

BIO- OCH PRODUKTGAS I MASSA- OCH PAPPERSBRUK

RAPPORT 2017:426



RESURS- OCH KLIMATEFFEKTIV
SKOGSINDUSTRI



Bio- och produktgas i massa- och pappersbruk

Framställning och användning

ANDERS NORDENÖ OCH CHRISTER GUSTAVSSON

ISBN 978-91-7673-426-1 | © Energiforsk september 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Rådet Skogsindustriell Energi på Energiforsk startade under hösten 2015 ett industriellt forskningsprogram med namnet Resurs- och Klimateffektiv Skogsindustri. Programmet syftar till att hitta lösningar på massa- och pappersindustrins utmaningar inom energiområdet. Forskning inom programmet ska "ta fasta på handfasta projekt kring de problem som upplevs på massa- och pappersbruken".

Det är intressant för industrin i allmänhet och pappers- och massaindustrin i synnerhet att undersöka möjligheter till fossilfri produktion. Denna studie har undersökt möjligheten att använda gas som produceras av restströmmar i pappers- eller massabruk för att ersätta hela eller delar av användningen av fossil energi på bruken.

Studien har genom programmet finansierats av:

Billerud Korsnäs Frövi
Billerud Korsnäs Gävle
Billerud Korsnäs Gruvön
Billerud Korsnäs Karlsborg
Billerud Korsnäs Skärblacka
Munksjö Aspa
Rottneros Vallvik
SCA Munksund
SCA Obbola
SCA Östrand
Södra Cell Mönsterås
Södra Cell Mörrum
Södra Cell Värö
Valmet

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Egenproducerad gas från anaerob rötning eller termisk förgasning baserad på organiska restprodukter har tekniska förutsättningar att kunna ersätta stora delar av fossilbränsleanvändningen i svensk massa- och pappersindustri.

Denna rapport syftar till att utreda möjligheterna för att med hjälp av anaerob rötning och/eller termisk förgasning producera förnybara gaser som kan ersätta användningen av fossila bränslen i svensk massa- och pappersindustri. Möjlig produktionskapacitet liksom ett antal frågeställningar rörande tekniska och ekonomiska förutsättningar har behandlats.

I arbetet har förutsättningarna för gasproduktion och gasanvändning utretts för fyra olika bruk som tillsammans kan anses vara relevanta för stora delar av den svenska massa- och pappersindustrin.

Analysen visar att de tekniska förutsättningarna generellt sett är goda för såväl framställning som användning av egengenererad gas. I några fall kan biogas framställd genom rötning av bio- och fiberslam ensamt täcka stora delar av den fossila bränsleförbrukningen och vara en relevant teknisk lösning, i synnerhet då förbrukningen är intermitterant och gas behöver lagras. I andra fall kan termisk förgasning vara en relevant teknik för komplettering/ersättning för biogas.

Möjlig biogasproduktion varierar mellan 5-20 GWh/år för de undersökta bruken. För de fall termisk förgasning setts som en lämplig teknik så har det rört sig om c:a 5 MW gaseffekt. Ett flertal leverantörer av förgasningsutrustning finns för denna skala. Tidigare genomgångar av driftserfarenheter visar att system med enstegsförgasare utan avancerad gasrening kan uppnå hög driftssäkerhet men att driftsproblem inte är ovanliga under en inledande period, i synnerhet då nya förgasningskoncept tillämpas.

Den direkta lönsamheten för att ersätta fossila bränslen med gas är generellt sett svag i nuläget. Till stor del beroende på låga priser på fossila bränslen och utsläppsrätter samt låga skatter för industriell användning av fossila bränslen. Ersättning av fossila bränslen kan dock vara intressant av andra orsaker än ren kostnadsbesparing, och andra värden förknippade med fossilfri produktion såsom goodwill kan motivera fortsatt arbete med projekt syftande till gasproduktion av organiska restprodukter.

Summary

On-site generated gas by means of anaerobic digestion or thermal gasification of side streams and other biomass can technically replace significant parts of the fossil fuel consumption in the Swedish pulp- and paper industry.

This report aims to examine the feasibility for exchange of fossil fuels by renewable energy gases produced by anaerobic digestion and/or thermal gasification. Potential production capacities as well as a number of technical and economic aspects have been assessed.

In the study, the potential for gas production and gas consumption has been analyzed for four different mills that can be considered representative for large parts of the Swedish pulp- and paper industry.

The results of the analysis show that the technical conditions for renewable gas production and utilization are favorable. In some cases biogas from anaerobic digestion of bio- and fiber sludge can cover large parts of the gas demand and represent a viable technical solution. Especially in those cases when gas consumption is intermittent and gas storage is required. In other cases, thermal gasification can represent a viable technology in addition to/instead of biogas.

Potential biogas production varies between 5-20 GWh/a for the examined mills. In those cases where thermal gasification has been deemed as a relevant technology, the gas capacity is in the region of 5 MW. A number of suppliers are available for this scale of gasifiers. Previous assessment of operational experiences has concluded that high availability can be achieved with one-stage gasifiers without advanced gas cleaning, but that initial operational problems can occur, especially when novel gasifier concepts are applied.

The direct profitability for fossil fuel exchange by on-site generated gas is generally weak at present. Mainly due to low prices for fossil fuels and emission allowances as well as low taxes for industrial usage of fossil fuels. However, replacement of fossil fuels may be interesting for reasons other than cost savings alone, and other values associated with fossil-free production such as goodwill can motivate continued work on gas production from organic side streams.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Omfattning	8
1.3	Genomförande	9
2	Teknisk bakgrund	10
2.1	Termisk förgasning	10
2.2	Anaerob rötning	14
2.2.1	Biogasens utveckling	14
2.2.2	Biogasprocessen	15
2.2.3	Optimering av biogasprocessen	16
2.2.4	Biogasdefinitionen	17
2.2.5	Biogas inom massa- och pappersindustrin	17
2.2.6	Lämpliga biogasanläggningar för massa- och pappersindustrin	18
2.2.7	Uppgraderingsanläggningar för råbiogas till fordonsgas	20
2.2.8	Investeringskostnader för biogasanläggning	21
3	Teori och Metod	22
3.1	Termisk förgasning	22
3.2	Anaerob rötning	26
3.2.1	Biogas i massa- och pappersbranschen	26
3.2.2	Möjliga substrat	26
3.2.3	VS-halt i bio- och fiberslam	26
3.2.4	Gaspotential i bio- och fiberslam	26
3.2.5	Anläggningsval	27
3.2.6	Anläggningsdesign	27
3.2.7	Gassammansättning	28
4	Exempelbruk	29
4.1	Bruk A	29
4.1.1	Tillgängliga sidoströmmar	29
4.1.2	Bränsleanvändning	29
4.2	Bruk B	30
4.2.1	Tillgängliga sidoströmmar	30
4.2.2	Bränsleanvändning	30
4.3	Bruk C	30
4.3.1	Tillgängliga sidoströmmar	31
4.3.2	Bränsleanvändning	31
4.4	Bruk D	31
4.4.1	Tillgängliga sidoströmmar	31
4.4.2	Bränsleanvändning	32

5	Resultat	33
5.1	Gasernas renhet	33
5.1.1	Termisk förgasning	33
5.1.2	Anaerob rötning	34
5.2	Gas som bränsle i olika bruksapplikationer	35
5.2.1	Gasanvändning i mesaugn	36
5.2.2	Gasanvändning i torkkåpor	37
5.2.3	Last- och startbrännare	37
5.2.4	Gasdestruktion och fackla	38
5.2.5	Krympugnar/-ramar samt IR-torkar	38
5.2.6	Fordonsdrift	38
5.3	Påverkan på brukets energibalans och barkpanna	39
5.4	Marknaden för biogas och naturgas	40
5.4.1	Produktion och försäljning av biogas	40
5.4.2	Fordonsmarknaden för biogas	41
5.4.3	Framtida biogasmarknaden	42
5.4.4	Naturgasmarknaden	42
5.4.5	Naturgasnätet	44
5.4.6	Import av flytande naturgas	45
5.5	Lagring	45
5.5.1	Lagring av produktgas från termisk förgasning	45
5.5.2	Lagring av metangas	45
5.6	Teknisk och ekonomisk potential för gasanvändning på bruken	46
5.6.1	Bruk A	47
5.6.2	Bruk B	48
5.6.3	Bruk C	49
5.6.4	Bruk D	50
5.7	Driftserfarenheter	50
6	Diskussion	52
7	Slutsatser	53
	Nomenklatur	54
	Referenser	56

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Massa- och pappersindustrin är en stor konsument och producent av energi. Genom åren har specifik energiförbrukning sänkts och specifik energiproduktion höjts avsevärt genom olika åtgärder. Arbetet är ständigt pågående då konkurrensen från andra länder och även från andra produkter kräver detta.

Samtidigt med dessa energieffektiviseringar har även kraven på ett hållbart och cirkulärt samhälle inneburit att industrin fått se över alla sina restprodukter för att minimera dessa och även hitta nya tillämpningsområden för dessa.

Att tillverka egna energigas inom massa- och pappersindustrin är inget nytt, men ny teknik, ökad miljöhänsyn och skattesubventioner kan göra att både gamla och nya tekniker kan bli intressanta att utnyttja.

1.2 OMFATTNING

Föreliggande rapport behandlar nyttiggörande av organiska restprodukter (utlysning 2016-2). Mera specifikt omfattar rapporten produktion och användning av metan och brämningsgas (produktgas) inom massa- och pappersindustrin. Katalytisk omvandling av syntesgas till metan för bruksintern användning behandlas inte då detta inte har någon ekonomisk relevans. Men möjligheten att producera mera avancerade biobränslen, t ex metan eller Fischer-Tropsch diesel, för avsalu diskuteras övergripande.

Ett antal specifika frågeställningar såsom specificerade i utlysningen avhandlas:

1. Gasernas renhet
Är gasens renhet (ouppgraderad rötgas eller förgasningsgas) god nog för att kunna användas i brukets olika applikationer? På vilket sätt skulle en sådan användning påverka brukets massbalanser?
2. Produktionskapacitet
Hur mycket biogas skulle ett bruk kunna framställa genom rötning av avfallsströmmar och förgasning av olika biprodukter? Hur förhåller sig dessa mängder till brukens behov av energi för t.ex. torkning där gasol idag används av många bruk?
3. Marknad
Hur mycket biogas finns att tillgå på den svenska marknaden och hur mycket kan man förvänta sig att finna inom fem år? Om den bruksinterna produktionen inte räcker för det egna bruket – går det då att köpa resterande mängder?
4. Lagring
Hur lagrar man gas bäst på bruket? – i trycksatt klocka eller i kondenserad form? Vilka är för- och nackdelarna och hur påverkar valet möjligheterna och kostnadseffektiviteten i att också köpa in biogas från extern tillverkare?

5. Driftserfarenheter

Vad finns det för driftserfarenheter av moderna förgasningsanläggningar för biomassa där syntesgasen används för värmningsändamål.

6. Ekonomi

Ekonomiska konsekvenser kopplade till teknikval, dimensionering och applikation.

1.3 GENOMFÖRANDE

Uppdraget har genomförts baserat på litteraturdata samt data från ett antal svenska massa- och pappersbruk.

Potentialen för både gasproduktion och gasanvändning skiljer sig åt väsentligt mellan olika typer av bruk. De bruk som studerats i denna rapport är av olika typ för att illustrera dessa olikheter.

Som underlag för analys av produktionsförmåga och gasanvändning för dessa exempelbruk har uppgifter från referensbruken samlats in.

För de olika exempelbruken har möjlig gasproduktion utifrån tillgängliga biströmmar beräknats. Nuvarande och ev. framtida intern gasanvändning har kartlagts och analyserats.

2 Teknisk bakgrund

Processer för framställning av gasformiga bränslen kan delas upp i två huvudgrupper:

1. Termisk förgasning
Vid termisk förgasning omvandlas biomassan till gasformiga komponenter under inverkan av hög temperatur. Den höga temperaturen kan åstadkommas genom partiell förbränning av biomassan eller genom att tillföra extern värme till förgasningsreaktorn (alloterm förgasning).
2. Anaerob rötning
Anaerob rötning innebär att organiskt material omvandlas i syrefri miljö, anaerobt, med hjälp av bakterier till en gas som innehåller främst metan och koldioxid.

En fördjupad beskrivning av de två teknikområdena och tidigare forskning inom området ges nedan.

Då begreppet biogas är något oklar och ibland används för såväl rågas som uppgraderad gas så benämns i fortsättningen ouppgraderad biogas som råbiogas.

2.1 TERMISK FÖRGASNING

Förgasning är en omvandling av ett kolhaltigt fast eller flytande bränsle till en brännbar gas, idealt bestående av kolmonoxid och vätgas. Termisk förgasning av biomassa till gas sker enligt följande processteg:

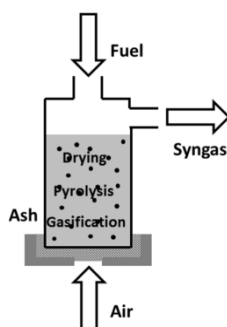
1. Torkning
Kvarvarande vatten efter torkning drivs av och biomassans temperatur stiger. Då fukthalten understiger 10% börjar avdrivning av vedråvarans innehåll av flyktiga extraktivämnen att accelerera (Granström 2005). Den viktsandel som i denna fas lämnar vedråvaran är dock mycket liten.
2. Avdrivning av flyktiga komponenter och termisk sönderdelning
Då temperaturen stiger upp mot 200°C börjar vedråvaran sönderfalla och de flyktiga komponenter som bildas avgår från den fasta återstoden (träkol). Denna process är mest intensiv i temperaturintervallet 300-450°C och är i huvudsak avslutad vid 550°C. Då denna fas är avslutad har omkring 75-85 vikt% av vedråvaran drivits av beroende på använt bränsle.
3. Reformering av flyktiga komponenter
De flyktiga komponenter som avdrivs i steg 1 & 2 reagerar i stor utsträckning vidare i gasfas till permanenta gaser. En viss mängd tjära och sot bildas.
4. Förgasning av träkol
Den fasta återstoden efter steg 2 kan förgasas genom reaktioner med syre eller vattenånga.

För ytterligare information om termisk förgasning och de olika delstegen i denna process, se exempelvis (Higman & van der Burgt 2008; Heyne et al. 2013; Larsson 2014).

För förgasning av biomassa finns ett stort antal olika förgasningsprocesser med olika grad av kommersiell mognad. Ett flertal förgasartyper som kan anses relevanta för de råvaror och den skala som behandlas i denna studie beskrivs övergripande nedan. För ytterligare beskrivning, se exempelvis (Held 2011).

1. Fastbädd motströmsförgasare

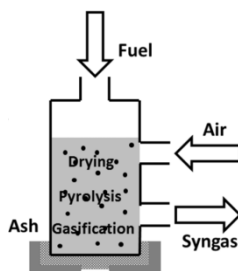
I en motströmsförgasare leds biomassa och förgasningsmediet i motström. Detta arrangemang innebär att produktgasen kommer att innehålla en hög halt pyrolysisprodukter (tjära). Förgasartypen lämpar sig bäst för ett bränsle som bildar en genomsläpplig bädd. För en kapacitet överstigande några MW används vanligen flera parallella förgasare.



Figur 1: Principiell funktion för motströmsförgasare (Nilsson et al. 2016)

2. Fastbädd medströmsförgasare

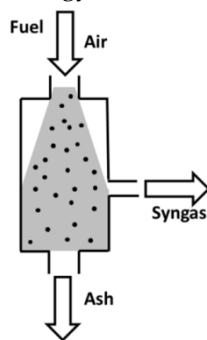
I en medströmsförgasare så leds pyrolysgaserna genom reaktorns högtemperaturzon och därmed omvandlas mera av tjäran till permanenta gaser. På samma sätt som för motströmsförgasare gynnas reaktortypen av en viss genomsläpplighet hos det använda bränslet, vilket gör att slam etc. inte lämpar sig för denna förgasartyp. Även för denna typ krävs vanligen flera reaktorer ifall effekten överstiger några MW



Figur 2 Principiell funktion för medströmsförgasare (Nilsson et al. 2016)

3. Luftblåst suspensionsförgasare

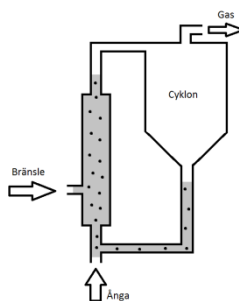
I en suspensionsförgasare blandas förgasningsmediet med biomassan och matas in i förgasningsreaktorn. Tekniken kräver ett bränsle med liten och enhetlig partikelstorlek. Suspensionsförgasare finns tillgängliga i mycket stor skala. I mindre storlekar finns en variant av suspensionsförgasare som utnyttjar en cyklonreaktor och som saluförs av det svenska bolaget Meva Energy AB.



