraliseringsvärdet för kommersiell kalk tillverkad av SMA Saxo Mineral Ltd. är 38 %. Askans innehåll av kol borde vara under 10 % för att dess användning som jordförbättringsmedel skulle vara förnuftig. Detta villkor uppfylls vanligen inte vad gäller askor som bildats vid förgasning. Användningen av askor med högt innehåll av kol som gödsel är svårt, eftersom askor innehåller en inert kolmatris, som sänker halten av näringsämnen i askan. Kol är också hydrofobt vilket innebär att det reagerar dåligt med vatten och näringsämnena löses inte upp väl. (Nurmesniemi *et al.* 2005, Pels *et al.* 2005)

Aska som bildats vid vissa förgasningsprocesser påminner till sina egenskaper om aktivt kol, som används som bl.a. adsorbent. Adsorptionsegenskaperna för bioaska är vanligtvis inte lika bra som för aktivt kol, men askans egenskaper kan förbättras med olika metoder. Aktiveringen kan göras endera genom kemiska eller fysikaliska metoder. Å andra sidan bildas aska som biprodukt vid förgasnings- eller förbränningsprocesser,

varför priset på det är ganska lågt. Därför kan aska användas i större mängder för att ersätta aktivt kol.

Aska kan användas som bränsle ifall det innehåller stora mängder obrunnet kol. Användning av aska som bränsle är möjlig när kolinnehållet är större än 35 vikt-% eller när värmevärdet är större än 15 MJ/kg. Användningen av aska som bränsle löser inte helt de problem som slutförvaring av aska innebär, eftersom vid förbränningen återigen uppkommer aska som innehåller litet kol. Den aska med låg kolhalt som bildas påminner om den aska som traditionellt bildas vid förbränning. Ifrågakavande aska med låg kolhalt kan användas t.ex. som jordförbättringsmedel eller vid mark- och anläggningsarbeten (Pels *et al.* 2005)

## BESTÄMNING AV EGENSKAPER FÖR ASKOR

Askans fysikaliska, kemiska och lösningsegenskaper bör bestämmas före askan kan användas. pH och värden för elektrisk konduktivitet bestämdes genom att lösa aska i destillerat vatten med ett förhållande mellan vätska och fast ämne (L/S) på 10 (vikt/vikt). Bestämningen av torrinnehållet gjordes i enlighet med den europeiska standarden SFS-EN 12880 (SFS-EN, 2000a) och glödgningsförlusten (Loss On Ignition value, LOI) bestämdes enligt (LOI) standarden SFS-EN 12879 (SFS-EN, 2000b). Bestämning av det upplösta organiska kolet (Dissolved Organic Carbon, DOC) gjordes enligt standarden SFS-EN 1484 (SFS-EN, 1997). Det totala kolinnehållet (Total Carbon content, TC) bestämdes genom grundämnesanalys med användning av en Perkin Elmer CHNS analysator, för vilken bestämningstekniken grundar sig på bestämning av den mängd kolioxid som bildas vid förbränning av provet (Perkin-Elmer, 1991).

Bestämning av det neutraliserande värdet och reaktivitetsvärdet gjordes enligt standarderna SFS-EN 12945 (SFS-EN, 2002) och SFS-EN 13971 (SFS-EN, 2003). Den specifika ytan för askorna bestämdes med hjälp av adsorption-desorption av kväve (Micromeritics ASAP 2020). Samma utrustning användes för bestämning av porstorlek och porvolym för askorna.

De totala koncentrationerna av metaller bestämdes genom syranedbrytning (syrauppslutning) (en lösning av saltsyra HCl och salpetersyra HNO<sub>3</sub> i mikrovågsugn) och med en plasmaemissionspektrometer (ICP-OES, Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer). Koncentrationen av kvicksilver (Hg) bestämdes med atomabsorptionsspektrometri med kallånga.

TABELL 1. Fysikaliska och kemiska egenskaper för fyra bioaskor.

Egenskap	Enhet	Aska 1	Aska 2	Aska 3	Aska 4
pH		10,7	9,0	12,2	12,4
Konduktivitet	mS cm <sup>-1</sup>	1,03	0,455	3,9	7,87
Torrhalt	%	18,7	16,4	43,9	99,8
Glödgningsförlust	%	94,8	68,4	79,6	8,7
DOC	mg kg <sup>-1</sup>	649	565	570	0,84
Totalt kol	%	89,4	60,9	72,3	6,5
Neutraliseringsförmåga	% Ca	3,8	8,0	7,9	13,3
Reaktivitet	% Ca	1,6	6,6	6,6	10,0
Kalkningsförmåga	t t <sup>-1</sup>	10	4,8	4,8	2,9
Yta	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	100	15	206	29,8
Porstorlek	nm	3,91	15,9	2,64	3,18
Porvolym	cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	0,098	0,0564	0,1374	0,024

I tabell 1 finns resultaten från en bestämning av fysikaliska och kemiska egenskaper hos fyra olika askor. Alla askor är basiska. Konduktiviteten beskriver halten lösliga elektrolyter i askan. En hög konduktivitet betyder att en del av de lösliga metallerna kan förekomma som salt, exempelvis som hydroxider, sulfater eller oxider. Aska från förbränning uppvisar högre konduktivitetsvärden än aska från förgasning. I aska från förgasning ingår mycket fukt eftersom de uppvisar en låg halt torrsustans. Glödgningsförlusten beskriver andelen organiskt material i askan. DOC-värdet beskriver andelen lösligt kol i askan. Neutraliseringsförmåga och reaktivitet varierar mellan olika askor. På basen av neutraliseringsförmågan kan man beräkna kalkningsförmågan medan reaktiviteten används för att bedöma neutraliseringens snabbhet och effektivitet. Bästa kalkningsförmåga hade aska 4, det krävs endast 2,9 ton av askan för att ersätta 1 ton kommersiell kalk.

Specifik yta, porstorlek och porvolym är viktiga egenskaper när det gäller att bedöma nyttoanvändning av askan, exempelvis som adsorbentmaterial. Adsorptionsegenskaperna är normalt bättre för en aska med stor specifik yta. På basen av porstorleken kan man bedöma adsorptionsegenskaperna för en aska.