Figur 3 Principiell funktion för suspensionsförgasare (Nilsson et al. 2016)

4. Luftblåst FB förgasning

I en luftblåst FB (Fluidiserad Bädd) förgasare fluidiserar reaktorn med en understökiometrisk mängd luft på så sätt att den värme som utvecklas vid den ofullständiga förbränningen upprätthåller temperaturen i reaktorn och möjliggör pyrolys- och förgasningsreaktionerna.



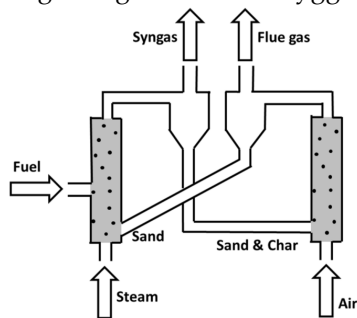
Figur 4 Principiell funktion för FB förgasare (Niklasson 2013)

5. Kommunicerande bädd-förgasning

I en kommuniserande bäddförgasare sker avdrivning av flyktiga komponenter, viss förgasning av kolåterstod samt (ofullständig) reformering av pyrolysisprodukter i en fluidiserad bäddreaktor. Förbränning av kvarvarande kolåterstod sker i en FB reaktor som är kopplad till förgasningsreaktorn. Bäddmaterial cirkulerar mellan dessa två reaktorer. I förbränningsreaktorn värms bäddmaterialet upp och i förgasningsreaktorn kyls det av.

En kommuniserande bäddförgasare kan principiellt byggas genom att koppla en förgasningsreaktor till en befintlig FB panna. Produktion av bränningsgas för torkningsändamål i ett integrerat pappersbruk med hjälp av en sådan förgasare kopplad till BFB (Bubblande Fluidiserande Bädd) panna har studerats (Gustavsson & Nilsson 2014).

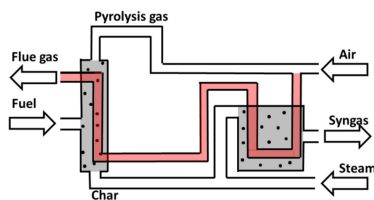
I en annan studie av kommuniserande bäddförgasning integrerad med befintlig BFB panna studerades möjligheterna till drivmedelsproduktion (Gustavsson & Hulteberg 2016). Resultaten från denna studie visar att produktionskapaciteten av gas vid låg- och medellast på pannan är betydande och kan uppgå till samma storleksordning som pannans ångkapacitet. Vid maxlast på pannan kan ingen förgasning ske utan ombyggnad av befintlig panna.



Figur 5 Principiell funktion för kommuniserande bäddförgasare (Nilsson et al. 2016)

6. Tvåstegsförgasning

En variant av förgasning som sker i två steg utvecklas av det svenska företaget Cortus. I denna förgasartyp genomförs i ett första steg pyrolysning av biomassan. Biomassan delas därvid upp i en gasformig fraktion och en fast återstod. Den fasta återstoden med högt kolinnehåll förgasas sedan med vattenånga i en suspensionsförgasare som värms upp genom förbränning av pyrolysgaserna från det första steget.



Figur 6 Principiell funktion för Cortus tvåstegsförgasare (Nilsson et al. 2016)

Syrgasblåsta förgasare av FB eller suspensionstyp har inte beaktats i denna studie då dessa kräver inköpt syrgas eller luftsepareringsanläggning. Den kostnad och komplexitet som detta medför gör att sådan teknik är mindre aktuell för produktion av bränningsgas och/eller drivmedel i den skala som medges då en skogsindustri ska utnyttja restprodukter för gasproduktion eller tillhandahålla gas för egen användning. Inte heller plasmaförgasning har beaktats.

Termisk förgasning av biomassa har under lång tid varit ett forskningsområde med hög aktivitet och ett stort antal integrationsstudier har genomförts av förgasning för olika syften. Många tidigare studier har fokuserat på syntesgasproduktion för vidare förädling mot drivmedel eller kemikalier, exempelvis (Güell et al. 2011) och även sådana processers integrering med massa- och pappersindustrin har studerats (Tunå et al. 2012; Isaksson 2015). Flera studier har också fokuserat på huvudinriktningen för denna rapport, d.v.s. bränningsgasproduktion och/eller metanproduktion för användning i skogsindustrin.

Integrering av förgasning med massa och pappersbruk för produktion av bränngas och torkning med hjälp av påblåsningstorkning har studerats (Gustavsson & Nilsson 2014). I denna studie analyserades kommuniserande fluidiserad bädd (FB)-förgasning med varm/kall gasrening samt förbränning i gasbrännare/gasturbin och värmeåtervinning med/utan värmepump. Alla de undersökta kombinationerna medförde minskad energiförbrukning, men för flertalet också en minskad elproduktion. Förgasning följt av kall gasrening och förbränning av gasen i en gasturbin och användning av rökgaserna för papperstorkning visade sig ge möjlighet att minska energiförbrukningen med bibehållen elproduktion.

Termisk förgasning av vedråvara för produktion av bränngas (gasolersättning) har också studerats för tissueproduktion (Nilsson et al. 2016), där ett antal olika förgasningstekniker analyserades:

- Fastbäddsförgasning (medströms/motströms)
- Luftblåst suspensionsförgasning
- Tvåstegstegsförgasning
- Indirekt ångblåst FB förgasning

Samtliga studerade tekniker förutom motströmsförgasning bedömdes vara tekniskt möjliga att utnyttja för produktion av gasolersättning i den aktuella skalan (ca 5 MW). Motströmsförgasning, som genererar höga tjärhalter, bedömdes vara mindre lämpligt med tanke på de höga krav på sotfri förbränning som finns vid påblåsningstorkning då rökgaserna bringas i kontakt med det fuktiga pappret. Detta krav innebar att orenad produktgas inte bedömdes vara möjlig att nyttja.

Samlokaliseringssvinster vid produktion av syntetisk naturgas (SNG) i anslutning till skogsindustri har studerats (Jannasch et al. 2015). Flera fördelar med samlokalisering identifierades, bl.a. närhet till råvaran och tillgång till billiga biprodukter samt synergier kopplade till logistik och personal.

Metanproduktion (SNG) i liten skala har studerats (Held 2013) och har bedömts ha ekonomisk relevans om förändrade/förenklade processkoncept tillämpas.

Beroende på vilken applikation som gasen ska användas i så ställs olika krav på gasrening, se vidare kap 5.1.

2.2 ANAEROB RÖTNING

2.2.1 Biogasens utveckling

Biogas har en lång historia och möjligheten att använda bakteriers förmåga att bryta ner organiskt material till biogas fanns redan på andra hälften av 1800-talet. Det var framförallt Kina och Indien som var tidigt ute, där de använde gödsel och matrester för denna energigas som sedan kunde användas till matlagning och belysning.

I Sverige började biogas att produceras på landets avloppsreningsverk från 1960-talet. Motivet då var främst att reducera slamvolymerna, men efter 1970-talets

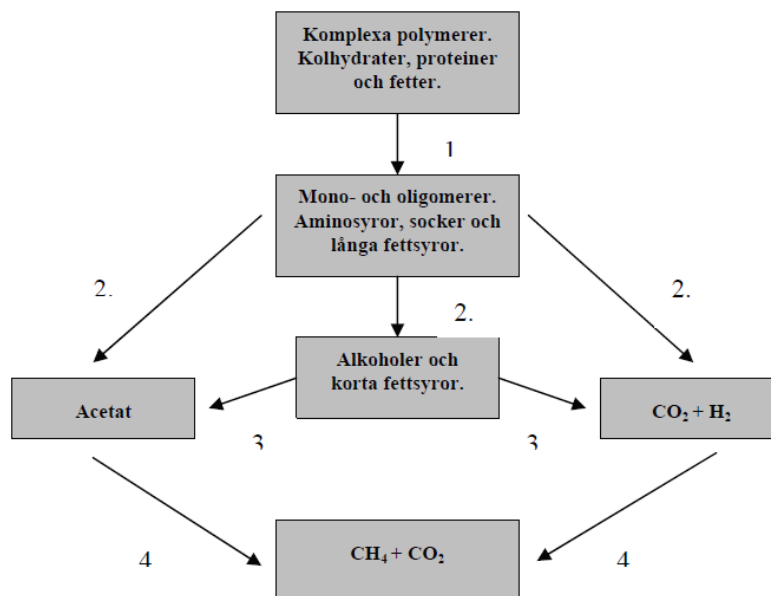
oljekris så ändrades inställningen och forskning och utveckling stimulerades och gav flera utbyggnader av biogasproduktion. Syftet var då att minska oljeberoendet.

På 1980-talet blev det intressant att utvinna gas från avfallsdeponier och några sådana anläggningar anlades. Sedan mitten av 1990-talet började det byggas flera nya biogasanläggningar som behandlar diverse organiska material. De använder restprodukter som annars skulle förbränts eller hamnat på kompost. I dessa anläggningar rötas avfall från till exempel livsmedelsindustrier och slakterier samt matavfall från hushåll, storkök och restauranger. En stor utbyggnad tog också fart när EU slog fast att mer hushållsavfall ska återvinnas. 2030 vill EU att vi når 70% återvinning av vårt hushållsavfall.

Den största delen av råbiogasen som produceras i Sverige uppgraderas till biometan och används som fordonsgas. Biogas/biometan kan även användas till el- och värmeproduktion samt för industriell tillverkning där högvärdig värmeenergi erfordras.

2.2.2 Biogasprocessen

Vid rötning av organiskt material under syrefri miljö är processen komplex och beroende av samverkan mellan olika mikroorganismer.



Figur 7 Den anaeroba nedbrytningskedjan

Figur 7 visar en förklarande bild över de olika stegen i processen. Hydrolyserande bakterier bryter ned stora polymerer till monomerer och oligomerer. Dessa fermenteras sedan i nästa steg till huvudsakligen alkoholer och kortare fettsyror. Det bildas även vätgas i den processen. Fermentationsprodukterna, förutom acetat och metanol, tas sedan upp av en ny grupp bakterier och oxideras vidare till acetat, koldioxid och vätgas. De metanbildande organismerna omvandlar sedan acetat,

vätgas och koldioxid slutligen till metan. Då alla organismerna i denna nedbrytning är beroende av varandra ger en störning inom en grupp en effekt på hela processen.

Obalans i mängden näringsämnen kan ge skillnader i aktivitet och orsaka ackumulering av intermediärer, vilket kan ge sjunkande pH och skumningsproblem. Processen kan optimeras genom tillsatser av olika näringsämnen. Det som främst åstadkoms är att processen går snabbare och att det går att korta uppehållstiden och det på så sätt går att öka belastningen och produktionen av gas (Truong et al. 2010).

Metanbildningen sker främst inom två temperaturområden; dels det mesofila temperaturområdet 37°C och dels det termofila temperaturområdet vid 55°C. Processhastigheten är högre vid det termofila området varför uppehållstiden då kan kortas jämfört med den mesofila processen.

Biogasprocessens förmåga att generera råbiogas ur sitt substrat anges genom att jämföra mängden VS (volatile solids eller glödförlust) i substratet jämfört med mängden metangas som bildas.

2.2.3 Optimering av biogasprocessen

Metoder finns för att förbättra biogasproduktionen genom samrötning och förbehandling av substratet genom olika biologiska, kemiska och fysikaliska metoder. I alla metoder försöker man sönderdela det svårnedbrytbara materialet som cellväggar, cellmembran och lignocellulosa. Genom sönderdelningen ökar bakteriernas angreppsmöjligheter och nedbrytningshastighet och den totala nedbrytningspotentialen ökar.

Samrötning

Vid blandning av olika substrat kan näringssammansättning och koncentrationer optimeras bättre och ger en stabilare och mer effektiv biogasprocess. Vid olika försök har det konstaterats klart mer metanbildning vid samrötning än för de enskilda substraten. Ett försök gav 60% mer metan vid samrötning jämfört med rötning av de enskilda substraten (Parawira et al. 2008).

Termisk behandling

Termisk förbehandling innebär att materialet värms upp till temperaturer mellan 70-220°C. De högre temperaturerna kan också kombineras med snabba tryckförändringar, typ ångexplosion.

Enzymtillsats

Ett sätt att öka det organiska materialets åtkomlighet är att tillsätta enzymer som kan hjälpa till att hydrolysera materialet så att nedbrytning går längre eller att reaktionen sker snabbare. För varje ämne som ska brytas ner krävs ett specifikt enzym. Försök har visat möjligheten att öka metanutbytet på avloppsslam med 60% genom enzymtillsats (Davidsson 2007).

Extra näring

Tillsats av näring medför en möjlighet att öka reaktionshastigheten och på så sätt kunna höja belastningen på de tankar/kammare där rötningen sker. Det kan vara ett bra sätt att höja kapaciteten utan att bygga ytterligare reaktorvolym (Linné et al. 2008).

Ultraljud

Försök att behandla substrat med ultraljud har gjorts på några anläggningar i Sverige. Resultaten verkar dock något motstridiga. I en rapport hävdas det att det går att få ut upp till 25% mer gas med ultraljud (Ejlertsson; 2008) men i en annan rapport så konstateras att Borås kommun och Oskarshamns kommun, som testat två olika fabrikat på ultraljud, varken har sett någon ökad gasproduktion eller minskad slammängd (Dåverhög & Balmér 2008).

2.2.4 Biogasdefinitionen

Biogas härstammar från nedbrytning av förnybart organiskt material. Begreppet används lite slarvigt i Sverige och uttrycket biogas kan innebära både råbiogas, som innehåller ca 50-60% metan, men det kan även innebära fordonsgas som innehåller över 97% metanhalt. Utöver detta kan även biogas innehålla naturgas. Biogas säljs som fordonsgas till motorbränsle, men då produktionen av biogas inte alltid är stabil och tillräcklig, används naturgas för att se till att efterfrågan kan tillgodoses och då blandas biogas med naturgas, vilket ändå kallas biogas.

Vissa drivmedelsbolag erbjuder idag två produkter; dels en som är garanterat mer än 50% från förnybart material och dels en som är 100% från förnybart material, som också kallas biometan. Gasen kommer från samma system och den 100%-iga biogasen är en ren matematisk beräkning, lika den som elleverantörer idag använder när de säljer 100% vattenkraft eller vindkraft till de konsumenter som önskar det. Vissa försäljare av fordonsgas uppger inte andelen av förnybart material i sin biogas. I genomsnitt ligger andelen förnybar biogas på 75% sedan 2015 i Sverige. Innan dess, 2011-2014, låg andelen på ca 60%.

2.2.5 Biogas inom massa- och pappersindustrin

Biogasproduktion inom massa- och pappersindustrin är inget stort område inom forskningen. Det finns dock mycket studerat generellt inom biogasområdet, där resultat och slutsatser även kan tillämpas för rötning av substrat inom papper och massa. Det finns bl.a. en substrathandbok (Carlsson & Uldal 2009) som liksom Bränslehandboken specificerar olika substrat och deras gaspotential, men också nämner att det ur näringssammansättning kan vara lämpligt att samröta olika typer av substrat.

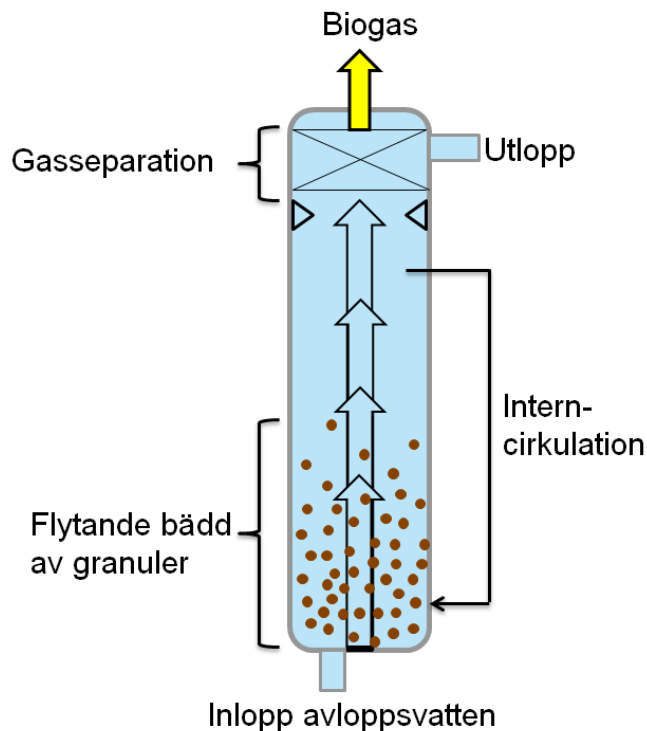
Biogas från lignocellulosa studerades i en SGC-rapport (Odhner et al. 2012) och där framkom att olika förbehandlingsmetoder var nödvändiga för att optimera processen och kunna bryta ner cellulosan. Där beskrevs tester med termisk, kemisk och biologisk förbehandling och bäst verkade behandling med ångexplosion och NaOH på pappersfibrer. Andra material som testades var halm och grot.