**TABELL 2. Totalhalten tungmetaller (mg kg<sup>-1</sup>; torr vikt tv.) i fyra undersökta askprov samt de högsta tillåtna tungmetallhalterna i aska som används som gödningsämne inom lantbruk och skogsbruk i Finland. (Jord- och skogsbruksministeriets förordning angående gödselpreparat, MMMa 12/2007)**

Grund- ämne	Enhet	Gränsvärde (gödnings- medel inom skogsbruk)	Gränsvärde (gödningsmedel inom lantbruk)	Aska 1	Aska 2	Aska 3	Aska 4
Cd	mg kg <sup>-1</sup> (t. v.)	15	1,5	< 0,3	6,3	1,6	5
Cu	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	700	600	15	130	21	83
Pb	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	150	100	< 3	25	10	27
Cr	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	300	300	7	210	9	82
Mo	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			< 1	15	< 1	6
Zn	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	4500	1500	85	7950	130	380
As	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	30	25	< 3	< 3	< 3	19
Co	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			< 1	8	1	8
V	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			< 2	7	3	210
Ni	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	150	100	3	110	10	36
Sb	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			< 4	< 4	< 4	< 4
Ba	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			120	880	250	860
S	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			180	3260	830	8420
Ca	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			12 800	78 400	46 300	96 300
Mg	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			2650	6670	8020	16 600
K	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			7110	9340	14 000	18 900
P	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)			1550	9560	4120	12 700
Hg	mg kg <sup>-1</sup> (t.v.)	1,0	1,0	< 0,040	0,040	< 0,040	0,56

I tabell 2 finns en sammanfattning över totalhalterna av tungmetaller i de fyra undersökta askorna. Koncentrationerna anges på basen av torrsvikt. Av tabell 2 framgår att askorna 1, 3 och 4 har en lägre totalhalt av tungmetaller än vad som anges i finländsk lagstiftning angående askor för användning inom skogsbruk. Dessa askor kunde användas som sådana som gödselmedel inom skogsbruk. För användning inom lantbruk är endast aska 1 direkt användbar eftersom halten kadmium är för hög hos aska 2, 3, och 4. Aska 2 har dessutom för höga halter nickel och zink för att direkt kunna användas inom lantbruk. I tabell 2 framgår också totalhalterna av vissa näringsämnen. Den höga kaliumhalten i alla undersökta askor anger att de skulle ha potential som jordförbättringsmedel.

## SAMMANDRAG

Avsikten med undersökningen var att jämföra egenskaperna för askor som bildats förbränning respektive förgasning. Av resultaten kan man bedöma att aska 3 och 4 kunde användas som gödningsmedel eftersom de innehåller höga halter näringsämnen. Halten av tungmetaller i de ifrågavarande askorna är också lägre än de maximala gränsvärden som anges i finländsk lagstiftning för askor som används som gödselmedel i skogsbruk.

Aska 4, från förbränning, är kraftigt basisk och dess kalkningsförmåga är god varför man kan anta att den fungerar bra som jordförbättringsmedel. Askan kunde alltså användas i stället för kalk.

Kolhalten är hög i de askor som bildats vid förgasningsprocesser samt aska 3 från en förbränningsprocess. Askorna 1 och 3 har dessutom en ganska stor specifik yta och de är porösa varför de kunde användas som absorbenter. Askorna 1-3 kunde också användas som bränslen tack vare deras höga kolhalt. I undersökningen bestämdes fysikaliska och kemiska egenskaper för fyra olika askor. Av resultaten kan man dra slutsatsen att egenskaperna varierar mycket för askor som bildats genom förgasning och förbränning, och att områdena för nyttoanvändning därför blir olika.

## KÄLLOR

- Jord- och skogsbruksministeriets förordning angående gödselpreparat, MMMa 12/2007. Finland
- Knoef, H.A.M., Handbook Biomass Gasification, 2005, BTG biomass technology group BV, The Netherlands, 378 s.
- Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., Perämäki, P. och Kuokkanen, T., 2005, The use of a sequential leaching procedure for heavy metal fractionation in green liquor dregs from a causticizing process at a pulp mill, *Chemosphere*, 61, 1475-1484.
- Pels, J.R., de Nie, D.S. och Kiel, J.H.A., Utilization of ashes from biomass combustion and gasification, 14th European Biomass Conference & Exhibition, 17-21 October 2005, 17 s.
- Perkin-Elmer, Users Manual PE 2400 Series II CHNS/O Analyzer, 1991, Perkin-Elmer Corp. Norwalk, Connecticut USA, pp. 1-6 (Chapter 1).
- SFS-EN, 1997, Europeiska standarden SFS-EN 1484, Vattenanalys. Riktlinjer för bestämning av totalinnehåller organiskt kol (TOC) och löst organiskt kol (DOC), Finlands miljöcentral, Helsingfors, 15 s.
- SFS-EN, 2000a, Europeiska standarden SFS-EN 12880, Karaktärisering av slam, bestämning av torrs substans och vatteninnehåll, Finlands standardiseringsförbund SFS, Finlands miljöcentral, Helsingfors, 7 s.
- SFS-EN, 2000b, Europeiska standarden SFS-EN 12879, Karaktärisering av slam, bestämning av glödgningsförlusten, Finlands standardiseringsförbund SFS, Finlands miljöcentral, Helsingfors 7 s.
- SFS-EN, 2002, Europeiska standarden SFS-EN 12945, Liming Materials, Determination of Neutralizing Value, Titrimetric Methods, Finlands standardiseringsförbund SFS, Kemiindustrin r.f., Helsingfors 10 s.
- SFS-EN, 2003, Europeiska standarden SFS-EN 13971, Carbonate liming materials, Determination of reactivity, Potentiometric titration method with hydrochloric acid, Finlands standardiseringsförbund SFS, Kemiindustrin r.f., Helsingfors 12 s.





# **TEKNISK-EKONOMISK UTVÄRDERING**



# BIOBRÄNSLEBASERAD SMÅSKALIG KRAFTVÄRME – EKONOMISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

---

*Joakim Lundgren*

*Luleå tekniska universitet, Sverige*

## BAKGRUND

Intresset för biobränslebaserad kraftvärme ökar i Europa och kommer att spela en viktig roll i omställningen till en mer hållbar energiförsörjning. En viktig aspekt vid etablering av nya energianläggningar är givetvis att investeringen är ekonomiskt försvarbar. Högre elpriser och gröna elcertifikat har skapat bättre förutsättningar för att producera kraftvärme även i mindre skala. De nordiska länderna lämpar sig utmärkt för sådana anläggningar bland annat på grund av att tillgången på biomassa är god. Idag produceras biobränslebaserad kraftvärme främst i vatten-ångsystem, s.k. Rankineprocesser, i större skala. Andra tekniker som Stirlingmotorn och förgasningssystem (förgasare med gasturbin eller gasmotor) är fortfarande under utveckling och kräver mer forskning och utveckling. En bild över dagens utvecklingsläge för några utvalda biobränslebaserade kraftvärmetekniker visas i tabell 1.

**TABELL 1. Utvecklingsläge för olika några utvalda biobränslebaserade kraftvärmetekniker. De tre översta är baserade på förgasningsteknik.**

Teknik	10-500 kW <sub>värme</sub>	0.5-5 MW <sub>värme</sub>	5-10 MW <sub>värme</sub>	>10 MW <sub>värme</sub>
Fastbäddsförgasning Gasmotor				
Fluidbäddsförgasning (FB) Gasmotor				
Gasturbin, gen- gasdriven				
Organisk Rankine Cykel (ORC)				
Ångcykel				
Sterlingmotor (pellets)				

Kommersiell

Demonstration

Pilot

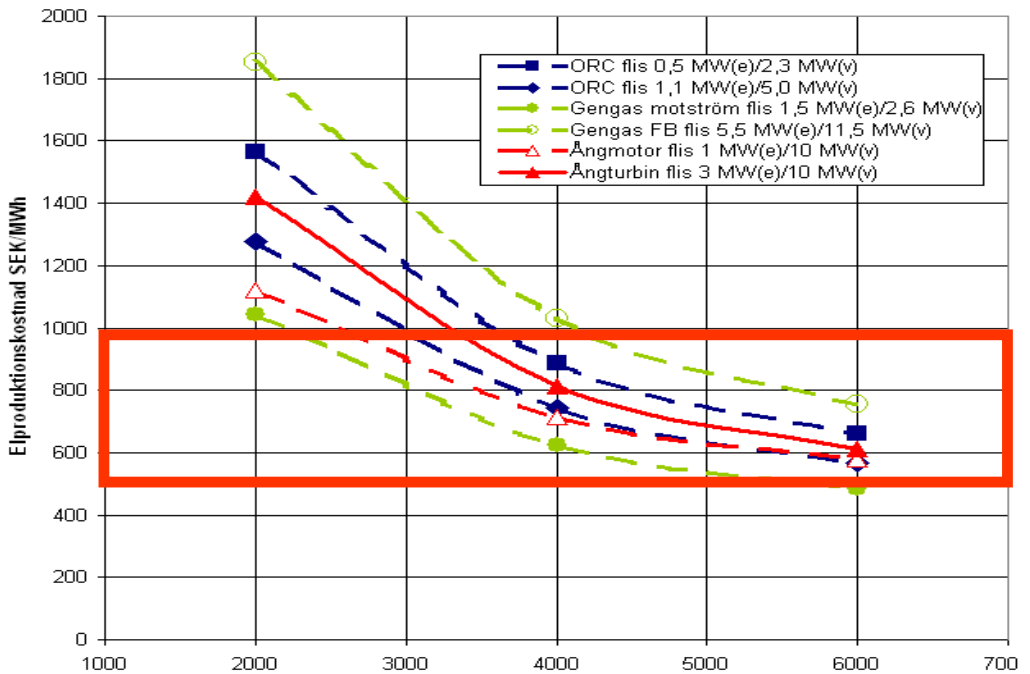
Ej gångbart

## VAD FÅR SMÅSKALIG BIOBRÄNSLEBASERAD ELPRODUKTION KOSTA?

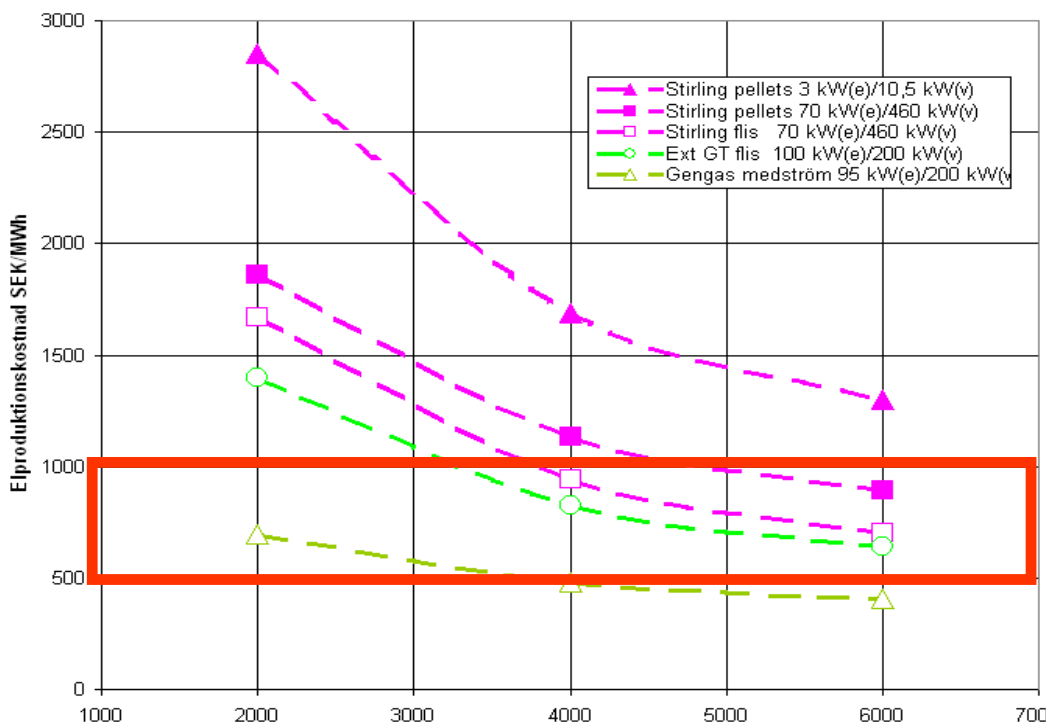
På elmarknaden råder marginalprissättning, vilket innebär att priset bestäms av marginalkostnaden för den sista producerande enheten som behövs för att tillgodose efterfrågan. Idag är det storskalig elproduktion från kol- och oljekondenskraftverk. Småskalig elproduktion, oavsett bränsle, konkurrerar med denna produktion. Priset på storskalig kraftproduktion uppgår för närvarande till mellan 350–550 kr per MWh<sub>el</sub> (ca 39–61 € / MWh<sub>el</sub>) inklusive kostnader för distribution. För fossilbränslebaserad el tillkommer kostnader för utsläpp av koldioxid, vilken utgör en stor kostnadspost för ett kolkraftverk. Priset på koldioxidutsläpp bestäms dock på en marknad och varierar över tiden. Under senaste åren har utsläppskostnaden varierat mellan nära 0 SEK upp till ca 280 SEK per MWh<sub>el</sub> (ca 0–31 € / MWh<sub>el</sub>). Av denna anledning är det svårt att exakt beräkna hur mycket småskalig biobränslebaserad elproduktion kan tillåtas få kosta. Men om vi antar att utsläppskostnaden kommer att ligga mellan 160 och 450 SEK