Truong et al (2010) testade bioslam från 6 olika bruk med olika produktionsförutsättningar på bruken. Resultatet var att det fanns en potential på 150 – 200 mL metan/g VS med ett undantag på 100 mL metan/g VS på ett bruk. Det konstaterades också att tillsats av kobolt var positiv för biogaspotentialen samt att det var viktigt med omrörning. Andra slutsatser i rapporten var att förbehandlingsmetoderna ultraljud och enzymtillsats inte gav någon mätbar effekt och det noterades slamreduktioner på 30-40% p.g.a. rötningen och avvattningsbarheten på de rötade slammen förbättrades avsevärt på de två slammen som testades. Det ena förbättrades med 45% och det andra med 90%. I en senare rapport (Berg et al. 2011) undersöktes samrötningspotentialen för bioslam med andra substrat. De potentiella samrötningssubstraten, som skulle finnas i brukens närhet, var majsensilage, matavfall, spannmålsavrens, svin- och kogödsel, vattensilage, mikroalger, reningsverksslam, fiberslam samt industninskondensat. Utifrån screening valdes sedan 6 kombinationer ut till långtidsförsök med bioslam. Substraten som valdes var majsensilage, matavfall, spannmålsavrens, kogödsel, mikroalger och kondensat. Rågasproduktionen blev då ca 50-100% högre än för de rena bioslammen. Det finns alltså en potential med samrötning av externa material på ett pappers- och massabruk.

I en nyligen publicerad artikel inom området (Ekstrand et al. 2016) behandlas möjligheten att röta fiberslam tillsammans med bioslam. I rapporten som konstaterar att lite arbete har gjorts beträffande rötning av fiberslam beskrivs rötningförsök genomförda under 800 dagar. Efter en inkörningsperiod på ca 150 dagar stabiliserades processen och olika parametrar optimerades, såsom näringstillseter och belastningar. Rapporten konstaterar biogasutbyten på ca 200 mL/g VS på den relativt korta uppehållstiden på 4 dagar för slammet. Det konstateras att näringsämnen som finns i bioslammet är gynnsamma för det relativt näringsfattiga fiberslammet. Metoden som användes var CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) med slamrecirkulation. Denna teknik lämpar sig bättre, då fibrer annars slår sönder de nödvändiga granulerna som krävs i EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) tekniken, se avsnitt 2.2.6.

2.2.6 Lämpliga biogasanläggningar för massa- och pappersindustrin

De biogassubstrat som finns inom massa- och pappersindustrin, som slamhaltigt vatten och slam, förekommer i stora volymer med relativt låga COD (Chemical Oxygen Demand) halter. För att kunna behandla detta på ett ekonomiskt bra sätt krävs tekniker som ger relativt korta uppehållstider jämfört med traditionellt utformade biogasanläggningar, typ CSTR. Två tekniker som har visat sig lämpliga är EGSB och CSTR med slamåterföring (Björn et al. 2015).



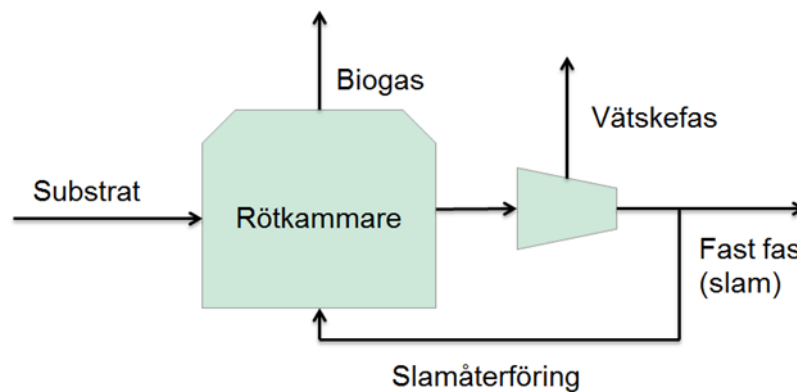
Figur 8 EGSB-reaktor (Björn et al. 2015)

EGSB-reaktorn, som visas förenklat i Figur 8, är en vidareutveckling av UASB-reaktorn (Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket). Skillnaden är främst att EGSB är högre och slankare samt har en intern cirkulation. Avloppsvatten som substrat förs in i botten av reaktorn och passerar upp genom en bädd av biologiskt aktiva granuler, som är fermenterande och metanbildande mikroorganismer. Dessa organismer bryter ner de lösta organiska ämnena i det strömmande vattnet och bildar då biogas. Den producerade gasen rör sig uppåt i reaktorn. Granulerna hålls kvar i reaktorns nedre del av sin tyngd samt av en fassseparator, medan gas och vätska pressas upp till en gasavskiljare. Från gasavskiljaren leds huvuddelen av gasen ut ur reaktorn.

En intern cirkulation finns för att erhålla en lämplig stighastighet i reaktorn. Fördelen med denna typ av reaktor är att biomassan, d.v.s. de aktiva mikroorganismerna, hålls kvar i reaktorn. Uppehållstiden för behandling av ingående vatten kan därför kortas till timmar. EGSB-reaktorer finns installerade i massa- och pappersindustrin dels vid Aditya Birla, Domsjö samt vid Fiskeby board, Norrköping.

Den korta uppehållstiden innebär att det går att bygga en EGSB för behandling av de stora flöden som avloppsvatten från ett massabruk kan innebära.

Optimalt för en EGSB är ett COD-rikt vatten (minst 1 kg/m³), med neutralt pH, mycket låg halt av suspenderade ämnen och en temperatur på ca 37°C.



Figur 9 CSTR med slamåterföring (Björn et al. 2015)

CSTR-teknik med slamåterföring, Figur 9, innebär att en traditionell omrörd tankreaktor som förses med en tvåfasseparator t.ex. en centrifug eller slampress, där en del av den fasta fasen återförs till reaktorn. Detta medför att man kan hålla kvar biomassa av de i processen aktiva mikroorganismerna i reaktorn enligt samma princip som för en EGSB och det gör att det går att korta den hydrauliska uppehållstiden, vilket ger en betydligt mindre reaktorvolym.

2.2.7 Uppgraderingsanläggningar för råbiogas till fordonsgas

Uppgradering av biogas till fordonsgas påbörjades på 1990-talet. Under senaste åren har tillväxten tilltagit och det finns idag ca 61 uppgraderingsanläggningar i Sverige. Till en början var PSA (Pressure Swing Adsorption) och vattenskrubber den vanligaste tekniken, men på senare tid har amin- och membranläggningar blivit allt vanligare.

- Aminskrubbern är en kemisk skrubber som använder sig av aminer som binder koldioxiden kemiskt. Detta kan ske utan att biogasen trycksätts. Koldioxiden släpper sedan från aminen om värme tillförs som då driver reaktionen baklänges.
- Vattenskrubbern är en skrubber som använder vatten för att separera koldioxiden från biogasen. Detta är möjligt tack vare att koldioxid har högre löslighet än metan i vatten. Genom att trycksätta biogasen kommer koldioxiden att lösa sig i vattnet och kunna transporteras bort.
- Organisk fysisk skrubber är också en skrubber som fungerar som vattenskrubbern, men med skillnaden att man använder ett organiskt lösningsmedel istället för vatten.
- PSA är en metod där man använder sig av en adsorbent som binder in koldioxid till dess yta vid högt tryck. Koldioxiden släpps sedan om trycket sänks. Genom att växla mellan högt och lågt tryck kan då koldioxiden bindas och avlägsnas i olika cykler.
- Membranfiltrering sker genom en fysisk barriär som är tillverkad på ett sådant sätt att koldioxiden passerar igenom medan metanen hålls kvar av membranet. Genom trycksättning av biogasen kommer koldioxiden att pressas igenom membranfiltret.

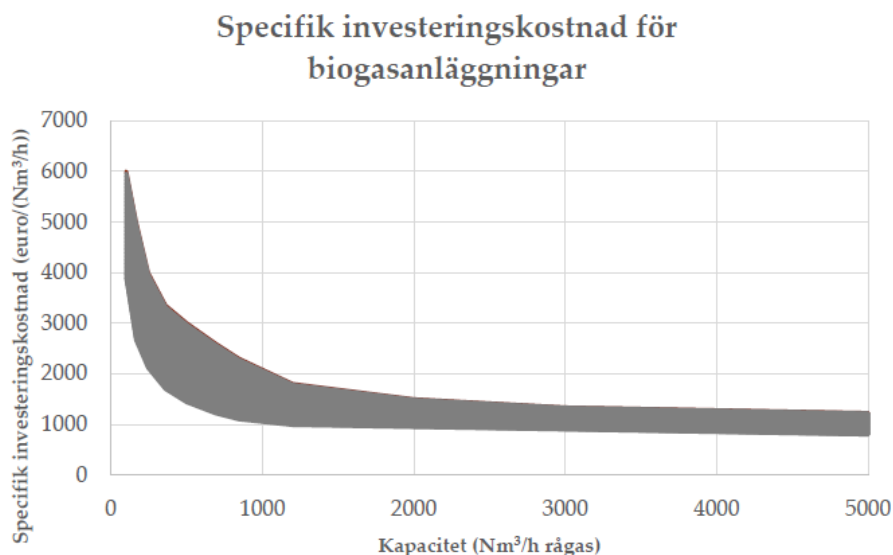
I standardutförande är aaminskrubbern mest effektiv för separation av koldioxid och metan då den kan ta bort hela 99,8% av koldioxiden i den inkommande biogasen. För övriga tekniker är denna siffra något lägre men inom samtliga tekniker finns möjlighet att nå 98% metan i den uppgraderade biogasen.

2.2.8 Investeringskostnader för biogasanläggning

En EGSB-anläggning för kapaciteten 170 m³/h med en COD på 2 kg/m³, dvs ca 2 900 ton COD/år kostade ca 45 MSEK att uppföra hos Fiskeby Board 2015. Anläggningen producerar idag ca 100 Nm³/h råbiogas.

En CSTR med slamåterföring på 6 900 ton/år slam, enligt Figur 9, uppgavs kosta 32,2 MSEK (Björn et al. 2015).

För att bedöma kostnader för gasuppgraderingsanläggningar kan Figur 10 användas (Hoyer et al. 2016).



Figur 10 Kostnad för gasuppgradering (1 EUR=10 SEK) (Hoyer et al. 2016)

Figuren visar att den specifika kostnaden för gasuppgradering under 500 Nm³/h är väsentligt mycket högre än för kapaciteter över 500 Nm³/h. Vid 500 Nm³/h är investeringskostnaden ca 3000 EUR/Nm³*h, d.v.s. ca totalt ca 15 MSEK.

Vid en förfrågan till en leverantör på marknaden inom ramen för detta projekt uppskattades kostnaden för en anläggning på 100-300 Nm³/h till ca 12 MSEK för ett vattenskrubbersystem.

3 Teori och Metod

I detta kapitel görs en djupare beskrivning av processerna för gasgenerering och dess prestanda samt använd metod för utvärdering av produktionsprocesserna.

3.1 TERMISK FÖRGASNING

Effektiviteten för en förgasningsanläggning såväl som systemgränserna kan definieras på ett flertal sätt och i en analys av ett 40-tal studier av förgasningsbaserad drivmedelproduktion slogs fast att dessa varierande definitioner försvårade jämförelser och övergripande slutsatser (Andersson et al. 2013).

I denna studie har två olika verkningsgradsdefinitioner använts:

Fristående verkningsgrad η_f :

$$\eta_f = \frac{\dot{m}_{Gas} \cdot LHV_{gas}}{\dot{m}_{bränsle} \cdot LHV_{bränsle}}$$

där $\dot{m}_{bränsle}$ är bränsleflödet till förgasaren

Marginalverkningsgrad η_m :

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_{Gas} \cdot LHV_{gas}}{\Delta \dot{m}_{bränsle} \cdot LHV_{bränsle}}$$

där $\Delta \dot{m}_{bränsle}$ är ändring av bränsleflödet till hela den skogsindustriella anläggningen.

En typisk gassammansättning och verkningsgrad för de aktuella förgasningsteknikerna vid användande av grot som råvara sammanställdes av (Nilsson et al. 2016) och ges i Tabell 1.

Tabell 1 Gassammansättning och produktionsverkningsgrad för produktgas från olika typer av förgasningsprocesser (Nilsson et al. 2016).

Förgasningsteknik	Typisk produktgassammansättning (vol%, torr)						η_f (%)	η_m (%)
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	Tjära*	N ₂		
Fastbädd, motströms	18	17	17	2	136	46	41	68
Fastbädd, medströms	22	11	17	2	4	48	87	112
Suspensions- och FB***, luftblåst	20	12	11	3	10	50	**	**
Indirekt, ångblåst	32	16	34	15	32	0	82	99
Tvåstegs (Cortus)	34	9	54	3	0	0	91	101

* g/Nm³

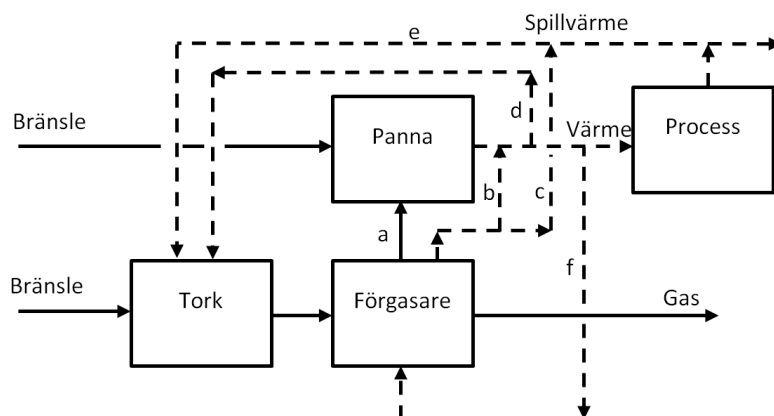
** Ej beräknad

*** Gassammansättning för suspensionsförgasare enligt Nilsson et al. (2016). Likadan sammansättning för FB antagen i denna rapport.

Den låga verkningsgraden för motströms fastbäddsförgasare i Tabell 1, beräknad av Nilsson et al. (2016), förklaras av den höga tjärhalten vars värmevärde inte inkluderas i gasutbytesberäkningen. I det aktuella fallet kunde heller inte tjärans energiinnehåll fullt utnyttjas som bränsle i brukets ångpanna, därav den mycket låga marginalverkningsgraden. Om tjärans energiinnehåll kan nyttiggöras genom förbränning för att uppfylla annat värmebehov i det studerade systemet stiger marginalverkningsgraden för denna förgasningsteknik upp i nivå med den för de övriga teknikerna.

I Figur 11 illustreras hur en förgasare typiskt samverkar med brukets panna, ångsystem och sekundärvärmesystem. De i figuren markerade strömmarna är:

- Träkol och tjära till panna
- Ånga från gaskylare
- Sekundärvärme från gaskylare
- Ånga till tork
- Sekundärvärme till tork
- Ånga till förgasaren



Figur 11: Typisk samverkan mellan en förgasare och brukets energisystem

Uppnåelig marginalverkningsgrad samt möjlig produktionskapacitet (med bibehållen marginalverkningsgrad) beror på hur väl ovanstående strömmar kan integreras i bruket.

Olika förgasningsprocesser har olika karakteristik vad gäller samverkan med bruket. Samtliga förgasningsprocesser har ett likartat torkbehov. Förbrukning av sekundärvärme och ånga är därför likartad för alla processer, ca 3,5-4 MJ per kg avdrivet vatten vid användande av enstegstorkning med luft som torkmedia. Detta motsvarar omkring 0,2 MJ/MJ gas då färsk skogsflis används som råvara.

Vad gäller generering av träkol och tjära samt värme av olika temperaturer så skiljer sig de olika förgasningsprocesserna däremot åt. Indikativa värden på dessa strömmar presenteras i Tabell 2.

Tabell 2 Integreringseffekter vid termisk förgasning, se Figur 11

	a [MJ (LHV)/ MJ gas (LHV)]	b [MJ LT-ånga/ MJ gas (LHV)]	c MJ (65°C)/ MJ gas (LHV)]	f kg ånga/ MJ gas (LHV)]
Fastbädd, motströms	1,36	0,23	0,04	0
Fastbädd, medströms	0,03	0,21	0,02	0
Suspensions- och FB, luftblåst	0,08	0,20	0,02	0
Indirekt, ångblåst	0,20	0,36	0,14	0,07
Indirekt ångblåst, integrerad	0,51	0,21	0,13	0,07
Tvåstegs (Cortus)	0	0,23	0,03	0,03

I faktiska installationer kommer marginalverkningsgraden att variera något mellan olika bruk och mellan olika förgasningstekniker. Om goda integreringsmöjligheter finns såsom vanligen är fallet vid massa- och pappersindustrier, med dess komplexa energisystem, kan sensibelt värme från gaskylningssystem samt tjära

och träkol från förgasningsprocessen sannolikt återvinnas fullt ut och marginaleffektiviteten kommer då att bli hög och likartad för de olika förgasningsprocesserna (omkring 90-100%). Om extern, tidigare outnyttjad, spillvärme finns tillgänglig för torkning av biomassa, såsom i studien av Nilsson et al. (2016), där rökgaser från en fastbränslepanna utnyttjades, kan marginalverkningsgraden stiga ytterligare omkring 10%-enheter. Marginalverkningsgraden, såsom den definieras i denna rapport, kan därmed beräkningsmässigt överstiga 100%.