per  $MWh_{el}$  (ca 18–50 € /  $MWh_{el}$ ) de närmaste åren och produktions- och distributionskostnaderna består, innebär det att en småskalig elproduktionskostnad på 500–1000 SEK per  $MWh_{el}$  (ca 56–112 € /  $MWh_{el}$ ) skulle kunna motiveras.

I vissa länder, som exempelvis Sverige, är det idag svårt att nå lönsamhet. HighBio-projektet arbetar för att utveckla effektivare och driftsäkrare anläggningar vilket gör att förutsättningarna blir betydligt gynnsammare. Bland annat har den årliga drifttiden stor betydelse för elproduktionskostnaden och är direkt kopplad till kvaliteten på syntesgasen. Figuren nedan visar elproduktionskostnaden för ett antal olika tekniker och anläggningsstorlekar som funktion av den årliga drifttiden. Det röda fältet indikerar det troliga spannet vad elproduktionen får kosta enligt tidigare resonemang.



FIGUR 1. Elproduktionskostnad för olika bibränslebaserade tekniker för kraftvärmeanläggningar över  $500\text{ kW}_{el}$  som funktion av årlig drifttid.



**FIGUR 2.** Elproduktionskostnad för olika bibränslebaserade tekniker för kraftvärmeanläggningar under  $100 \text{ kW}_{\text{el}}$  som funktion av årlig drifttid.

Som figurerna antyder så är det mycket viktigt att anläggningen kan gå en stor del av ett år utan driftstörningar. För de flesta tekniker hamnar elproduktionskostnaden inom det godtagbara kostnadsspännat om den årliga utnyttningstiden överskrider 4000 timmar. Beräkningar för elproduktionskostnaderna för de förgasningskoncept som utvecklas inom HighBio-projektet pågår för närvarande (april 2011) och kommer att presenteras i projektets slutrapport.

Ett mycket lovande koncept för bibränslebaserad kraftvärme i mindre skala är externeldade gasturbiner (Ext GT i figur 2). En brännbar gas produceras via förgasning och efter ett gasreningsteg eldas gasen upp i en separat brännkammare. De heta avgaserna värmer, via en högtemperaturvärmeväxlare, upp ren och komprimerad luft till ca  $800\text{-}1000^\circ\text{C}$  som sedan driver en gasturbin för att generera elkraft. Ett stort driftproblem är dock beläggningbildningar på värmeväxlarytorna. Beläggningarna orsakar sämre värmeöverföring mellan gas och luft med en lägre elverkningsgrad och högre elproduktionskostnader som följd. Det föreligger därför stor

risk att anläggningarna blir ekonomiskt olönsamma, i synnerhet om dyr gasreningsutrustning måste installeras för att undvika onödiga driftstörningar. Beläggningarna orsakas av höga halter av alkalimetaller (framförallt natrium, kalium) i biobränsleaskan som följer med i avgaserna. Det skulle därför vara önskvärt att generera en betydligt renare gas, vilket kan åstadkommas med ett renare bränsle.

Inom HighBio-projektet har integration av en så kallad hetvattenextraktionsprocess i en externeldad gasturbinanläggning studerats. I extraktionsprocessen "tvättas" träflis (i detta fall björkflis) i vatten trycksatt till ca 8 bar. En del av hemicellulosan i träflisen extraheras, vilket gör att en fermenterbar sockerström för exempelvis produktion av bioetanol eller kemikalier erhålls. Kraftvärmeanläggningen skulle därför omvandlas till ett mindre bioraffinaderi som inte bara producerar värme och el utan också någon form av kemikalie. Det "tvättade" bränslet har visat sig innehålla betydligt lägre halter av alkalimetaller och har dessutom ett högre värmevärde. Med andra ord ett mycket bra bränsle för förbränning eller förgasning.

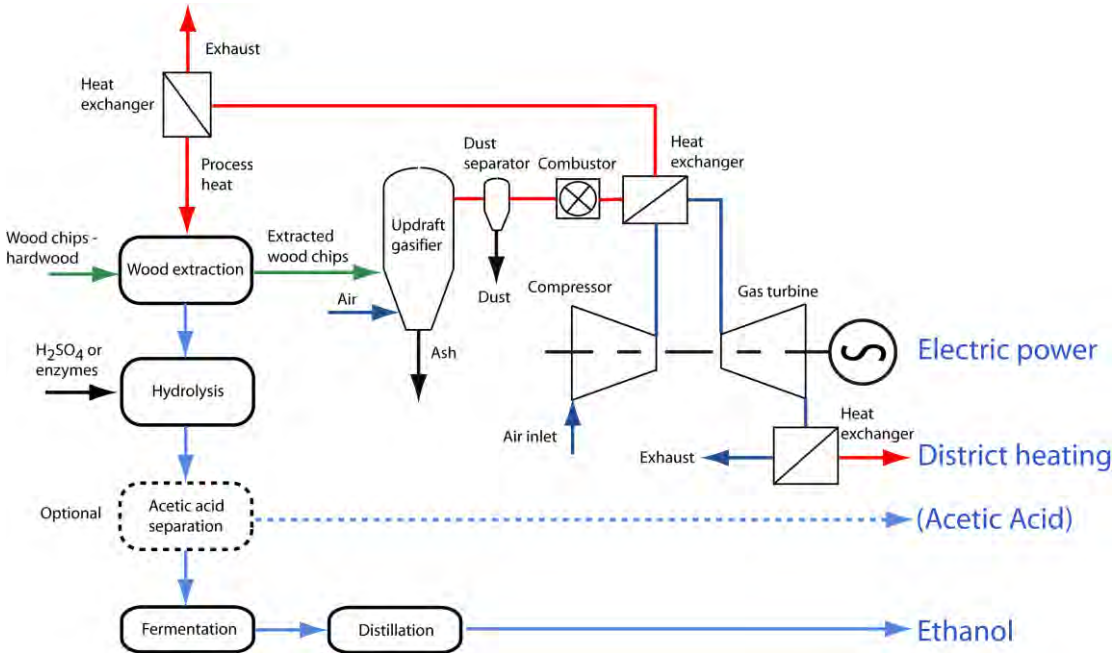
Figur 3 visar ett fotografi på björkflis före och efter extraktion.



**FIGUR 3.** Fotografi på björkflis före och efter extraktion.

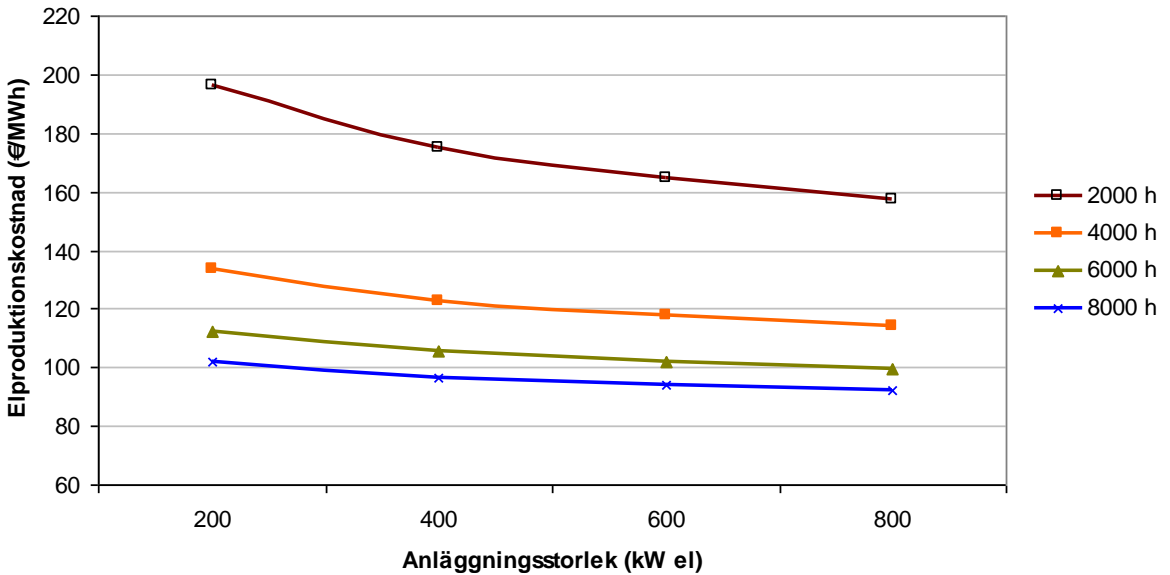
Figur 4 visar den tänkta processens energi- och materialströmmar. Det finns också en möjlighet att via en separationsprocess efter hydrolysstegget också producera ättiksyra.





FIGUR 4. Process för hetvattenextraktion integrerad i en externeldad gasturbin

Anläggningsstorleken och den årliga drifttiden har som tidigare nämnts stor inverkan på elproduktionskostnaden. En ekonomisk utvärdering för denna typ av integrerade anläggning visas i figur 5.



**FIGUR 5.** Elproduktionskostnad som funktion av anläggningsstorlek och årlig drifttid.

Resultatet visar att el kan produceras till en kostnad mellan 85 och 195 € per  $MWh_{el}$  (ca 770-1800 kr per  $MWh$ ) i storleksspannet 200-800  $kW_{el}$ . Den totala anläggningsekonomi kan dock förbättras genom att en fermenterbar sockerström också genereras. Kostnaden för generera en ström med 65 g xylos per liter har beräknats till mellan 0,4 och 4,2 € per kg xylos. Konceptet är intressant men kräver vidare utredning.

## INFORMATIONSBLAD FRÅN HIGHBIO-PROJEKTET

---

- INFO 1 Nytt projekt startar, HighBio - Interreg Nord (2008)
- INFO 2 Jyväskylä universitet, Karleby universitetscenter Chydenius, U-P Granö (2008)
- INFO 3 Projektet HighBio - Interreg Nord, U-P Granö (2008)
- INFO 4 Förädling av bioenergiråvaror, U-P Granö (2008)
- INFO 5 Mindre CHP anläggningar, U-P Granö (2008)
- INFO 6 Några använda förkortningar och termer, U-P Granö (2008)
- INFO 7 Förnyelsebar energi - Grön energi, U-P Granö (2008)
- INFO 8 Fossil gas och Gas från biomassa, U-P Granö (2008)
- INFO 9 Katalys och katalysatorer, U Lassi (2008)
- INFO 10 Provtagning av gaser, U Lassi (2008)
- INFO 11 Mätning av gasflöden, U Lassi (2008)
- INFO 12 Exempel på Logistik för biomassan, U-P Granö (2008)
- INFO 13 Utrustning för sönderdelning av biomassa, U-P Granö (2008)
- INFO 14 Eftertorkning av skogsflis för förgasning, U-P Granö (2008)
- INFO 15 CHP genom direkt förbränning av biomassa, U-P Granö (2008)
- INFO 16 Produktion av kraftvärme via förgasning av biomassa, J Lundgren (2008)
- INFO 17 Biobränslen från syntesgas, H Romar (2008)
- INFO 18 Kyoto-avtalet, A Rönnskog (2008)
- INFO 19 Utvecklingen av Fischer-Tropsch-syntesen, A Rönnskog (2009)
- INFO 20 Förgasning av biprodukter från skogen för tillverkning av drivmedel, O Öhrman (2009)
- INFO 21 HighBio forskning inom ETC i Piteå, H Hedman (2009)
- INFO 22 FoU vid avdelningen för energiteknik, LTU, J Lundgren (2009)
- INFO 23 Utsläpp av växthusgaser och deras inverkan på hälsan, H Snellman (2009)
- INFO 24 Forskningsmiljön vid Centria, Y Muilu (2009)
- INFO 25 Flisförbrukning vid gasbrännardift, Y Muilu (2009)