Beräkning av exakt marginaleffektivitet för alla kombinationer av förgasningsteknik och bruk är en komplex uppgift som faller utanför omfattningen för denna rapport. I denna studie har därför en generell marginaleffektivitet om 95% använts, vilket också är i linje med resultat från tidigare studier av bränningsgasproduktion (Rodin & Wennberg 2010). Faktorer som kan komma att påverka denna generella marginalverkningsgrad diskuteras för respektive studerat bruk.

Gassammansättning och gasutbyte enligt Tabell 1 har använts för att beräkna värmevärde (LHV), volymitet (v), adiabatisk flamtemperatur (AFT), Wobbeindex (WI) och specifik rökgasvolym vid 0% O_2 (g_0), se Tabell 3. Dessa framräknade siffror har använts för att bedöma de olika gasernas lämplighet för olika applikationer i ett massa- eller pappersbruk.

Tabell 3 Gasegenskaper för olika typer av gaser

Förgasningsteknik	LHV (dry) [MJ/nm ³]	v (m ³ /kg)	g_0 (m ³ /nm ³)	AFT (°C)	WI (MJ/nm ³)
Fastbädd, motströms	5,0	0,87	1,9	1560	5,24
Fastbädd, medströms	5,1	0,89	1,9	1643	5,42
Suspensions- och FB, luftblåst	6,0	0,85	2,2	1667	6,27
Indirekt, ångblåst	15,0	1,12	4,1	1990	18,0
Tvåstegs (Cortus)	11,1	1,48	2,9	2204	15,2
Naturgas (jämförelsevärden)	43	1,3	11,5	1960	48
Gasol (jämförelsevärden)	93	0,5	25,8	1990	80

3.2 ANAEROB RÖTNING

3.2.1 Biogas i massa- och pappersbranschen

Vid tillverkning av papper och pappersmassa åtgår stora mängder vatten som oftast renas i flera olika steg, mekaniskt, biologiskt och kemiskt. I den biologiska reningen, oftast aerob, omvandlar mikroorganismer, med hjälp av näringsämnen, det organiska materialet till koldioxid, vatten och ny cellmassa i form av slam. I Sverige finns ca 30 bruk med bioslamproduktion som genererar ca 4-5 ton bioslam (100% torrhalt) per dygn (Truong et al. 2010).

Det finns ett antal olika varianter att hantera detta slam, såsom inblandning i svartlut för vidare indunstning och förbränning i sodapannan, inblandning i biobränsle för förbränning i en biopanna eller helt enkelt använda slammet som jordförbättringsmedel. Vid förbränning åtgår mycket energi för att förångas vattnet i slammet som det genererar, det effektiva värmevärdet är alltså lågt. Alternativa behandlingsmetoder för att utvinna energi är därför intressanta att studera.

Vid rötning av bioslam kan flera fördelar uppnås. Vid nedbrytningen av det organiska materialet bildas råbiogas (metan och koldioxid). Råbiogasen kan sedan användas för generering av el/värme eller renas/uppgraderas till ren metangas och användas som fordonsbränsle eller som naturgas. Det blir också en stabilisering av slammet och en reducerad slammängd samt oftast förbättrade avvattningssegenskaper. Det slammet kan efter avvattning användas som bränsle eller gödningsmedel.

3.2.2 Möjliga substrat

Från massa- och pappersbruken finns det såväl fiberslam som bioslam som kan utnyttjas för produktion av råbiogas. Många försök har gjorts på bioslam och resultaten därifrån ser stabila ut. Försök på rötning av fiberslam är mer sparsamma, men det finns antaganden om likvärdiga gasutbyten som på bioslam. En studie gällande rötning av fiberslam tillsammans med bioslam (Ekstrand et al. 2016) identifierade detta som en lämplig metod.

3.2.3 VS-halt i bio- och fiberslam

I en rapport av Truong et al. (2010) fanns 6 olika bruk representerade och dessa hade en VS-halt i % av TS på mellan 79,9 och 85,4 på bioslam för 5 av bruken. Det sjätte bruket hade 66,7%. Ett medelvärde på de 5 bruken blir 82,6% på bioslam och används i senare beräkningar i denna studie för att uppskatta gaspotentialer. Beträffande VS-halt i % på TS för fiberslam, varierar detta mycket beroende på om bruket har betrykning eller inte. I denna rapport har bruk B betrykning och även kemsam inblandat och då fås en uppskattad nivå på 60% VS-halt av TS, men de övriga bruken antas ha 95% VS-halt av TS i sitt fiberslam.

3.2.4 Gaspotential i bio- och fiberslam

I rapporten (Truong et al. 2010) rötades bioslam från 6 olika bruk och det framgick att samtliga bioslam var rötbara och att metanpotentialen låg mellan 150-200 ml metan/g VS med undantag för ett bruk, som hade ca 100 ml metan/g VS. De olika

resultaten och även skillnad i nedbrytningshastighet beror på innehållet i slammet som delvis kan vara toxiska föreningar som hämmar nedbrytning och gasproduktionen. I Linné et al. (2008) finns uppgiften på ett metanutbyte på 1,15 MWh/ton TS på bioslam från massa- och pappersindustrin. Det motsvarar en VS-halt på 82,6% till 139 mL metan/g VS. För beräkningsändamål i denna rapport har siffran 150 mL metan/g VS valts.

För fiberslam har data från Ekstrand et al. (2016) nyttjats och där låg gaspotentialen på 200 ml metan/g VS. Underlagen för gaspotential i fiberslam är dock relativt osäkra och är oftast i samrötning med bioslam.

Nivån på gasutbyte för slammen inom massa- och pappersindustrin kan jämföras med nedanstående generella data för andra biogassubstrat (Carlsson & Uldal 2009):

- Hästgödsel, 170 ml/g VS
- Halm, 207 ml/g VS
- Hönskötsel, 247 ml/g VS
- Majs, 351 ml/g VS
- Slakteriavfall 450-550 ml/g VS
- Fiskrens, 930 ml/g VS

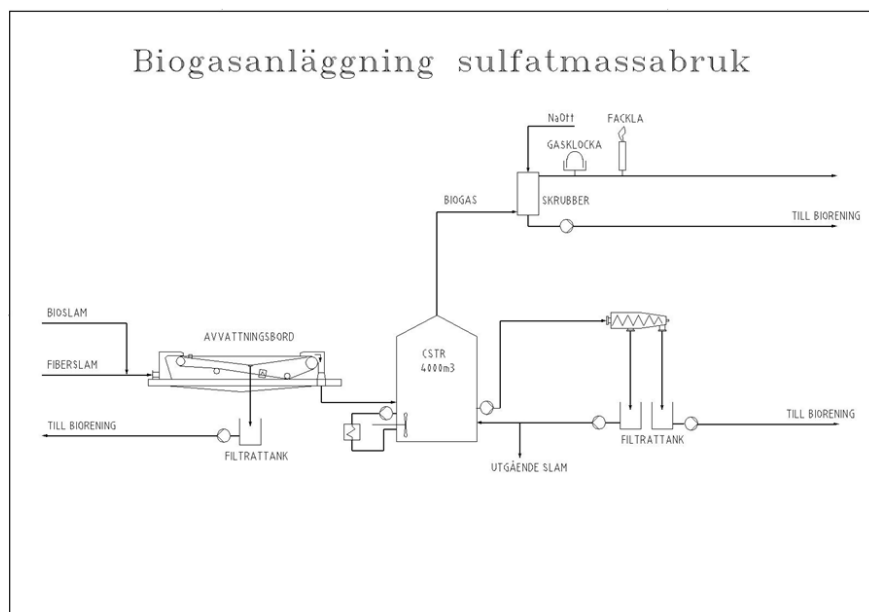
3.2.5 Anläggningsval

I forskningsrapporten av Björn et al. (2015) konstateras "Eftersom det visat sig problematiskt att applicera UASB-tekniken inom sulfatmassabruken utvecklades ett koncept, där CSTR med slamåterföring används för att röta bioslam tillsammans med fiberslam.". Baserat på detta blir valet att satsa på denna typ av anläggning i denna rapport, då samtliga bruk har såväl bioslam som fiberslam som går att röta. Anledningen till valet framgår inte tydligt, men är sannolikt p.g.a. att fibrer inte är lämpliga i UASB/EGSB-tekniken, då de kan slå sönder de viktiga granulerna. UASB/EGSB-tekniken förefaller dock intressant i vissa applikationer och en sådan fungerande anläggning finns idag bl.a. på Fiskeby board i Norrköping, där man effektivt avskiljer alla fibrer före anläggningen med hjälp av ett skivfilter.

3.2.6 Anläggningsdesign

För att förenkla beräkningen av investeringskostnader, har en investeringskalkyl för CSTR med slamåterföring utnyttjats (Björn et al. 2015). I denna är slammängden beräknad till 6 900 ton TS/år.

Ett processschema finns för den anläggning som framgår av Figur 12. Slammet avvattnas på ett avvattningsbord till ca 4% och leds sedan in till en syrefri CSTR-reaktor på 4000 m³. Reaktorn förses med en pumpslinga och en värmare/kylare för att hålla rätt temperatur inne i reaktorn. Slam tas ut ur reaktorn och en separering av slam och filtrat görs, där en del av slammet återförs till reaktorn och en del tas ut ur systemet. Investeringen i rapporten uppskattas till 32,2 MSEK. Denna anläggning har varit utgångspunkt för beräkningar i de enskilda applikationerna.



Figur 12: Processchema för CSTR med slamåterföring

Denna anläggning har kompletterats med gasuppgradering för 350 Nm³/h råbiogas. Enligt Hoyer et al. (2016) uppgår en sådan investering till mellan 10-15 MSEK, beroende på teknikval. Vid uppgradering av gasen till fordonsgas krävs också en gaslagringsenhet med kompressor. En sådan anläggning för denna volym uppskattas till 8 MSEK.

3.2.7 Gassammansättning

I Tabell 4 nedan beskrivs egenskaperna för olika biogaskvaliteter. Dessutom redovisas värden för naturgas och gasol som jämförelse.

Tabell 4 Gasegenskaper för olika typer av gaser

Gastyp	LHV (dry) [MJ/nm ³]	v (m ³ /kg)	g ₀ (m ³ /nm ³)	AFT (°C)	WI (MJ/nm ³)
Råbiogas, rötchammar, Metan 55 vol%	21,9	0,78	6,3	1850	21,9
Råbiogas, UASB /EGSB, Metan 75 vol%	29,9	0,97	8,2	1956	33,3
Uppgraderad biogas Metan 97 vol%	38,5	1,33	10,3	2026	50,2
Naturgas (jämförelsevärden)	43	1,3	11,5	1960	48
Gasol (jämförelsevärden)	93	0,5	25,8	1990	80

4 Exempelbruk

I Sverige finns i dagsläget ca 50 bruk som producerar massa och/eller olika typer av papper eller kartong. De olika bruken skiljer sig åt väsentligt vad gäller såväl inriktning som produktionskapacitet. Med anledning av den stora variationen och den olika uppbyggnaden av många bruk är variationen stor vad gäller gasproduktionspotential och gasanvändning. Detta är ingen heltäckande studie för den svenska massa- och pappersindustrin, utan istället har referensgruppen beslutat vilka bruk som kommer att studeras närmare, som exempel för hur gasproduktionen och gasanvändningen skulle kunna se ut. I rapporten kallas dessa bruk för exempelbruk, då de utgör enstaka exempel i branschen.

Ytterligare beskrivning av exempelbruken som studerats i denna rapport ges i avsnitt 4.1-4.4 nedan.

4.1 BRUK A

Bruket tillverkar 700 000 ton kemisk sulfatmassa/år av blekt långfiber som körs i kampanjer. Ett sågverk, som tillhör företaget, ligger i anslutning till bruket.

4.1.1 Tillgängliga sidoströmmar

Vid bruket faller följande strömmar som kan användas för gasgenerering:

Tabell 5 Tillgängliga strömmar för gasgenerering, bruk A

	Ton TS/år	Kommentar
Bioslam	3 300	Torrhalt 11%, idag till industnningen
Fiberslam	160	Torrhalt 40%
COD till luftad damm	15 600	
Bark	135 000	Torrhalt 40% (Inkl. sågverk.)

Barkbalans: Försäljning 370 000 m³s/år, motsvarande c:a 220 GWh/år

4.1.2 Bränsleanvändning

Vid bruket förbrukas följande bränslemängder vid sidan av fastbränsle och avlutar:

Tabell 6 Använt bränsle utöver fastbränsle och avlutar, bruk A

	MWh/år	Kommentar
Gasol	256	Fackla starkgaser + startbrännare mesaugn, barkpanna, sodapanna
EO1	5 000	Hetvatten till sågverk
EO3	2 100	Uppstart barkpanna
Diesel för transport	14 300	650 m ³ /år + 810 m ³ /år (sågverket)
Tallbeckolja	132 000	Mesaugn, sodapanna, barkpanna

4.2 BRUK B

Bruket är ett integrerat pappersbruk, som producerar 470 000 ton kartong/år på egen oblekt långfibrig massa och blekt kortfibrig massa. Utöver detta använder bruket CTMP-massa.

4.2.1 Tillgängliga sidoströmmar

Vid bruket faller följande strömmar som kan användas för gasgenerering:

Tabell 7 Tillgängliga strömmar för gasgenerering, bruk B

	Ton TS/år	Kommentar
Bioslam	3 900	Torrhalt 15%, torkas av entreprenör till 70% och eldas sedan i fastbränslepanna på bruket
Fiberslam	13 400	Torrhalt 46%, används till deponitäckning inkl. kemslam
COD till luftad damm	4 700	
Bark	25 200	Torrhalt 47%
Spån	5 300	Torrhalt 55%

Barkbalans 2016: Inköp 290 GWh/år

4.2.2 Bränsleanvändning

Vid bruket förbrukas följande bränslemängder vid sidan av fastbränsle och avlutar:

Tabell 8 Använt bränsle utöver fastbränsle och avlutar, bruk B

	MWh/år	Kommentar
Gasol	7 500	Krympfilmsugn för arkat material, torkning av kartong
EO1	44 700	FB panna lastbränsle, Sodapanna startbränsle, Mesaugn 50% för att klara utsläpp till luft.
EO5		Används ej
Diesel för transporter	780	470 m ³ /år + 330 m ³ /år (entreprenör)
Tallbeckolja	65 600	Ökar 2017 när elfilter installeras

4.3 BRUK C

Bruket är ett integrerat bruk med 4 pappersmaskiner på totalt 420 000 ton/år. Anläggningen producerar oblekt långfibrig sulfatmassa, blekt kortfibrig och blekt långfibrig sulfatmassa, som används till pappersmaskinerna. En del av den blekta massan säljs som avsalumassa. En av pappersmaskinerna körs på neutral sulfit (NS) massa som produceras internt på lövved.

4.3.1 Tillgängliga sidoströmmar

Vid bruket faller följande strömmar som kan användas för gasgenerering:

Tabell 9 Tillgängliga strömmar för gasgenerering, bruk C

	Ton TS/år	Kommentar
Bioslam	2 200	Torrhalt 17,2%, eldas eller Econova
Fiberslam	6 800	Torrhalt 28,6%, eldas eller Econova
COD till luftad damm	14 200	
Bark	70 000	Torrhalt 42%.

Barkbalans 2016: Inköp 36 GWh/år

4.3.2 Bränsleanvändning

Vid bruket förbrukas följande bränslemängder vid sidan av fastbränsle och avlutar:

Tabell 10 Använt bränsle utöver fastbränsle och avlutar, bruk C

	MWh/år	Kommentar
Gasol	43 200	Torkkåpor
EO1	4 000	Start upp sodapanna, luktdestruktion
EO3		Används ej
Diesel för transport	4 800	495 m ³ /år
Tallbeckolja	172 800	Mesaugnar, barkpanna

4.4 BRUK D

Bruk D är ett integrerat bruk och har en högekappasulfatlinje på långfiber som förser en pappersmaskin som producerar ca 390 000 ton kraftpapper/år. Dessutom finns en kortfiberlinje som gör blekt sulfatmassa till pappersmaskinen. Ett sågverk, som tillhör företaget, ligger i anslutning till bruket.