- INFO 26 Motoreffekt med trägas, Y Muilu (2009)
- INFO 27 Förädling genom värme - Pyrolysis, U-P Granö (2009)
- INFO 28 Fermentering av Bio-Syngas, U-P Granö (2009)
- INFO 29 Bestämning av totalhalten tjära i produktgas. Provtagning, K Pieni-  
niemi (2009)
- INFO 30 Bestämning av totalhalten tjära, K Pieniemi (2009)
- INFO 31 Uleåborgs universitet, Institutionen för kemi, A Heponiemi och S Kil-  
pimaa (2009)
- INFO 32 Framställning av bioetanol från avfallspotatis, T Kuokkanen och S  
Kilpimaa (2009)
- INFO 33 Ny förgasningsanläggning vid ETC, M Marklund (2009)
- INFO 34 CHEMPLANT -projektet, R Puskala (2009)
- INFO 35 Integrerad förädling av biomassa, U-P Granö (2009)
- INFO 36 Trä-förgasande vedpanna, U-P Granö (2009)
- INFO 37 En undersökning om nyttoanvändning av den aska som uppkommer  
vid förbränning av träpellets och flis vid värmecentraler i nordöstra  
Finland, M Kuokkanen och T Kuokkanen (2009)
- INFO 38 Användning av bioaska är en miljögärning, M Kuokkanen och T  
Kuokkanen (2009)
- INFO 39 Torrefiering av biobränsle, H Salman (2009)
- INFO 40 Bestämning av biologisk nedbrytbarhet i vatten, H Prokkola och T  
Kuokkanen (2009)
- INFO 41 Integrering av biobränsleförgasning i industriella processer, J Lund-  
gren (2009)
- INFO 42 En utlokaliserad CHP-förädling av biomassa, U-P Granö (2009)
- INFO 43 Målsättning: nyttoanvändning av bioaska genom användning av ke-  
miska metoder, S Kilpimaa, T Kuokkanen och U Lassi (2009)
- INFO 44 Exempel på tillverkare av utrustning för småskaliga CHP enheter,  
U-P Granö (2010)
- INFO 45 CHP alternativ för energikooperativ, U-P Granö (2010)
- INFO 46 Utveckling av Fischer-Tropsch syntes, H Romar och R Lahti (2010)
- INFO 47 Effektiv bränsleomvandling och askegenskaper vid entrained flow  
förgasning, M Stenberg (2010)
- INFO 48 Lagstiftning angående användningen av aska, S Kilpimaa, T Kuokka-  
nen ja U Lassi (2010)
- INFO 49 \*only in English\* Reactor design considerations for entrained flow  
biomass gasification, M Marklund (2010)
- INFO 50 Exempel på tillverkare av förgasare för biomassa, U-P Granö (2010)
- INFO 51 Biogas/ Biometan, H Petäistö och H Snellman (2010)
- INFO 52 Kraft, Y Muilu (2010)
- INFO 53 Förgasning av biomassa till bränsle, U-P Granö (2010)
- INFO 54 Biobaserade fordonsbränslen, H Romar (2010)
- INFO 55 Ändringsarbeten på forskningsutrustningen vid Centria, H Snellman  
(2010)
- INFO 56 Katalytisk konvertering av syntesgas till fordonsbränslen, R Lahti och  
H Romar (2010)

- INFO 57 \*only in English\* Pre-treatment of hardwood via hot water extraction, J Lundgren (2010)
- INFO 58 Karakterisering av katalysatorer, K Partanen och U Lassi (2010)
- INFO 59 Framställning av katalysatorer, K Partanen och U Lassi (2010)
- INFO 60 Rening av produktgas till syntesgas, H Romar (2010)
- INFO 61 Gasreningstekniker, O Öhrman (2010)
- INFO 62 Bestämning av bionedbrytbarhet i fast fas med OxiTop-metoden, H Prokkola, M Kuokkanen och T Kuokkanen (2010)
- INFO 63 Förbehandling av biobränsle (Malning), H. Salman (2010)
- INFO 64 Bestämning av värmevärdet med bombkalorimeter, I Jerkku, T Kuokkanen och U Lassi (2010)
- INFO 65 Matning av Biobränsle till trycksatt reaktor, H Salman och F Weiland (2010)
- INFO 66 Pneumatisk transport av biobränsle, F Weiland (2010)
- INFO 67 Bränslesammansättningens påverkan på förgasningsprocessen (del 1 termokemiska modellberäkningar) – effekter på slagg och beläggningens bildning, M Öhman (2010)
- INFO 68 Bränsleadditivs påverkan på förgasnings-processen (del 2 termokemiska modell-beräkningar) – effekter på slagg och beläggningens bildning, M Öhman (2010)
- INFO 69 Några använda förkortningar och termer, A Rönnskog (2010)
- INFO 70 Bestämning av partikelstorleksdistributionen i bioaska, S Kilpimaa, T Kuokkanen och U Lassi (2010)
- INFO 71 Avlägsnande av tjära från produktgas, R. Lahti, H. Romar (2010)
- INFO 72 Doseringsförsök i en skruvdoseringsmatare, F. Weiland (2010)
- INFO 73 Prioritering av bioenergiesurser, H. Snellman (2010)
- INFO 74 Invigning av unik försöksanläggning vid ETC, M Marklund (2010)
- INFO 75 Skogsrester och stubbar som bränsle vid slaggande förgasning av biomassa, A-C Johansson (2011)
- INFO 76 Installering av Stirling-motor för användning med produktgas, K Jarva och M Niskanen (2011)