4.4.1 Tillgängliga sidoströmmar

Vid bruket faller följande strömmar som kan användas för gasgenerering:

Tabell 11 Tillgängliga strömmar för gasgenerering, bruk D

	Ton TS/år	Kommentar
Bioslam	2 100	Torrhalt 15% ihop med fiberslam, blandas med fiberslam och förbränns i fastbränslepannan
Fiberslam	1 200	Torrhalt 15% ihop med bioslam, blandas med bioslam och förbränns i fastbränslepannan
COD till luftad damm	7 100	
Bark	126 000	Torrhalt 40% (Inkl. sågverk)

Barkbalans 2016: Inköp 249 GWh/år

4.4.2 Bränsleanvändning

Vid bruket förbrukas följande bränslemängder vid sidan av fastbränsle och avlutar:

Tabell 12 Använt bränsle utöver fastbränsle och avlutar, bruk D

	MWh/år	Kommentar
Gasol	525	Vid fackling av gaser om mesaugn ur drift
EO1		Används ej
EO3	46 100	Stödbränsle mesaugn
Diesel för transport	4 800	488 m ³
Tallbeckolja		
Träpulver		

5 Resultat

5.1 GASERNAS RENHET

Gassammansättning och förekomst av föroreningar skiljer sig åt mellan termisk och biokemisk förgasning. Råvarans sammansättning påverkar i hög grad gassammansättningen vid termisk förgasning, medan den i mindre utsträckning påverkar sammansättningen vid biogasproduktion. Det omvända gäller ifråga om kapacitet där råvarans sammansättning i stor utsträckning påverkar gasutbytet för biogasprocessen, medan den har mindre betydelse för gasutbytet vid termisk förgasning, se vidare kap. 5.2.

5.1.1 Termisk förgasning

Vid termisk förgasning av biomassa kommer gasen att innehålla en stor mängd brännbara komponenter, dels i form av permanenta gaser, men också av kondenserbara ångor. Därutöver innehåller gasen även komponenter innehållande oorganiska ämnen härrörande från använd biomassa och nötning av bäddmaterial (om fluidiserad bädd-förgasare används.)

Tjära

Den komplexa blandningen av kondenserbara ämnen benämns vanligen tjära och till denna grupp räknas vanligen alla ämnen med en molmassa högre än den för benzen ($M=78,11$ g/mol) (Maniatis & Beenackers 2000). Tjäran kan vidare klassificeras i olika grupper utifrån sitt ursprung eller sina egenskaper eller detektionsmetod. Halterna av tjära är starkt beroende av förgasningstyp och indikativa halter ges i Tabell 1. En stor mängd tjärkomponenter kan kondensera även vid höga temperaturer och behöver avskiljas för att inte skapa beläggningar i efterföljande processteg. Principiellt kan tjärhalten i gasen minskas genom någon av följande två tillvägagångssätt:

- a. Uppsamling och bortförande av tjära
Tjära kan avskiljas från produktgasströmmen genom kondensering, absorption eller adsorption (eller en kombination av dessa). Bortförd tjära representerar en energiförlust som för vissa förgasartyper kan vara betydande och bör om möjligt återföras till förgasaren eller någon panna för förbränning. Hantering av högviskösa och klibbig tjära kan innebära en del praktiska problem och system med vattenskrubbning kan skapa tjäremulsioner och vattenströmmar som kan vara toxiska för biologiska reningssteg, men de strömmar det kan bli fråga om kan knappast orsaka några problem för en skogsindustriell anläggning, möjligen små tissuebruk undantagna. Adsorption på exempelvis med hjälp av aktivt kol kan kräva ånga för regenerering och/eller skapa fasta avfallströmmar i form av förbrukade bäddar. Genom att kombinera olika enhetsoperationer för uppsamling och bortförande av tjära kan praktiskt taget tjärfri gas erhållas.
- b. Omvandling av tjära till permanenta gaser
Nedbrytning av tjära till lågmolekylära gaser kan ske genom upphettning av

gasen med eller utan användning av katalytiska material. Om omvandlingen sker utan närvaro av katalysator (termisk krackning), krävs en hög temperatur (1100-1300°C) under ett par sekunders tid för att få en i det närmaste total omvandling (Han & Kim 2008). Vid användning av katalytisk omvandling kan lägre temperaturer (800-900°C) användas. I litteraturen rapporterad tjärkonvertering med katalytisk krackning varierar kraftigt liksom drifttid innan deaktivering. Kommersiella resultat med hög tjärkonvertering och låg sotbildning även vid högt stoftinnehåll i gasen har rapporterats under senare år (Eriksen et al. 2014).

För förbränningsapplikationer är kraven på tjärfrihet oftast lägre än för motor-/gasturbindrift och väsentligt lägre än de krav som ställs på gas för katalytisk syntesgaskonvertering. I vissa fall då rökgaser från förbränning kommer i kontakt med processmedia (som exempelvis vid tissuetorkning) kan sotbildning vid förbränning utgöra en risk som kräver strängare tjärrening än vad som annars krävs.

Övriga föroreningar

Övriga föroreningar i produktgas från termisk förgasning är partiklar, olika ämnen innehållande främst klor, svavel, kväve samt alkalimetaller (Woolcock & Brown 2013). Halterna av dessa föroreningar är beroende på den aktuella råvaran. Rent trä innehåller lägst koncentrationer medan bark innehåller högst. Utöver de askhalter som naturligt finns i bränslet, kan betydande mängder tillkomma under hantering i form av sand och jord.

För en förbränningsapplikation är det vanligen tillräckligt att minska gasens stoftinnehåll med hjälp av någon form av partikelavskiljning, exempelvis cykloner, skrubber eller filter. För användning av gasen i en katalytisk omvandlingsprocess krävs en mycket omfattande rening.

5.1.2 Anaerob rötning

Råbiogasen består av ca 50-60% metan och ca 40-50% koldioxid. Gasen kan i den formen användas för förbränning och användning till värme- och elgenerering. På mindre gårdsanläggningar i Sverige används gasen för elgenerering m.h.a. en gasmotor. Råbiogas som uppgraderas till naturgaskvalitet, d.v.s. renas från koldioxid, kan användas som drivmedel till fordon och kallas då fordonsgas.

Specifikationen för uppgraderad biogas till fordonsgas kan se ut enligt Tabell 13 nedan.

Tabell 13 Typisk specifikation för uppgraderad biogas (Källa: nsr.se/Files/Filer/Foretag/biogas_20110923.docx)

Färg:	Färglös
Lukt:	Distinkt och otrevlig vid tillsats av doftämne annars doftlös.
Smältpunkt/frys punkt:	-182°C
Kokpunkt:	-161°C
Flampunkt:	-89°C
Brännbarhet:	Extremt brandfarlig
Övre/undre explosionsgräns:	ca 7-20% gasinblandning (vid markatmosfärtryck och normal utom- eller inomhustemperatur)
Relativ densitet:	0,578 (luft = 1)
Densitet:	0,7075 kg/Nm ³
Löslighet i vatten:	24,4±1,0 mg/l vid 25°C
Självantändningstemperatur:	>600°C vid 1 atm
Viskositet:	11,2 µPa s vid 27°C
Explosiva egenskaper:	Biogas bildar explosiva blandningar med luft vid ca 7-20% gasinblandning vid markatmosfärtryck och normal utom- eller inomhustemperatur.
Oxiderande egenskaper:	Ej oxiderande
Övre energivärdet	39 MJ/Nm ³
Nedre energivärdet	35 MJ/Nm ³
Wobbeindex	>44,7 MJ/Nm ³
Molvikt	16,69 kg/kmol
Vattendaggpunkt	<-30 °C vid 200 bar

Föroreningar

De vanligaste kontamineringarna är oljeöverföring från kompressorsystem, vatten och andra föroreningar som svavelföreningar och siloxaner. Siloxan är en kemisk förening innehållande kisel, syre och metylgrupper (CH₃).

Det finns en standard för biogas som motorbränsle som heter SS155438. I den står bl.a.:

Metanhalt	97+/- 1%
Syrgashalt	<1% i volymhalt
Vattenhalt	<32 mg/Nm ³
Total svavelhalt	<23 mg/Nm ³
Total kvävehalt	<20 mg/Nm ³
Oljehalt	<20 mg/Nm ³

5.2 GAS SOM BRÄNSLE I OLIKA BRUKSAPPLIKATIONER

Fossila gaser utgör i flera fall en mycket liten del av den förbrukade bränslemängden på ett bruk. För bruk som använder direkteldade torkkåpor (eller gaseldade IR-torkar) kan de fossila gaserna utgöra en betydande andel av inköpta fossila energibärare. Eldningsolja och diesel för fordonsdrift är vanligen en större grupp bränslen med en genomsnittlig förbrukning i storleksordningen 3-6 MW. Diesel utgör en mindre del med relativt jämn förbrukningskaraktäristik, medan

eldningsolja för uppstart- och lastreglering nyttjas intermittent, men då med periodvis mycket höga effekter på flera tiotals MW.

De tekniska och ekonomiska möjligheterna att ersätta fossila energibärare med egengenererad gas beror dels på toppeffekten men också på vilken applikation som gasen ska användas i. Följande applikationer beskrivs närmare i nedanstående kapitel:

1. Gasanvändning i mesaugn
2. Gasanvändning i torkkåpor
3. Last- och startbrännare
4. Gasdestruktion och fackla
5. Krympugnar/-ramar
6. Fordonsdrift

En allmän aspekt på nyttjande av egenproducerad gas är att gashanteringssystemet bör vara designat för att kunna jämna ut gaskvaliteten som skickas till förbrukarna, t.ex. genom någon form av buffertsystem där gaskvaliteten blandas/jämnas ut. Generellt gäller att skillnader i gaskvalitetsparametrar, i huvudsak Wobbe-index, kan föranleda att gashanteringssystemet för den specifika applikationen kan behöva modifieras för att kunna hantera en gas med lägre energitäthet. Variationer i Wobbe-index <5% kommer i praktiken inte att påverka gashanteringssystemet prestanda, men om skillnaderna är större kan systemet behöva modifieras.

5.2.1 Gasanvändning i mesaugn

En konvertering av mesaugnar från olja till gas kommer att ha en påverkan på prestanda och bränsleförbrukning. Följande observationer har gjorts när naturgas och olja jämförts i mesaugnsapplikationer (Grace et al. 1989):

- Utgående rökgasens temperatur är vid naturgaseldning ca 50°C högre jämfört med den för en oljeeldad ugn.
- Kalcineringszonen är normalt längre för en gaseldad ugn.
- Torkzonen kan vara relativt kort för naturgas jämfört med den för olja. För en mesaugn med kedjezon kan det vara så att en naturgasflamma resulterar i en helt torkad mesa ut från kedjezonen medan den för en oljeflamma fortfarande kan vara blöt när den kommer ut från kedjezonen.
- Specifik bränsleförbrukning för naturgas är generellt 1,16 MJ/ton CaO högre än den för olja.
- Det totala rökgasflödet är i storleksordningen 25% högre för naturgas jämfört med det för olja.

Ovanstående innebär att en ugn som är optimerad för oljeeldning ej kommer att prestera lika bra på naturgas. För byte till ouppgraderad biogas samt produktgas finns utöver flamtemperaturen ett antal faktorer som påverkar en mesaugns kapacitet vid ett bränslebyte:

- Adiabatisk flamtemperatur, AFT
Produktgas från luftblåsta förgasare ger en AFT som är lägre än den som uppnås med naturgas. För ångblåst indirekt förgasning är AFT ungefär samma

som för naturgas medan AFT för den ångblåsta suspensionsförgasaren (Cortus) är högre än för naturgas.

- **Flammans emissivitet**
En gasflamma har normalt lägre strålning än en flamma från olja eller kolförbränning. Den lägre flamstrålningen beror i huvudsak på en lägre mängd partiklar.
- **Specifik rökgasmängd**
Den specifika rökgasmängden per tillförd energienhet är likartad för naturgas, biogas och ångblåst förgasning, medan den är väsentligt högre för gas från luftblåst förgasning.
- **CO₂-halt i rökgaserna**
Ett ökat partialtryck av CO₂ i gaserna i en mesaugn kommer att ha en dämpande effekt på kalcineringshastigheten och därmed kunna påverka ugnens kapacitet negativt.

5.2.2 Gasanvändning i torkkåpor

Vid torkning av vissa papperskvaliteter är det vanligt att s.k. påblåsningstorkning används. Med denna torkmetod blåses torkluft med hög temperatur och hastighet mot den våta pappersbanan. För att uppnå högsta torkkapacitet eftersträvas höga torklufttemperaturer och temperaturer omkring 500°C är inte ovanliga. I sådana torkar är det vanligt att avgaserna från bränsleförbränningen blandas med luft och bringas i direkt kontakt med pappersbanan. I och med att avgaserna kommer i kontakt med det producerade pappret är det mycket viktigt att en sotfri förbränning kan uppnås. Möjligheterna att nå detta vid eldning av biogas och tjärrenad produktgas kan anses vara mycket goda, men verifieringsförsök för planerade förgasningskoncept bör genomföras som del i projektutveckling av förgasningsprojekt för sådana applikationer

I motsats till tidigare beskrivna konsekvenser vid bränslebyte i mesaugnar är kapacitetskonsekvenserna av ett bränslebyte i torkkåpor mycket små. I en beräkning avseende ersättning av gasol med produktgas från termisk förgasning fanns att torkkapaciteten kunde behållas utan ändring av torktemperatur eller påblåsningshastighet (Nilsson et al. 2016). Den specifika energiförbrukningen ökade något (ca 3%) vid byte från gasol till produktgas.

Även om påverkan på kapacitet och energiförbrukning är liten så kommer ombyggnader att krävas av brännarsystemen. Utöver den stora skillnaden i Wobbe-index som speglar den låga energidensiteten för i synnerhet de luftblåsta förgasarna finns skillnader ifråga om flamutbredningshastighet och flamstabilitet.

5.2.3 Last- och startbrännare

Att elda naturgas i start- och lastbrännare finns det omfattande erfarenhet från både vad gäller fastbränsle- och sodapannor.

Ersättning av oljebaserade brännare med mera lågvärdig gas i form av råbiogas samt produktgas från termisk förgasning bör inte bereda några tekniska problem. För lastbrännare kan den något högre specifika avgasvolymen för dessa lågvärdiga gaser innebära en kapacitetsbegränsning i vissa pannor.

5.2.4 Gasdestruktion och fackla

För sameldning och som pilotbränsle i destruktionsapplikationer krävs att det aktuella bränslet har en stabil gastillförsel och en stabil flamma som kan vidmakthålla de processförutsättningar som behövs i dessa applikationer, t.ex. uppehållstider och temperaturer. Applikationen bör ej föranleda några större tekniska problem. Möjligen kan vissa begränsningar på rökpassidan uppstå vid nyttjande av några av produktgaserna som har högre specifikt rökgasflöde än de fossila bränslen som används.

5.2.5 Krympugnar/-ramar samt IR-torkar

Gaseldade IR-torkar för torkning i papper- och kartongmaskiner nyttjar i dag i huvudsak gasol eller naturgas som bränsle. Denna typ av brännare är normalt designad med en keramisk platta där gasen flödar ut genom håligheter och antänds därefter på en öppen yta. En stabil flamma är viktig för en väl fungerande torkprocess, t.ex. kan en ökad gasströmning ge en större flamma med risk för flamlyft, och vid reducerad strömning ökar risken för att lågan slocknar under drift. Under senare år har en utveckling av en ny typ av brännare för IR-torkapplikationer med flamtemperaturer uppåt 1400°C gjorts (Larsson & Nodin 2013). I praktiken kan dessa temperaturnivåer vara svåra att uppnå med vissa av produktgaskvaliteterna i detta arbete. Generellt kan därför sägas att i torkapplikationer som baserar sig på högttemperatur IR-teknik så kan kapacitetsbegränsningar uppstå om en produktgas med för låga flamtemperaturer nyttjas.

5.2.6 Fordonsdrift

För fordonsdrift kan knappast ouppgraderad biogas eller rågas/syntesgas från termisk förgasning anses vara relevant, då detta skulle kräva en viss egen anpassning av motorer och bränslesystem och sannolikt en oacceptabelt låg tillgänglighet på de aktuella fordonen. För framställning av motorbränsle i den förhållandevis lilla skalan som representeras av interna transporter är uppgraderad biogas sannolikt det enda realistiska alternativet. Även om metanproduktion via katalytisk omvandling av syntesgas har bedömts intressant även i liten skala (Held 2013), är den interna användningen på < 1 MW sannolikt inte ekonomiskt relevant för en sådan anläggning. En utvidgning av fordonsparken till att omfatta även delar av de externa transportererna skulle dock kunna resultera i en förbrukning som motiverar en förgasningsbaserad drivmedelsproduktion, exempelvis i form av metan. I detta läge skulle en ytterligare ökad produktion för extern avsalu naturligtvis vara intressant. Men en sådan verksamhet faller utanför denna rapports omfattning.

Truckar som går på naturgas/metan finns redan idag att köpa från Linde, en av de större tillverkarna. Det är även möjligt att konvertera andra arbetsfordon till dual drift, d.v.s. att kunna köras på både biogas och diesel. Dock föreslår utredningen "Biogasdrift i arbetsmaskiner" (Jordbruksverket 2015) att konvertering av befintliga maskiner bör undvikas. Istället bör i första hand nya maskiner förses med gasdrift. Dock är tekniken ny och behöver utvecklas vidare konstateras det. Det behövs mer

utredningar för att få bättre kännedom om emissioner av kväveoxider, partiklar och kolväte. Något regelverk finns inte heller inom EU på detta område.

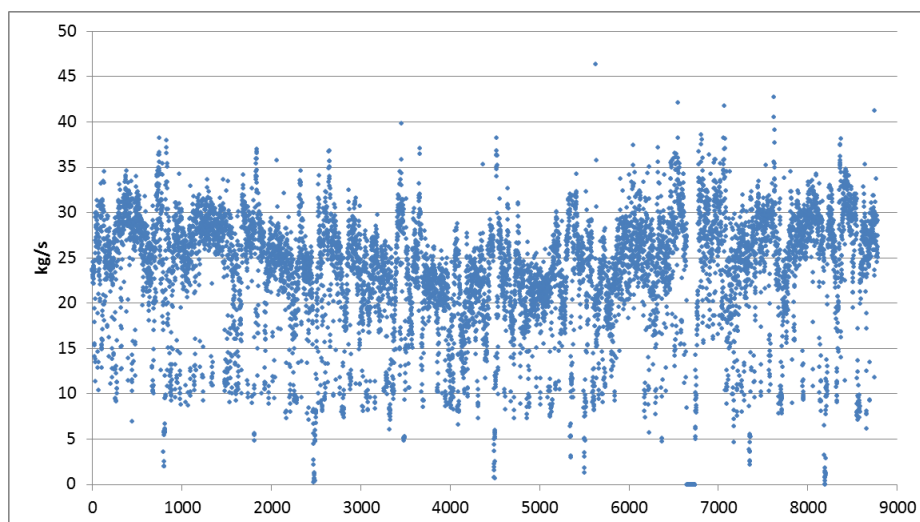
5.3 PÅVERKAN PÅ BRUKETS ENERGIBALANS OCH BARKPANNA

Integration av en förgasare i ett massa- och pappersbruk påverkar energibalans och barkpanna på flera sätt som beskrivits i kapitel 3.1.

Sensibel och latent värme från gaskylning kan tillföras ång- och sekundärvärmesystemen och därmed minska ångbehovet från barkpannan. Vidare kan barkpannan komma att tillföras nya bränsleströmmar i form av tjära samt, i det fall integrerad kommuniserande bäddförgasning används, förgasningskoks.

Vid en förgasningskapacitet på 5 MW, vilket är en relevant storlek för flera bruk, kommer värmeeffekten att vara max omkring 1 MW (ca 0,5 kg/s), vilket för en typisk barkpanna, se Figur 13, motsvarar en marginell lastsänkning. Dessutom balanseras detta värmetillskott ganska väl av ett tillkommande energibehov för torkning vilket innebär att effekten på barkpannan blir ytterst marginell såvida inte förgasningen baseras på redan torkad råvara.

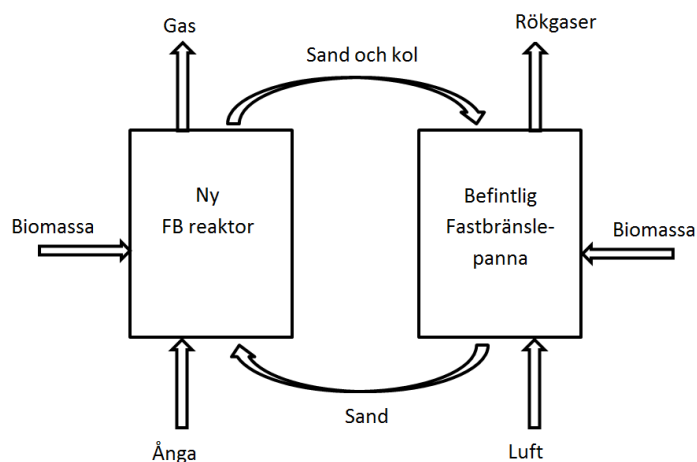
Produktionen av tjära från en förgasningsanläggning på 5 MW varierar från ett par hundra kW för de tekniker som ger lägst tjärhalter upp till flera MW för de fall motströmsförgasning utan efterföljande tjärreforming används. Detta tillskott av bränsle bedöms inte innebära några större tekniska utmaningar utöver de rent hanteringsmässiga.



Figur 13 Typisk lastprofil på barkpanna i skogsindustrin från ett av referensbruket i studien

Ett specialfall av kommuniserande bäddförgasning bygger på integrering av förgasningsreaktorn med en befintlig FB-panna. Detta är en ny, ännu ej kommersiellt demonstrerad teknik, som potentiellt kan ge robust och kostnadseffektiv gasproduktion, i synnerhet om gaskapaciteten är liten i förhållande till barkpannans kapacitet och att pannan sällan körs på maximal kapacitet.

Med detta förgasningskoncept blir påverkan på barkpannan större än då integreringseffekterna endast består av omhändertagande av värme och tjära. Från pannan leds varmt bäddmaterial till förgasningsreaktorn där flyktiga komponenter drivs av och viss omvandling av kolåterstoden sker. Därefter leds det avkylda bäddmaterialet tillsammans med kolåterstod till pannan där kolet förbränns tillsammans med annat tillfört bränsle, se Figur 14. En sådan påkoppling av en extern reaktor ökar därmed flödet av icke flyktigt material till pannan och ökar andelen bränsle som förbränns i pannans bädd. Den ökade bäddtemperatur som detta leder till motverkas av den energiöverföring till förgasaren som sker i form av cirkulerande bäddmaterial.



Figur 14 Princip för integrerad FB förgasning med en FB panna.

5.4 MARKNADEN FÖR BIOGAS OCH NATURGAS

I detta avsnitt behandlas såväl biogas som naturgas, då produkterna är utbytbara med varandra och tillgången på naturgas i stort sett är oändlig.

För syntesgas finns ingen avsalumarknad. Gasen genereras på plats och möjligheten att lagra diskuteras mer under avsnitt 5.5.1.

5.4.1 Produktion och försäljning av biogas

I Sverige fanns det 2015 totalt 282 råbiogasanläggningar i Sverige. Dessa producerade totalt 1,95 TWh biogas fördelat på 140 avloppsreningsverk (39% av gasen), 60 deponier (9%), 40 gårdsanläggningar (3%), 35 samrötningsanläggningar (44%), 6 industrianläggningar (6%) och 1 förgasningsanläggning, Gobigas (2%). Det fanns 61 uppgraderingsanläggningar och 13 injektionsstationer där biogas injicerades på naturgasnätet.

Från den producerade biogasen gick 63% till uppgradering, 20% till värmeproduktion, 3% gick till elproduktion och 2% till industriell användning. 10% facklades och 1% gick till övrig användning och ytterligare 1% saknade data.

Sedan 2012 produceras i Sverige också flytande biogas, LBG (Liquefied BioGas), i Lidköping. Den totala LBG-produktionen uppgick år 2015 till 37 GWh och gick främst till transportsektorn.

De vanligaste råvarorna eller substraten för biogasproduktion är olika typer av avfall såsom avloppsslam, gödsel, källsorterat matavfall och avfall från slakteri- och livsmedelsindustrin (Energimyndigheten 2016).

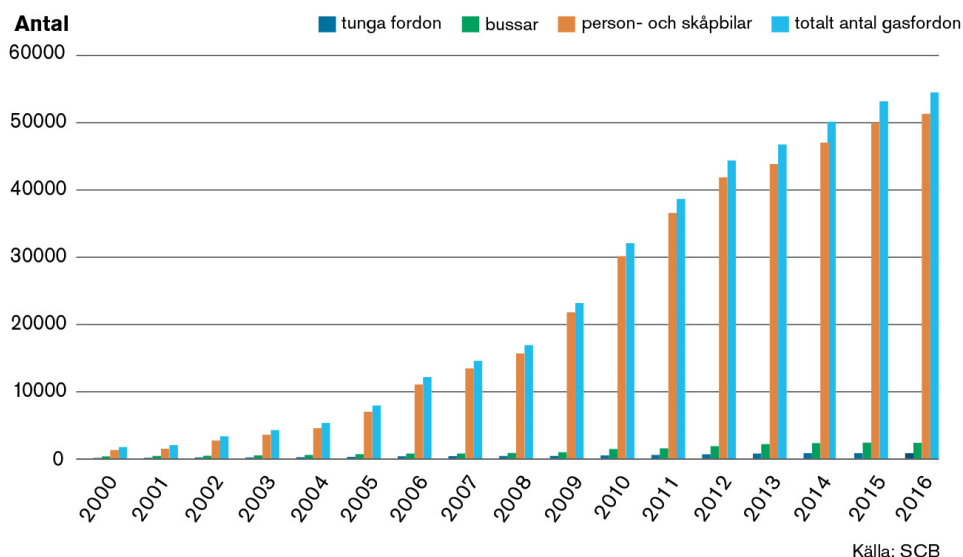
Det finns tre större produktionsanläggningar av biogas i Sverige. En i Skåne och en i Östergötland på ca 13 MNm³/år vardera och en nyligen invigd anläggning i Stockholm på 20 MNm³/år.

Försäljningen av biogas är främst lokal då biogas, även komprimerat, är dyrt att transportera, då ett lastbilsflak endast kan ta ca 3000-5000 Nm³ gas i komprimerad form. En lastbil med släp kommer då upp i ca 10000 Nm³ gas som motsvarar ca 11 m³ bensin. En motsvarande bil med släp med bensin eller diesel kan ta ca 50 m³. Transporten blir alltså ca fyra gånger dyrare med biogas än med bensin/diesel. Det finns därför också lokala gasnät för distribution av biogas med lågtrycksnät i vissa städer i Sverige.

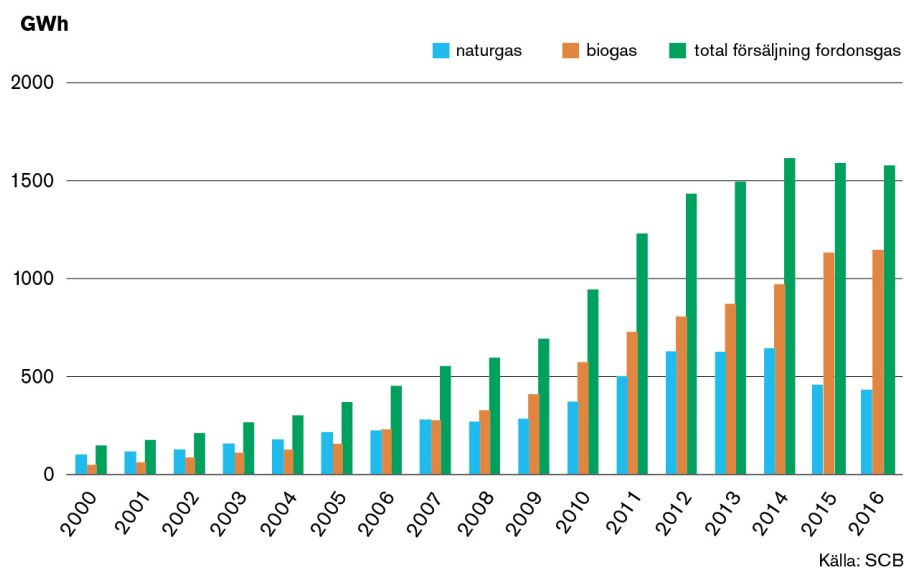
Efterfrågan på biogas är i dagsläget hög och tillgången är begränsad, men det skulle vara fullt möjligt för ett massa- och pappersbruk att köpa biogas på flak. Det skulle kräva en mottagningsstation för att ställa upp flaken. Möjligheten att köpa naturgas/metan är betydligt lättare och skulle kräva en tank för flytande naturgas med en tillhörande förångare. Tillgången på naturgas är helt obegränsad.

5.4.2 Fordonsmarknaden för biogas

I slutet av 2016 fanns det 54 439 gasfordon i Sverige. Av dessa var 2 331 bussar, 821 tunga fordon och resterande (51 287) personbilar och skåpbilar.



Figur 15 Antal olika fordon med biogasdrift i Sverige (Energigas Sverige 2017)



Figur 16 Utvecklingen av fordonsgasförsäljningen (Energigas Sverige 2017)

Försäljningen av fordonsgas har stagnerat de sista två åren, främst p.g.a. politiska tveksamheter i satsning på biogas för framtiden.

5.4.3 Framtida biogasmarknaden

I statliga utredningen "Fossilfrihet på väg" beräknas ett behov av 20 TWh biodrivmedel, där biogas tros kunna utgöra 12 TWh. Man bedömer också att intresset att använda biogas inom industrin ökar och att det 2030 skulle användas ca 3 TWh där. Totalt mål för användningen av biogas skulle då bli ca 15 TWh biogas till 2030 (Johansson 2013).

Tillgången på uppgraderad gas är idag 1,23 TWh (se 5.4.1) i konkurrens med andra nyttjare som bussbolag, taxi och privatbilister. Tillväxten de senaste 10 åren har bara varit ca 100 GWh/år, så om inga speciella åtgärder görs för att stimulera produktion och användande av biogas, kan man anta att det finns 1,73 TWh att tillgå om 5 år på marknaden. Dock kan kostnaden variera starkt beroende på avståndet till produktionsstället samt vilka konkurrerande konsumenter som finns.

5.4.4 Naturgasmarknaden

Som ersättning till biogas kan även naturgas användas. Naturgas är en organisk produkt som bildades i jordskorpan för flera miljoner år sedan genom förmultning av levande organismer. Naturgas består vanligen av 90-99% metan. Naturgas innehåller dessutom mindre mängder etan, propan, butan samt koldioxid och kväve.

Naturgas innehåller färre koltomer per energienhet än olja och kol. Därför bidrar naturgasen i mindre grad till växthuseffekten än vad kol, fossil olja och gasol gör. Naturgas släpper ut nästan 25 procent mindre koldioxid än olja och 10 procent mindre än gasol per samma energimängd.

Utsläpp av ämnen, som tungmetaller, svavel, kväveoxider, stoft och sot, är betydligt lägre från naturgas jämfört med kol, olja och biobränslen. Svavelhalten är i stort sett noll i naturgas. Endast en liten mängd svavel kommer från det svavelhaltiga luktmedel som tillsätts för att spåra gasen.

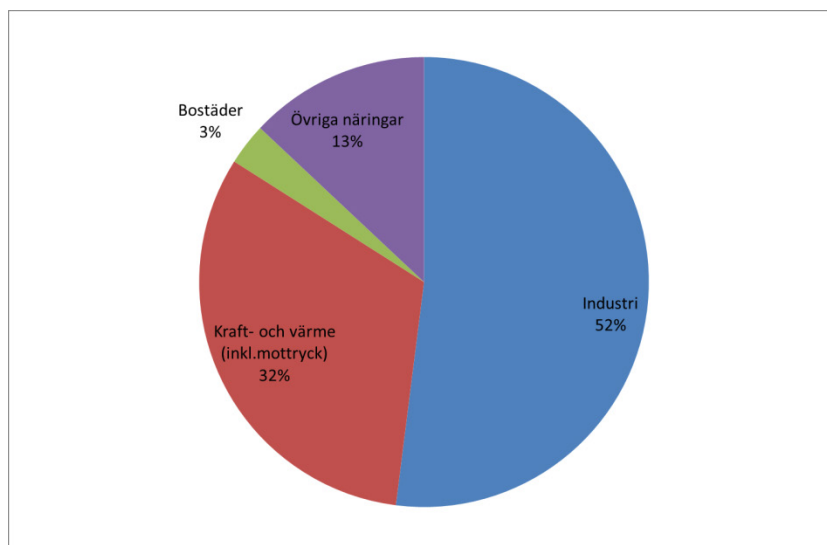
Naturgasen kan kylas ner till LNG (Liquified Natural Gas) vid -162°C och volymen minskar då ca 600 gånger, vilket är en stor transportfördel (Energigas Sverige).

Naturgasanvändningen i Sverige ligger på ca 12 TWh och har legat stilla på den nivån de senaste åren.



Figur 17 Försäljningen av naturgas i Sverige 2001-2016 (Källa: Energigas Sverige)

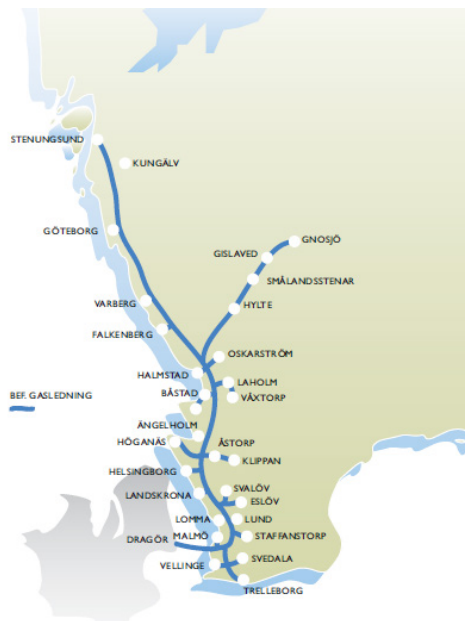
Användningen av ren naturgas sker främst inom industrin (ca 52%) och inom kraftvärme branschen som använder 32%.