## PUBLIKATIONER OCH RAPPORTER MED ANKNYTNING TILL HIGHBIO-PROJEKTET

---

- Eriksson, D., Weiland, F., Hedman, H., Stenberg, M., Öhrman, O., Lestander, T.A., Bergsten, U. and Öhman, M. (2011) Scots pine stump-root biomass: A possible large scale feed-stock for gasification. To be submitted to *Bioresource Technology*.
- Haapasaari, S. (2009), forskningsprojekt (Stora Enso Uleåborg), om ämnet "Användning av flockningskemikalier tillverkade av aska vid avlägsnande av fosfor från kommunalt avloppsvatten" ("Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa").
- Heponiemi, A., Rahikka, L., Lassi, U. and Kuokkanen T. (2009) Catalytic oxidation of industrial wastewaters - a comparison study using different analyzing methods, *Chemical Engineering Transactions Volume 17*.
- HIGHBIO –projekt (2009) EnePro konferenssi, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Häggström, C., Öhrman, O., Gebart, R., Hedlund, J., Catalytic synthesis of methanol from black liquor derived synthesis gas. 4th International DME Conference, Stockholm, 6-9 Sep. 2010.
- Jercku, I. (2010), forskningsprojekt. "Testning av Uleåborgs universitets nya bombkalorimeter" ("Pommikalorimetrisia tutkimuksia Oulun yliopiston kemian laitoksen uutta kalorimetriä testaten ja käyttäen").
- Jokinen, H. (2009), forskningsprojekt om ämnet "Användning av fuktig träbiomassa och med sämre kvalitet" ("Heikkolaatuisen ja kostean puubiomassan hyödyntäminen").
- Karhu, H. (2009) forskningsprojekt (EVO Kuusamo), om ämnet "Användning av flockningskemikalier tillverkade av aska vid avlägsnande av fosfor från kommunalt avloppsvatten" ("Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa").
- Karhu, H. Kandidatavhandling (2010) Kuitusavi – hyödynnettäväksi soveltuva paperiteollisuuden jätemateriaali, 31 s.

- Karvonen, L. (2009) forskningsprojekt (Karleby Kraft), om ämnet "Användning av flockningskemikalier tillverkade av aska vid avlägsnande av fosfor från kommunalt avloppsvatten" ("Tuhkasta valmistetun flokkauskemikaalin käyttö yhdyskuntavesien fosforinpoistossa").
- Karvonen, L., Kandidatavhandling (2009) Oulun alueen puu- ja turvepohjaiset tuhkat ja niiden hyötykäyttö, 34 s.
- Kilpimaa, S., Kuokkanen T. and Lassi U. (2009) Bio-ethanol production from waste potatoes, In: Proceedings of the EnePro Conference, 3.6.2009, Oulu, s. 21-23
- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. Bio-ethanol production from waste potatoes (2009) EnePro konferenssi, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. (2011) Physical and chemical properties of wood ash from burning and gasification processes. The Journal of Solid Waste technology and Management, 879-887.
- Kilpimaa, S., Kuokkanen, T. and Lassi, U. (2011) Chemical and leaching properties of wood ash from burning and gasification processes, submitted for publication in Chemical Speciation and Bioavailability.
- Kuokkanen, M. ja Kuokkanen, T. (2009) Puu- ja turvepellettien sekä hakkeen lämpökeskus- ja pienpoltossa syntyvien tuhkien hyötykäyttöön liittyvä tutkimusraportti, Oulun yliopisto, Report Series in Chemistry No. 74. 45 sivua.
- Kuokkanen, M., Kuokkanen, T., Nurmesniemi, H. and Pöykiö, R. (2009) Wood pellet ash – a potential forest fertilizer and soil conditioning agent (a case study), The Journal of Solid Waste Technology and Management, s. 659-667.
- Kuokkanen, M., Kuokkanen, T., Stoor, T., Niinimäki, J. and Pohjonen, V. (2009) Chemical Methods in the Development of Eco-Efficient Wood-based Pellet Production and Technology, Waste Management & Research, Volume 27, s.561-571
- Kuokkanen, M., Pöykiö, R., Kuokkanen, T. and Nurmesniemi, H. (2009) Wood ash – a potential forest fertilizer, In: Proceedings of the EnePro Conference, 3.6.2009, Oulu, s. 89-93.
- Kuokkanen, M., Prokkola, H., Larkomaa, J., Stoor, T., Siltaloppi L. and Kuokkanen T.: Specific Staining and Optical Microscopy – a New Method for Characterization of Starch-containing Wood Pellets. - Special Issue of Research Journal of Chemistry and Environment, Proceedings of ICCE-2009, 2010, 311-317.
- Kuokkanen, T., Kaakinen, J., Kuokkanen, M., Prokkola, H. and Lassi, U. (2009) Jättemateriaalien hyödyntämiseen liittyviä kemiallisia tutkimuksia, EnePro Conference, Advancing Research in the Energy Field at the University of Oulu, 3.6.2009, Oulu
- Kuokkanen, V. (2010) forskningsprojekt "Forskningsrapport om vissa granulerade askors kemiska egenskaper och om försök att använda dessa som adsorbentmaterial vid rening av avfallsvatten (på finska)" ("Tutkimusraportti eräiden rakeistettujen tuhkien kemiallisista ominaisuuksista ja kokeiluista adsorbenttimateriaalina jätevesien puhdistuksessa").
- Lahti, R. Synteesikaasun katalyyttinen konvertointi Fischer-Tropsch synteesin avulla liikennepolttoaineiksi, pro gradu –avhandling (2010).