Figur 18 Fördelning över naturgasanvändningen i Sverige 2016 (Källa: SCB)

5.4.5 Naturgasnätet

Naturgasen som kommer via ledningsnätet kommer för närvarande från den danska delen av Nordsjön och transiteras via det danska naturgasnätet till Sverige. Alla naturgasledningar i nätet är antingen under mark eller på havsbotten (mellan Danmark och Sverige).



Figur 19 Naturgasnätet i Sverige (Källa:Swedegas)

Svenska stamnätet sträcker sig från Dragör i Danmark till Stenungsund, fem mil norr om Göteborg. En avledare finns även in till Småland. Gasnätets längd är drygt 600 km inklusive grenledningar.

Längs gasnätet finns ett 40-tal mät- och reglerstationer. Från dessa stationer tillkommer mindre distributionsnät som vid ett lägre tryck distribuerar gasen vidare till slutförbrukare.

Det svenska gasnätet är byggt av stålrör med ett korrosionsskydd av polyeten samt ett aktivt korrosionsskydd för att säkerställa att rören inte rostar. Rören är klassade för ett gastryck på 80 bar. Dimensionen på rören är 600 mm från Danmark till Helsingborg och sedan 500 mm till Göteborg. Från Göteborg till Stenungsund är ledningen 400 mm i diameter. Rören i gasnätet är förlagda under mark med en minsta täckning på en meter. För att markera var ledningen går finns stolpar som utmärkning för detta.

I Europa finns ett mycket stort gasnät med tillförselledningar från gasfälten i Nordsjön, Ryssland och norra Afrika. De flesta europeiska länder har flera tillförselpunkter och är sammanlänkade med varandra.

5.4.6 Import av flytande naturgas

Det sker även mottagning av LNG (Liquified Natural Gas) i Sverige numera. Denna import sker med tankfartyg och sedan transporteras naturgasen flytande till slutförbrukaren med tankbilar. Den första importterminalen startades 2011 i Nynäshamn och hösten 2014 kom den andra i Lysekil. Det planeras nya terminaler i bl.a. Göteborg, Helsingborg och Gävle.

5.5 LAGRING

Lagring av metan är sedan länge kommersiellt tillgänglig teknik och lagring av komprimerad eller kondenserad gas tillämpas på många håll. Vad gäller lagring av syntesgas eller produktgas från förgasning finns betydligt mindre erfarenhet.

5.5.1 Lagring av produktgas från termisk förgasning

Produktgasens innehåll av de lågmolekylära gaserna CO och H₂ gör att lagring i flytande form kräver låga temperaturer och höga tryck. Vätgas har en låg ångbildningsentalpi vilket gör att förlusterna under lagring blir större än för exempelvis metan. Kostnaderna för flytande lagring har uppskattats till mellan 6-9 gånger högre än för trycksatt gaslagring (Apt et al. 2008).

Även om trycksatt gaslagring får anses mera relevant än flytande gaslagring gör den låga molekylvikten att energidensiteten blir låg. Den låga molekylvikten gör vidare att centrifugalkompressorer, som ofta används för naturgas, blir mindre lämpliga att använda och att deplacerande kompressorer såsom kolvkompressorer sannolikt är mera relevanta. Oavsett val av kompressortyp är den specifika energikostnaden för komprimering högre än för naturgas och biogas. Detta i kombination med en högre specifik kompressorkostnad och den lägre specifika lagringskapaciteten (som också medför högre kapitalkostnader) gör att lagring av produktgas från termisk förgasning är mindre ekonomiskt attraktivt än lagring av biogas.

Utöver tidigare nämnda utmaningar bör också beaktas de materialproblem (väteförspredning) som är förknippade med vätelagring, speciellt vid höga temperaturer eller i närvaro av vatten. Låg molekylvikt ökar dessutom risken för gasläckage.

5.5.2 Lagring av metangas

Metangas kan lagras i gasklockor utan komprimering, gasflaskor efter komprimering och på mobila flak i flaskor. Att lagra på flak innebär att man har ett större antal seriekopplade gasflaskor, ca 100, som ligger horisontellt på en container som enkelt kan lyftas av och på en lastbil för transport från produktionsstället till förbrukningsstället. Volymen brukar variera mellan 3000 och 5000 Nm³ gas på dessa flak och trycket är antingen 200 eller 250 bar. Lagring i gasflaskor stationärt och gasklockor går att dimensionera fritt och kräver bara stora ytor och givetvis kapital. Ett större stationärt lager som finns hos en biogasproducent i Sverige är på drygt 20000 Nm³.

Om gasen ska komprimeras utan att frysa måste den först torkas för att få bort vatten och svavel, och då krävs en tork.

Nedan finns en bild på hur ett gasflak kan se ut som används för att transportera uppgraderad biogas från produktionsställen till distributionsställen.



Figur 20 Lastbilsflak med gasflaskor, ett så kallat "flak".

5.6 TEKNISK OCH EKONOMISK POTENTIAL FÖR GASANVÄNDNING PÅ BRUKEN

I detta kapitel redovisas substrattillgång och produktionskapacitet av biogas. Vidare analyseras bränslebehov samt påverkan på brukets energibalans och barkpanna om egengenererad brännngas framställs genom termisk förgasning.

Nuvarande förbrukning av fossil brännngas samt andra fossila bränslen som skulle kunna ersättas av egengenererad gas redovisas i Tabell 14.

Tabell 14 Förbrukning av fossila bränslen vid exempelbruken

	Fossil gas [MWh/år]	Brännolja [MWh/år]	Drivmedel [MWh/år]
Bruk A	256	2 100	14 300
Bruk B	7 500	44 700	7 000
Bruk C	43 200	4 000	4 800
Bruk D	525	46 100	4 800

Denna fossilbränsleanvändning representerar en kostnad för exempelbruken som preliminärt kan uppskattas enligt nedanstående Tabell 15, baserad på följande kostnader:

- Fossil gas: 337 SEK/MWh, inkl. utsläppsrätter (50 SEK/ton)
- Brännolja: 280 SEK/MWh, inkl. utsläppsrätter (50 SEK/ton)
- Drivmedel: 1080 SEK/MWh, inkl. skatt på diesel (5,56 SEK/liter)

Tabell 15 Kostnad för fossila bränslen vid exempelbruken

	Fossil gas [kSEK/år]	Brännolja [kSEK/år]	Drivmedel [kSEK/år]
Bruk A	86	590	15 400
Bruk B	2 530	12 520	7 500
Bruk C	14 560	1 120	5 200
Bruk D	177	12 910	5 200

Den uppskattade mängden råbiogas som kan bildas under rätta betingelser uppskattas i nedanstående Tabell 16 och utgör sedan mängden som potentiellt kan nyttjas på respektive anläggning i denna rapport.

Tabell 16 Möjlig biogasproduktion baserad på slamrötning vid de olika exempelbruken

	Bioslamgas [MWh/år]	Fiberslamgas [MWh/år]	Total gasmängd [MWh/år]
Bruk A	4 089	304	4 393
Bruk B	4 832	16 080	20 912
Bruk C	2 726	12 920	15 646
Bruk D	2 602	2 280	4 882

5.6.1 Bruk A

De vid bruket tillgängliga substraten medger en biogasproduktion av omkring 4400 MWh/år, vilket med marginal täcker förbrukningen av fossilgas och brännolja internt på bruket, 2400 MWh/år. Eftersom metan är bättre lämpad för lagring än produktgas från förgasning så bedöms biogasproduktion vara den mest relevanta tekniklösningen. Utöver den processrelaterade förbrukningen kan också en del av drivmedelsbehovet, 14300 MWh/år, tillgodoses om vissa fordon köps in med gasdrift.

Lagring av komprimerad uppgraderad biogas kan som beskrivs i kapitel 5.5.2 göras i tryckflaskor och då krävs också en kompressoranläggning för detta. Att lagra rågas som buffert för användning som eldningsoljeersättning gör att CO₂-avskiljning kan undvikas, men detta kräver nästan dubbelt så stor lagringsvolym.

Ytterligare ett alternativ är att istället för att lagra biogasen mata den ut på naturgasnätet och sedan kan man återta den gasmängd som behövs i de olika applikationerna. Denna möjlighet kan passa bruk A, då den nationella gasledningen finns i närheten. Möjlighet till ekonomiska fördelar finns om producenten av biogas avtalsmässigt väljer att förbruka fossil naturgas. Ersättningen för levererad biogas blir då högre än för en lika stor mängd använd naturgas.

Investeringskostnaden för en biogasanläggning på 4400 MWh/år uppskattas till omkring 30 MSEK. Till detta kommer sedan kostnader för ett av alternativen nedan:

- Gaslager för lagring av 100 MWh metan. I detta alternativ behöver inte CO₂ avskiljas, då de aktuella applikationerna inte kräver gas av naturgaskvalitet. Den extra lagervolym detta kräver skall vägas mot besparingen till följd av

utebliven CO₂-avskiljning. Lagringsvolymen kostar ca 15 MSEK för den ouppgraderade gasen.

- Uppgradering av råbiogas samt kompressor för inmatning av metan till gasnätet, för ca 15 MSEK (exkl. anslutningskostnad).
- Uppgradering av råbiogas med kompressorer och lagring för fordonsdrift, ca 20 MSEK.

Om man bortser från hetvattenleveranser till intilliggande sågverk är den totala fossilbränsleförbrukningen (exkl. drivmedel) på bruket c:a 2400 MWh/år. Detta skulle, om förbrukningen var kontinuerlig, motsvara en förbrukning om endast knappt 300 kW. Dock är förbrukningen intermittent och kopplad till uppstart av barkpannan. Maximal effektförbrukning kan istället uppskattas till i storleksordningen 10 MW.

För termisk förgasning finns stora volymer bark tillgängliga och dessa räcker utan vidare för att ersätta brukets fossilbränsleanvändning. Eftersom gasen för detta förgasningsalternativ innehåller höga halter väte finns små reella möjligheter att lagra gasen för att jämma ut belastningsvariationer. Förgasaren behöver vara dimensionerad för mer eller mindre den maximala effekten, vilket gör att detta alternativ inte är kommersiellt genomförbart.

5.6.2 Bruk B

Vid sidan av ett gasolbehov för torkning samt krympugnar på 7,5 GWh/år motsvarande knappt 1 MW i medeleffekt, har bruket en förbrukning av lätt eldningsolja på ca 45 GWh/år för uppstart och som kapacitetsökande bränsle i barkpannan och mesaugnen.

De fabriksinterna strömmar som finns tillgängliga för gasgenerering består av bioslam och fiberslam. Mängden biogas som kan framställas från slammet är ca 21000 MWh/år, vilket skulle kunna ersätta nuvarande gasol användning samt ersätta behovet av diesel för interna transporter.

Kostnaden för en biogasanläggning (21 000 MWh/år) med efterföljande uppgradering och lagring av 200 MWh metan uppskattas till ca 95 MSEK. Till dessa kostnader ska läggas extra kostnader för fordonskonvertering till gas. En sådan investering ger möjlighet att eliminera kostnaden för den bruksinterna gasanvändningen samt drivmedel på ca 15 MSEK/år samt ger en försäljningsintäkt på ca 5 MSEK/år. Till detta ska även driftskostnader för den nya anläggningen läggas som försämrar vinsten något.

För ersättning av lätt eldningsolja kan termisk förgasning baserad på inköpt biomassa övervägas. Förgasarens effekt behöver då vara i storleksordningen 5 MW om man bortser från startbränsle i sodapanna som är svårt att täcka med hjälp av gas på grund av den mycket intermittenta effekten.

Möjligheterna att ersätta lättolja med gas från termisk förgasning är svårbedömd. Lättolja eldas idag på grund av dess höga prestanda (lågt specifikt rökgasflöde samt hög flamstrålning). Då rökgasflödet i barkpannan är kapacitetsbegränsande kommer det inte att fullt ut vara möjligt att ersätta olja med gas med bibehållen maxkapacitet. Inga interna strömmar finns tillgängliga för termisk förgasning.

Detta utgör inget avgörande hinder utan de tillkommande fastbränsleflöden som krävs för en förgasare bör vara fullt möjligt att köpa in i form av exempelvis grot.

Om det efter noggrannare utredning framkommer att prestandasänkningen vid övergång till produktgas är acceptabel bör ett enkelt system (med ingen eller mycket enkel gasrening) vara mest relevant.

När det gäller den termiska förgasningen uppskattas projektkostnaden för en 5 MW förgasningsanläggning (inkl. bränslesystem) utan tjärrening till ca 50-70 MSEK. Besparingen till följd av denna installation utgörs av skillnaden mellan olje- och fastbränslepris för 45 GWh/år. Denna besparing kan uppskattas till omkring 4 MSEK/år. En sådan investering är svår att motivera på ekonomiska grunder vid de nuvarande låga priserna på olja och utsläppsrätter. Användning av billigare bränsle såsom slam eller andra avfallströmmar, kan öka besparingspotentialen. Sådana bränslen kan dock medföra högre investerings-och/eller driftskostnader.

5.6.3 Bruk C

Det kontinuerliga fossilbränslebehovet uppgår till 43 GWh/år, motsvarande ca 5 MW i medeleffekt, till största delen bestående av gasol till torkkåpor. Förbrukningen av fossil olja är låg.

De tillgängliga substraten för biogasproduktion medger en produktion av omkring 15600 MWh/år, vilket innebär att egenproducerad biogas inte ensamt kan ersätta gasol som bränsle för påblåsningstorkarna, men skulle kunna utgöra en andel. Det är möjligt att använda biogas som ett komplementbränsle till gasol, eller köpa resterande energimängd som biogas.

Den tillgängliga gasströmmen är också möjlig för transportbehovet som uppgår till 4800 MWh/år och det finns då också en möjlighet att sälja ett biogasöverskott på den externa marknaden.

Som tidigare beskrivits är de tekniska förutsättningarna för att ersätta gasol med gas från termisk förgasning goda. Den aktuella förgasareffekten är lämplig för ett flertal förgasningskoncept, både fristående och integrerade med fastbränslepannan. Gasol för papperstorkning uppvisar ett betydligt jämnare effektuttag än start- och lastoljebrännare som tidigare diskuterats.

Den mindre mängd lättolja som förbrukas som startbränsle för sodapannan är svårare att ersätta med gas på grund av högt intermittent effektuttag. Stödbränsle för gasdestruktion är däremot fullt möjligt att ersätta ur ett tekniskt perspektiv.

Ett antal alternativ är därmed relevanta:

1. Biogas som gasolersättning i torkkåpor
Kostnaden för en biogasanläggning samt distributionssystem för råbiogasen, anpassning av brännare etc. kan uppskattas till 80 MSEK. Besparingen utgörs av ca 15000 MWh gasol motsvarande ca 5 MSEK.
2. Termisk produktgas som gasolersättning i torkkåpor
Projektkostnaden för en fristående termisk förgasningsanläggning (inkl. bränslesystem) samt efterföljande gasrening samt konvertering av brännare m.m. kan uppskattas till omkring 100 MSEK. Besparingen till följd av denna installation utgörs av skillnaden mellan gasol- och fastbränslepris för 43 GWh/år. Denna besparing kan uppskattas till omkring 6 MSEK/år. Kostnaden för en anläggning baserad på en förgasningsreaktor integrerad i fastbränslepannan såsom beskrivet i kapitel 5.3 kan möjligen medge lägre investeringskostnad, men denna teknik är ännu på utvecklingsstadiet. Billigare bränsle kan öka besparingspotentialen.

5.6.4 Bruk D

Potentialen för biogasproduktion genom att röta slam uppgår till omkring 4900 MWh/år, vilket innebär att biogas inte kan ge något substantiellt bidrag för att ersätta eldningsoljan som används till mesaugnen. Dock kan biogasen vara ett alternativ för de interna transporter där behovet är 4800 MWh/år. En biogasanläggning för slammet kostar ca 30 MSEK och en uppgradering av råbiogas med kompressorer och lagring för fordonsdrift, skulle kosta ytterligare ca 20 MSEK, d.v.s. 50 MSEK totalt.

Förutom en mindre förbrukning av gasol för fackling av gaser samt som reservbränsle för mesaugnen utgörs fossilbränsleanvändningen av EO3 som stödbränsle i mesaugnen. Denna användning av eldningsolja uppgår på årsbasis till omkring 46 GWh, motsvarande knappt 6 MW i genomsnitt.

Vad gäller EO3 till mesaugnen är ersättning av olja med termiskt producerad gas oproblematisk ur effektperspektiv. De låga kraven på gasrenhet i den aktuella applikationen möjliggör ett enkelt processkoncept. Dock finns en osäkerhet vad gäller ugnens kapacitet vid övergång till gas då både specifika avgasflöden och flamstrålningskaraktistik kan komma att ändras i ogynnsam riktning.