- Lassi, U., Granö, U-P., Tynjälä, P., Kuokkanen, T. and Muilu, Y. (2009) Refining of new products and raw materials by gasification of biomass, In: Proceedings of the EnePro Conference, 3.6.2009, Oulu, s. 32-35.
- Marklund, M. and Engström F. (2010) Water spray characterization of a coaxial air-assisted swirling atomizer at sonic conditions. *Atomization and Sprays* 20(11):955–963.
- Marklund, M., Hedman, H., Weiland, F. And Gebart, R. (2011) Pilot gasification plant for syngas generation from forest residues. Proc. Nordic Wood Biorefinery Conference, March 22-24 2011, Stockholm, Sweden.
- Muilu, Y., Pieniniemi, K., Granö, U-P. and Lassi, U. (2010) A novel approach to biomass gasification in a downdraft gasifier. In: 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May, 2010, Lyon, France, p. 688-692.
- Partanen, K., Tiainen, M. and Lassi, U. (2011) Catalysts used in conversion of 5-hydroxymethylfurfural into 2,5-dimethylfuran. submitted to 10th EuropaC-at conference, Glasgow, 2011.
- Pieniniemi, K. and Lassi, U. (2010) Gas emission measurements with a FTIR gas analyzer – verification of the analysis method. . In: Proceedings of SkyPro Conference, Clean air research at the University of Oulu, 3.6.2010, Oulu, Finland, p. 117-121.
- Romar, H., Lahti, R., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Co and Fe catalysed Fischer-Tropsch synthesis in biofuel production, submitted Topics in Catalysis.
- Romar, H., Lahti, R., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Co and Fe catalysed Fischer-Tropsch synthesis in biofuel production, In: Proceedings of 13th Nordic Symposium on Catalysis, Extended abstracts, Helsingör, Denmark, August 29-31, 2010.
- Romar, H., Pieniniemi, K., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2010) Sampling and determination of tars in biomass-derived product gas. In: Proceedings of SkyPro Conference, Clean air research at the University of Oulu, 3.6.2010, Oulu, Finland, p. 122-125.
- Romar, H., Tynjälä, P. and Lassi, U. (2011) Effects of early reactions on the Fischer-Tropsch activity and stability over Ru- and Re-enhanced cobalt catalysts, submitted to 10th EuropaCat conference, Glasgow, 2011.
- Runtti, H. (2009), forskningsprojekt om ämnet " Utnyttjande av biprodukter från industrin vid behandling av vatten" ( i projektet undersöks askslam som en typ av adsorbent) ("Teollisten sivutuotteiden hyödyntäminen vedenkäsittelyssä" (projektissa mukana tuhkaliete eräänä adsorbenttina)).
- Shu, T. (2009), Co catalysts in Fischer-Tropsch synthesis, lärdomsprov.
- Takkinen, T. Esitutkimus jakeistuksen vaikutuksesta Oulun biotuhkien ominaisuuksiin, pro gradu-avhandling, färdigställs 2011 ("Förundersökning av effekterna av fraktionering på egenskaperna hos bioaskor från Uleåborg").
- Tolonen, E. (2010), forskningsprojekt "Sekventiell extrahering i fem steg av aska från Karleby Kraft" ("Viisivaiheinen sekventiaalinen uutto Kokkolan Voiman tuhkalle").



- Tuuttila, T. Biomassan kaasutuksessa muodostuvan synteetikaasun katalyyttinen konvertointi kevyiksi olefiineiksi ja edelleen muoveiksi, raportti (2010). ("Katalytisk konvertering av syntesgas från förbränning av biomassa till lätta olefiner och vidare till plaster", rapport på finska (2010).
- Öhrman, O., Häggström, C., Wiinikka, H., Hedlund, J., Gebart, R. Analysis of trace components in synthesis gas generated by black liquor gasification. Submitted to Fuel, 2010.
- Öhrman, O., Johansson, A-C., Lindblom, M., H<sub>2</sub>S removal with short time contactors in a pressurized black liquor gasification plant. International Chemical Recovery Conference, Williamsburg, USA, March 29-April 1, 2010.

## TACK TILL HIGHBIO-PROJEKTETS FINANSIÄRER

---

EU:s regionala utvecklingsfond, Interreg IV A Nord  
Lapplands förbund & Lapplands länsstyrelse, Finland  
Länsstyrelsen i Norrbottens län, Sverige  
Norrbottens Läns landsting, Sverige  
Norrbottens forskningsråd, Sverige  
Luleå Tekniska Universitet, Sverige  
Energitekniskt Centrum, Sverige

Garantiföreningen för Chydenius-Institutet, Finland  
(projektpublicering för HighBio)

# Förgasning av biomassa till värme, elektricitet och biobränslen

Publikation för HighBio-projektet

I HighBio-projektet, som verkat under tiden juni 2008 till juni 2011, har producerats ny kunskap om förgasning av biomassa, användning av den produktgas som fås vid förgasningen t.ex. för tillverkning av biobränslen samt användningsmöjligheter för aska från förgasning av biomassa, inom ramen för en decentraliserad energiproduktion. I småskaliga CHP (Combined Heat and Power) –enheter kan man samtidigt producera elektricitet och värme genom att förgasa trä och förbränna den gas som bildas. Genom förgasning kan man producera partikelfri och energiintensiv gas, varför teknologin samtidigt är ett svar på de allt mer restriktiva miljökrav som Europeiska unionen ställer. Många små- och medelstora företag som verkar i norra Finland och norra Sverige har gjort pionjärbete vad gäller utveckling av teknologin för förgasning av trä. I detta utvecklingsarbete har också HighBio-projektet tillsammans med sina forskare aktivt deltagit.

Projektet har genomförts av samarbetspartners från både Finland och Sverige. Finska partners har varit Jyväskyläs universitet, Karleby universitetscenter Chydenius (Lead Partner), Uleåborgs universitet och Mellersta Österbottens yrkeshögskola, Centria i Ylivieska. Från Sverige har Luleå tekniska universitet och Energitekniskt Centrum i Piteå deltagit. Projektets huvudfinansierare har varit EU:s regionala utvecklingsfond, Interreg IV A Nord.

ISBN 978-951-39-4315-8



**INTERREG  
IV | A | NORD**

Gränslösa möjligheter



EUROPEISKA UNIONEN  
Europeiska regionala  
utvecklingsfonden