Investeringskostnaden för en termisk förgasningsanläggning är samma som den som indikerades för bruk B ovan, d.v.s. omkring 50-70 MSEK. Besparingen till följd av denna installation utgörs av skillnaden mellan olje- och fastbränslepris för 46 GWh/år. Denna besparing kan uppskattas till omkring 4 MSEK/år. Billigare bränsle kan öka besparingspotentialen.

5.7 DRIFTSERFARENHETER

Drifterfarenheterna från ett stort antal förgasningsanläggningar har undersökts inom ramen för Energiforsk (f.d. Värmeforsk) (Ekbom et al. 2014). Urvalet av undersökta anläggningar i denna rapport gjordes så att flera olika tekniska koncept såsom fast bädd och fluidiserad bädd och suspensionsreaktorer, skulle omfattas.

Med en skala och applikation som är relevant för denna studie så undersöktes bl.a. följande installationer:

- Värö (Sverige): Götaverken
30 MW (bränsle) CFB-förgasning av bark för mesaugn
- Harboøre (Danmark): Babcock & Wilcox Völund
5 MW (bränsle) fastbäddsförgasare (träflis) för gasmotordrift
- Güssing (Österrike): Repotec
8 MW (bränsle). Kommunikerande bäddförgasare (flis, pellets, bark) för gasmotordrift (samt drivmedel i forskningsskala)
- Kokemäki (Finland): Condens OY
6,1 MW (returträ). Motströmsförgasare (pellets+bark) för gasmotordrift.
- Oberwart (Österrike): Ortner Anlagebau
8,5 MW (bränsle). Kommunikerande bäddförgasare (träbränsle) för gasmotordrift
- Villach (Tyskland): Ortner Anlagebau
15 MW (bränsle). Kommunikerande bäddförgasare (träflis) för gasmotordrift
- Senden/Ulm (Tyskland): Repotec
14,5 MW (bränsle). Kommunikerande bäddförgasare (träflis) för gasmotordrift.
- Hortlax, Piteå (Sverige). Meva
4,5 MW (Bränsle). Suspensionsförgasare (träpellets) för gasmotordrift.

Rapportförfattarna slog fast att system med enstegsförgasare utan avancerad gasrening kan uppnå hög driftssäkerhet. För känd teknologi kan hög tillgänglighet uppnås kort efter start, medan ny teknik (inkl. nya reaktorkoncept eller betydande uppskalning) kan resultera i låg tillgänglighet under ett eller flera år.

Utöver ovanstående anläggningar kan nämnas några företag vars tekniker inte finns representerade i rapporten av Ekbom et al. (2014):

- IQR
IQR är ett svenskt företag som tillverkar fastbäddsförgasare. Företaget har två förgasare för returträ (Svenljunga+Munkfors) som fungerar som ett försteg till efterföljande panna.
- Cortus
Det svenska företaget Cortus har under våren 2017 tillsammans med medintressenter tagit beslut om att bygga en 6 MW förgasare vid Höganäs för produktion av brännngas till ugnar.
- Dahlman
Det tyska företaget Dahlman saluför Milenaförgasaren utvecklad vid ECN i Nederländerna.
- Xylowatt
Det belgiska företaget Xylowatt utvecklar och saluför anläggningar baserade på medströms fastbäddsförgasare.

6 Diskussion

Denna studie har i huvudsak baserats på litteraturredata och publikt tillgänglig information. Inga leverantörsdiskussioner har förts och inga anbud eller företags-/produktspecifika data har insamlats. Detta innebär att det finns osäkerheter i resultaten i synnerhet vad gäller kostnadsuppskattningar.

I denna studie har fyra olika typbruk studerats. Även om resultaten för dessa kan tjäna som vägledande för andra likartade bruk är förutsättningarna för gasproduktion specifika för olika anläggningar. Anläggningsspecifika studier krävs för att mer i detalj kunna prognosticera den exakta potentialen.

Möjligheten till att nyttja slammängder, både fiber- och bioslam, för rötning till råbiogas bedöms generellt som goda. Dock är näringstillgången viktig och processen kräver stabila förhållanden. Det finns idag ingen anläggning som rötar både bioslam och fiberslam och även om denna kombination uppvisar hög potential kan visst utvecklingsarbete förutses innan sådana anläggningar är kommersiellt etablerade.

Storskalig förgasning i syfte att producera biodrivmedel skulle kunna medge synergier med bruksintern gasanvändning, då restgaser från sådana större förgasningsanläggningar skulle kunna utnyttjas istället för små dedikerade förgasningsanläggningar. Sådana energikombinat har dock inte studerats i detta arbete.

7 Slutsatser

Ersättning av fossila bränslen med egenproducerad gas i massa- och pappersindustrin, såsom undersökt i denna rapport, är tekniskt möjligt. Bäst potential för ersättning med gas finns i de fall den nuvarande fossilbränsleanvändningen är mer eller mindre kontinuerlig. Bäst tekniska förutsättningar för en övergång till egengenererad gas finns för påblåsningstorkar för pappers- eller massatorkning, då det i dessa applikationer inte finns något beroende av flammans strålningsegenskaper. För mesaugnar och andra applikationer där flamstrålning står för en del av värmeöverföringen kan en övergång till gas medföra en mindre kapacitetssänkning. Likaså har vanligen egenproducerad gas något högre specifika avgasflöden än naturgas och olja, vilket kan medföra en kapacitetsbegränsning för en panna.

Även om all fossilbränsleanvändning skulle kunna konverteras till egengenererad gas rent tekniskt så finns klara ekonomiska begränsningar i de fall bränsleanvändningen är intermitterande och med höga momentana effektbehov, exempelvis när det gäller startbrännare. Även i de fall en kontinuerlig gasanvändning finns och de tekniska förutsättningarna är goda, är de rent ekonomiska förutsättningarna tveksamma vid nuvarande låga priser på fossil gas och olja. De styrmedel som finns inom massa- och pappersindustrin, skatter och utsläppsrätter, ger även de i dagsläget svaga incitament till en etablering av gasproduktion för intern användning.

Ersättning av fossila bränslen kan vara intressant av andra orsaker än ren kostnadsbesparing, och andra värden förknippade med fossilfri produktion såsom goodwill kan motivera fortsatt arbete med projekt syftande till gasproduktion av organiska restprodukter från bruken.

För produktion av drivmedel till egen fordonsflotta så är biogasproduktion via anaerob rötning den mest relevanta tekniken. I synnerhet kan detta alternativ övervägas då en avloppsreningsanläggning står inför ombyggnad av andra orsaker t ex. kapacitetsutbyggnad och ändrade tillstånd.

Nomenklatur

Biogas: Råbiogas som uppgraderats genom att avskilja större delen av koldioxiden. Biogas kallas också biometan.

Biometan: Metan framställd ur förnybar råvara antingen genom rötning eller genom förgasning och efterföljande metanisering.

Bio-SNG: SNG framställd genom förgasning av biomassa (SNG kan också framställas ur t.ex. stenkol) – kallas också biometan. Se även SNG.

CBG: Compressed Biogas. Komprimerad biogas.

CNG: Compressed Natural Gas, Komprimerad naturgas, d.v.s. naturgas som förvaras under högt tryck, t.ex. i gastuber.

DME: Dimetyleter. Gasformig energibärare som kan framställas av syntesgas.

Fordonsgas: Energigas huvudsakligen bestående av metan (omkring 97%) där fordonsgasbranschen i Sverige gemensamt åtagit sig att minst 50 volymprocent av den gas som säljs på publika tankstationer är framställd av förnybara råvaror. Återstoden utgörs av naturgas.

Förgasning: Process där organiskt material vid förhöjd temperatur får reagera med en kontrollerad mängd oxidationsmedium (t.ex. syre och/eller vattenånga), och därmed i huvudsak omvandlas till kolmonoxid, vätgas och metan. Processen äger vanligen rum nånstans i intervallet 500–1400°C. Beroende på betingelser vid förgasningen erhålls olika sammansättning på syntesgasen. Som oxidationsmedel kan också koldioxid användas.

Gasol: Gasol är ett svenskt handelsnamn för ett gasformigt bränsle som består av lätta kolväten som propan och butan.

LBG: Liquefied Biogas. Vätskeformig biogas. Vid atmosfärstryck kondenserar metan vid –163°C.

LFG: Landfill Gas. Deponigas.

LHV: Lower Heating Value.

LNG: Liquefied Natural Gas, Vätskeformig naturgas. Vid atmosfärstryck kondenserar metan vid –163°C.

Råbiogas: Uppgraderad biogas. Biogas som bildas vid rötningen och kan innehålla 50-80% metan och resterande mängd är koldioxid

Rötning: Process varvid mikrober utan lufttillträde bryter ner organiskt material. Vid rötning bildas bl.a. metan, men gasen innehåller också andra ämnen.

SNG: Substitute/Synthetic Natural Gas. Substitut för/ Syntetisk naturgas, d.v.s. metan framställd genom en kemisk process.

Stadsgas: Stadsgas är en rörledningsdistribuerad energigas som idag bara finns i Stockholm. Den består där av en blandning av metan (53–55%) och luft (45–47%), där metanet kommer från naturgas eller biogas.

Uppgradering: Rening av biometan till sådan kvalitet som motsvarar traditionell naturgas och därmed kan användas tillsammans med detta. Främst koldioxid och svavelföreningar renas bort vid uppgraderingen.

Referenser

- Andersson, J. et al., 2013. *System Studies on Biofuel Production Via Integrated Biomass Gasification*, Available at: www.f3centre.se.
- Apt, J. et al., 2008. *An Engineering-Economic Analysis of Syngas Storage*, Available at: [https://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/Final Report- Engineering-Economic Analysis of Syngas Storag.pdf](https://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/Final%20Report-Engineering-Economic%20Analysis%20of%20Syngas%20Storage.pdf).
- Berg, A., Karlsson, A. & Nilsson, F., 2011. Utvärdering av samrötningspotential för bioslam från massa-/pappersbruk.
- Björn, A. et al., 2015. *Biogasproduktion inom svensk pappers- och massaproduktion: Syntes av möjligheter och begränsningar samt teknisk utvärdering*,
- Carlsson, M. & Uldal, M., 2009. Substrathandbok för biogasproduktion. Sgc, nr 200.
- Davidsson, Å., 2007. *Increase of Biogas Production at Wastewater Treatment Plants Addition of urban organic waste and pre-treatment of sludge*. Lund University. Available at: <http://lup.lub.lu.se/record/547873>.
- Dåverhög, M. & Balmér, P., 2008. *Ultraljudsbehandling, en kostnadseffektiv metod för att öka gasproduktionen och minska mängden slam? Rapport, Svenskt Vatten Utveckling Rapport 2008:02*,
- Ekbom, T., Rensfelt, E. & Lindman, E., 2014. Drifterfarenheter från förgasningsanläggningar av biobränslen för kraftvärmeproduktion och industriella tillämpningar.
- Ekstrand, E.M. et al., 2016. High-rate anaerobic co-digestion of kraft mill fibre sludge and activated sludge by CSTRs with sludge recirculation. *Waste Management*, 56, pp.166–172. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.034>.
- Energigas, S., Naturgas och Miljön. Available at: <http://www.energigas.se/fakta-om-gas/naturgas/naturgas-och-miljoen/>.
- Energimyndigheten, 2016. Produktion och användning av biogas och rötrestes år 2015. Available at: <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2016/es-2016-04-produktion-och-anvandning-av-biogas-och-rotrester-ar-2015.pdf>.
- Eriksen, M.W.L. et al., 2014. "Dusty " vs . " Clean " Tar Reforming of Biomass Gasification Gas – An Operational Point of View. In *6th International Freiberg Conference on IGCC & Xtl Technologies*.
- Grace, T.M., Malcolm, E.W. & Kocurek, M.J. eds., 1989. *Alkaline pulping (Pulp and paper manufacture series, volume 5)* 3rd ed.,
- Granström, K., 2005. *Emissions of volatile organic compounds from wood*. University of Karlstad.
- Gustavsson, C. & Hultberg, C., 2016. Co-production of gasification based biofuels

- in existing combined heat and power plants – Analysis of production capacity and integration potential. *Energy*, 111, pp.830–840.
- Gustavsson, C. & Nilsson, L., 2014. Syngas as additional energy carrier in the pulp and paper industry: A mill-wide systems analysis of a combined drying concept, utilizing on-site generated gas and steam. *Energy&Fuels*, 28, pp.5841–5848.
- Güell, B.M., Sandquist, J. & Sorum, L., 2011. Gasification of biomass to second generation biofuels: A review. In *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*. pp. 1–11.
- Han, J. & Kim, H., 2008. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), pp.397–416. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106001146> [Accessed December 13, 2013].
- Held, J., 2011. *Förgasning - Status och teknik*,
- Held, J., 2013. *Small and medium scale technologies for bio-SNG production*, Available at: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC281.pdf%5Cnwww.sgc.se>.
- Heyne, S., Liliedahl, T. & Marklund, M., 2013. *Biomass gasification - A synthesis of technical barriers and current research issues for deployment at large scale. Report No 2013:5, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels and Foundation, Sweden.*,
- Higman, C. & van der Burgt, M., 2008. *Gasification 2:nd ed.*,
- Hoyer, K. et al., 2016. *Biogas upgrading – technical review*, Available at: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19712/biogas-upgrading-technical-review-energiforskrapport-2016-275.pdf>.
- Isaksson, J., 2015. *Biomass gasification-based biorefineries in pulp and paper mills - Greenhouse gas emission implications and economic performance*.
- Jannasch, A.-K., Ragnar, M. & Rissler, J., 2015. *Gasification for Bio-SNG production adjacent to an existing forest industry*,
- Johansson, T.B., 2013. *SOU 2013:84 Fossilfrihet på väg*,
- Jordbruksverket, 2015. *Rapport 2015:23 Biogasdrift i arbetsmaskiner*,
- Larsson, A., 2014. *Fuel conversion in a dual fluidized bed gasifier*. Chalmers University of Technology.
- Larsson, H. & Nodin, S., 2013. *SGC 263: Compact and efficient gas-IR dryer for drying of paper and board*,
- Linné, M. et al., 2008. *Den svenska biogaspotentialen från inhemska råvaror, rapport 2008:02*,
- Maniatis, K. & Beenackers, A.A.C.M., 2000. Tar Protocols. IEA Bioenergy Gasification Task: Introduction. *Biomass and Bioenergy*, 18(1), pp.1–4.

- Niklasson, K., 2013. *Förgasning av biomassa: Processmodellering för gassammansättning och reaktordimensionering. Examensarbete KAU,*
- Nilsson, L. et al., 2016. *Report Energiforsk 2016:231 Fossil Free Tissue Drying,*
- Odhner, P.B. et al., 2012. Biogas From Lignocellulosic Biomass. *Avfall Sverige*, pp.1–55. Available at:
<http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/U2012-07.pdf>.
- Parawira, W. et al., 2008. Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass & Bioenergy*, 39(38).
- Rodin, J. & Wennberg, O., 2010. *Förgasning för bränsleproduktion i stor- och småskaliga energikombinat,*
- Sverige, E., 2017. Fordonsgasutvecklingen i Sverige. Available at:
<http://www.energigas.se/fakta-om-gas/fordonsgas-och-gasbilar/statistik-om-fordonsgas/>.
- Truong, X.-B. et al., 2010. Optimering och teknisk/ekonomisk utvärdering av biogasproduktion från bioslam från massa-/pappersbruk.
- Tunå, P. et al., 2012. Synergies from combined pulp&paper and fuel production. *Biomass and Bioenergy*, 40, pp.174–180.
- Woolcock, P.J. & Brown, R.C., 2013. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*, 52, pp.54–84. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.036>.

BIO- OCH PRODUKTGAS I MASSA- OCH PAPPERSBRUK

Det finns goda tekniska förutsättningar för att ersätta fossila bränslen i ett massa- eller pappersbruk genom att producera egen energigas. Genom rötning eller termisk förgasning kan restströmmar i form av bio- och fiberslam omvandlas till gas. Den gas som produceras kan ersätta olika fossila bränslen samtidigt som vattenreningen på bruket kan avlastas avsevärt.

Att ersätta fossil energi i påblåsningstorkar för pappers- och massatorkning har den största potentialen. För användning i mesaugnar och i andra tillämpningar där flamstrålning är viktig, kan en övergång till gas medföra en kapacitetsminskning. Det är dessutom lättare att ersätta fossil energi med egenproducerad gas i applikationer där användningen är mer komplex och kräver en relativt kontinuerlig tillförsel av energi, exempelvis i startbrännare.

Med nuvarande låga priser på fossil gas och olja är den direkta ekonomiska lönsamheten med biogas begränsad. Omställningen till fossilfri tillverkning kan vara intressant ur andra perspektiv än rent ekonomiska till exempel för företags goodwill och marknadsföring. Det motiverar ett fortsatt arbete i ämnet.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk