



# **SVENSK SAMMANFATTNING av SGC Rapport 270:** **Biogas upgradering – Review of commercial technologies**

**(Biogasuppgradering – Granskning av kommersiella tekniker)**

**Fredric Bauer, Christian Hulteberg, Tobias Persson, Daniel Tamm**

*"Catalyzing energygas development  
for sustainable solutions"*



## Förord

Denna rapport är en svensk sammanfattning av publikationen "SGC Rapport 2013:270 Biogas upgradering – Review of commercial technologies". För mer detaljerad beskrivning och referenser hänvisas till denna engelska version av rapporten. Rapporten har skrivits av fyra författare som har expertis inom olika områden.

*Christian Hulteberg och Fredric Bauer, Hulteberg Chemistry & Engineering*  
Hulteberg Chemistry & Engineering är ett företag verksamt inom utveckling av nya kemitekniska processer, såsom amin skrubbing av gasflöden och teknisk-ekonomisk utvärderingar av ny teknik. Christian Hulteberg har en doktorsexamen i kemiteknik och Fredric Bauer har en civilingenjörsexamen i hållbara energisystem.

*Tobias Persson, Svenskt Gastekniskt Center*  
Tobias Persson har en bakgrund som processingenjör på Malmberg Water och har en doktorsexamen inom membranteknik. Genom SGC är han ansvarig för arbetet med fokus på biogas uppgärdering inom IEA Bioenergy Task 37.

*Daniel Tamm, BioMil*  
BioMil har arbetat med biogasprojekt i mer än 30 år. Daniel Tamm har erfarenhet av såväl rötningsprocessen som olika gasuppgärderingstekniker och har arbetat med gasuppgärdering på både den tyska och svenska biogasmarknaden.

Flera företag har bidragit till projektet med naturabidrag och lämnat värdefull information och dataunderlag som har använts under skrivandet av rapporten. Utan bidraget från dessa företag, skulle rapporten inte varit möjligt att skriva. Tack alla så mycket!

Projektet har genomförts under 2012 med en referensgrupp kopplad till projektet bestående av:

### **Participant**

Andreas Dahlner  
Richard Faber  
Benjamin Fillion  
Håvard Fjeldvær  
Liisa Fransson  
Gunnar Hagsköld  
Jürgen Jacoby  
Ulf Jonsson  
Lars-Evert Karlsson  
Lars Kjellstedt  
Torben Kvist  
Jing Liu  
Juha Luostarinen  
Daniel Sandell  
Max Strandberg

### **Company**

Econet Vatten och Miljö  
Vattenfall  
Air Liquide  
MemfoAct  
Lunds Energi  
Vafab Miljö  
Vattenfall  
Greenlane Biogas  
Purac Puregas  
Kjellstedt Consulting Boden  
Dansk Gasteknisk Center  
Bioprocess Control  
Metener Oy  
Malmberg Water  
Purac Puregas



## Innehållsförteckning

1	Introduktion.....	5
1.1	Existerande biogasuppgraderingsanläggningar .....	5
1.2	Tillverkare av anläggningar för uppgradering av biogas.....	6
2	Beskrivning av de kommersiella uppgraderingsteknikerna.....	9
2.1	Aminskrubber.....	9
2.2	Pressure swing adsorption (PSA) .....	10
2.3	Membranseparation .....	11
2.4	Vattenskrubber.....	12
2.5	Organisk fysisk skrubber.....	13
3	Jämförelse mellan de olika teknikerna.....	15
3.1	Separation av koldioxid och föroreningar .....	15
3.2	Driftkostnader.....	15
3.3	Metanförlust .....	17
3.4	Investeringskostnad .....	17
3.5	Gaskompression .....	18
4	Flytande biogas .....	21
5	Småskalig biogasuppgradering .....	22



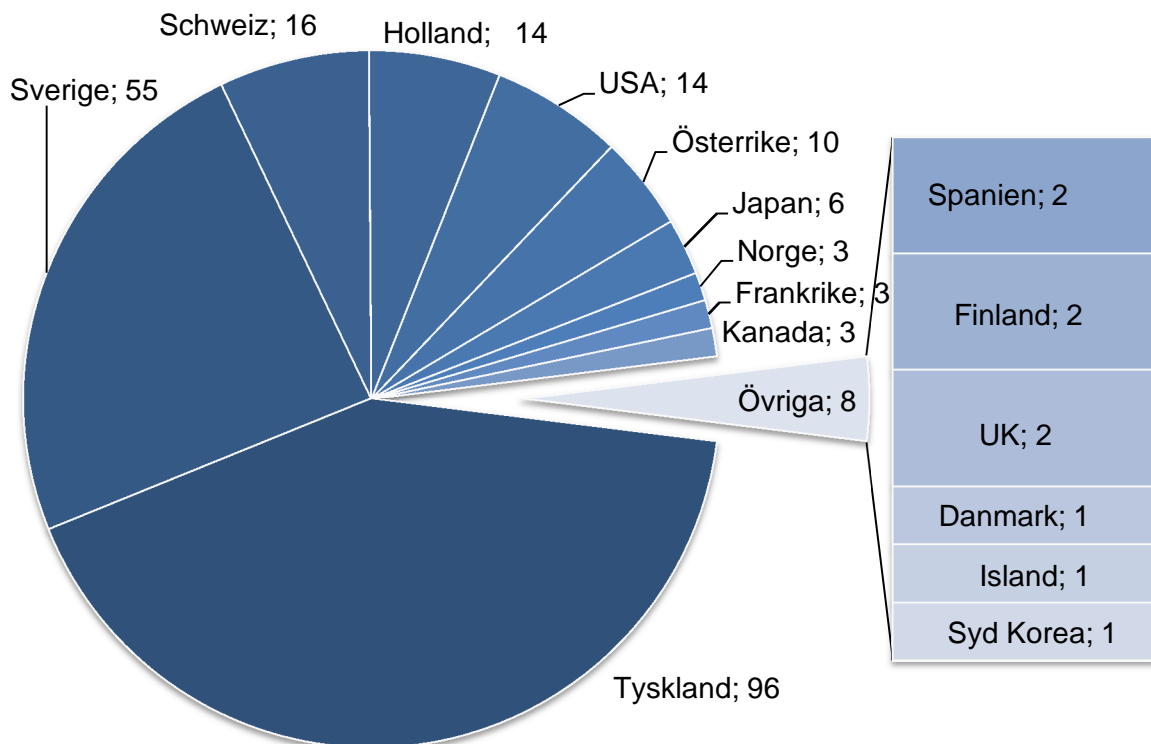


## 1 Introduktion

Biogas anses ofta vara det bästa alternativa fordonsbränslet, men för att kunna användas som fordonsbränsle måste rågasen uppgraderas för att uppfylla specifikationerna som definieras i den svenska standarden (SS 15 54 38). Biogas har uppgraderats i Sverige sedan slutet av 1990-talet och i Sverige finns idag 55 biogasuppgraderingsanläggningar. Uppgraderingstekniken har utvecklats mycket sedan 90-talet och nya aktörer har tillkommit på marknaden. Några exempel på tekniker som har utvecklats mycket de senaste åren är membrantekniken ochaminskrubbern. Dessutom får kondensering av biogas till LBG (flytande biogas) allt större uppmärksamhet nu när den första svenska fullskaliga anläggningen tagits i drift i Lidköping.

### 1.1 Existerande biogasuppgraderingsanläggningar

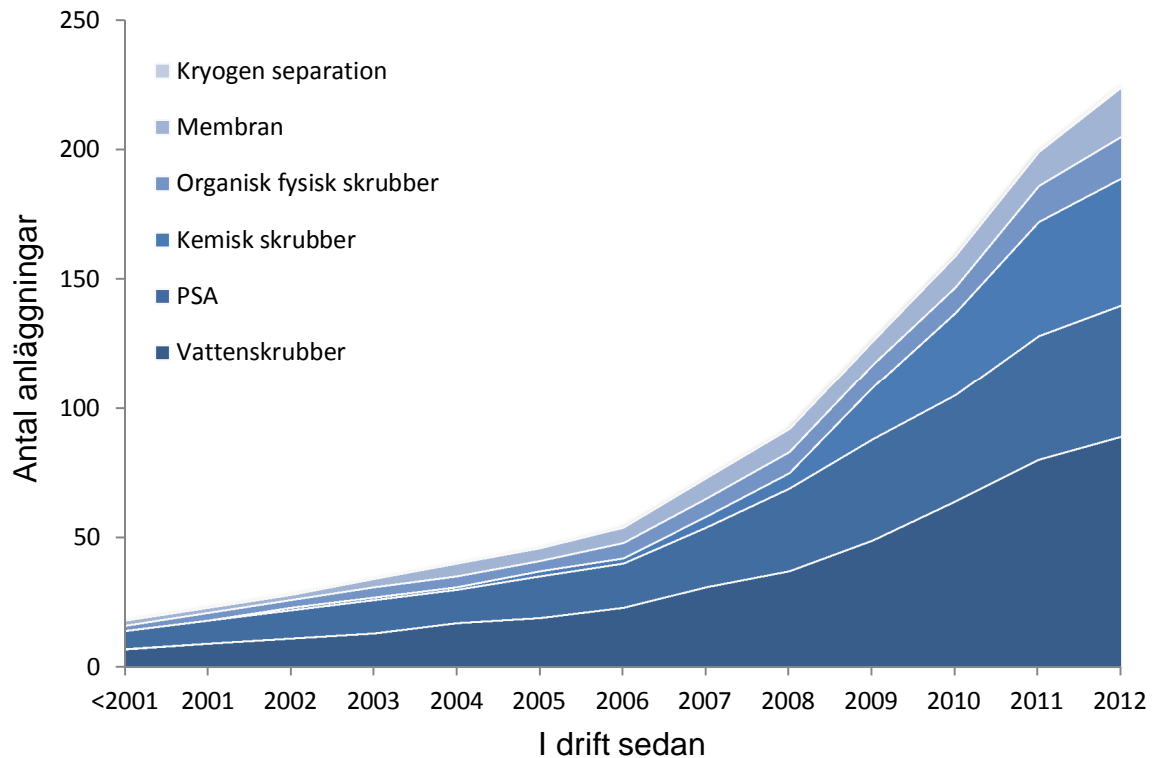
Enligt den information som offentliggjorts av IEA Bioenergy Task 37 finns fler än 220 anläggningar för uppgradering av biogas i drift i världen idag. I Figur 1 kan man se att de flesta av uppgraderingsanläggningarna finns i Tyskland och Sverige. Därefter följer ett flertal länder med färre än 20 uppgraderingsanläggningar vardera. Även om detta är den mest uppdaterade listan som finns tillgänglig, så kan information om vissa enheter saknas (IEA Bioenergy Task 37 2012)



Figur 1: Den geografiska lokaliseringen av de 221 biogasuppgraderingsanläggningar som identifierats inom IEA Bioenergy Task 37.



Figur 2 visar den teknik som används av de uppgraderingsanläggningar som är i drift i dag samt vilket år de togs i drift. Fram till 2008 var det främst vattenskrubber och PSA-anläggningar som dominerade marknaden, men därefter har kemiska skrubbrar och i mindre utsträckning även membranläggningar ökat sina marknadsandelar. Huvuddelen av de kemiska skrubbrarna är aminskrubbrar, men andra kemiska skrubbrar ingår också i denna kategori.



Figur 2 Illustration av de tekniker som används för biogasuppgradering samt vilket år de olika anläggningarna togs i drift. Endast anläggningar som är i drift idag är inkluderade i listan. Data från IEA Task 37.

## 1.2 Tillverkare av anläggningar för uppgradering av biogas

Antalet tillverkare av anläggningar för uppgradering av biogas ökar för varje år och listan som visas i den här rapporten omfattar endast de som var kända av författarna när rapporten publicerades. Tabell 1 till 7 visar tillverkare av uppgraderingsenheter, sorterade efter teknik.





Tabell 1 Tillverkare av PSA anläggningar

Company	Homepage
Acrona-systems	<a href="http://www.acrona-systems.com">www.acrona-systems.com</a>
Carbotech	<a href="http://www.carbotech.info">www.carbotech.info</a>
Cirmac	<a href="http://www.cirmac.com">www.cirmac.com</a>
ETW Energietechnik	<a href="http://www.etw-energy.com">www.etw-energy.com</a>
Guild	<a href="http://www.moleculargate.com">www.moleculargate.com</a>
Mahler	<a href="http://www.mahler-ags.com">www.mahler-ags.com</a>
Strabag	<a href="http://www.strabag-umweltanlagen.com">www.strabag-umweltanlagen.com</a>
Xebec	<a href="http://www.xebecinc.com">www.xebecinc.com</a>

Tabell 2 Tillverkare av vattenskrubbar

Company	Homepage
DMT	<a href="http://www.dmt-et.nl">www.dmt-et.nl</a>
Econet	<a href="http://www.econetgroup.se">www.econetgroup.se</a>
Greenlane Biogas	<a href="http://www.greenlanebiogas.com">www.greenlanebiogas.com</a>
Malmberg Water	<a href="http://www.malmberg.se">www.malmberg.se</a>
RosRoca	<a href="http://www.rosroca.com">www.rosroca.com</a>

Tabell 3 Tillverkare av kemiska skrubbar

Company	Homepage
BIS E.M.S. GmbH	<a href="http://www.ems-clp.de">www.ems-clp.de</a>
Cirmac	<a href="http://www.cirmac.com">www.cirmac.com</a>
Hera	<a href="http://www.heraclean-tech.com">www.heraclean-tech.com</a>
MT-Biomethan	<a href="http://www.mt-biomethan.com">www.mt-biomethan.com</a>
Purac Puregas	<a href="http://www.lackebywater.se">www.lackebywater.se</a>
Strabag	<a href="http://www.strabag-umweltanlagen.com">www.strabag-umweltanlagen.com</a>

Tabell 4 Tillverkare av organiska fysiska skrubbar

Company	Homepage
HAASE Energietechnik	<a href="http://www.haase.de">www.haase.de</a>
Schwelm Anlagentechnik	<a href="http://www.schwelm-at.de">www.schwelm-at.de</a>



*Tabell 5 Tillverkare av membranläggningar*

<b>Company</b>	<b>Homepage</b>
Air Liquide	<a href="http://www.airliquide.com">www.airliquide.com</a>
BebraBiogas	<a href="http://www.bebra-biogas.com">www.bebra-biogas.com</a>
Biogast	<a href="http://www.biogast.nl">www.biogast.nl</a>
Cirmac	<a href="http://www.cirmac.com">www.cirmac.com</a>
DMT	<a href="http://www.dmt-et.nl">www.dmt-et.nl</a>
Eisenmann	<a href="http://www.eisenmann.com">www.eisenmann.com</a>
EnviTec Biogas	<a href="http://www.envitec-biogas.com">www.envitec-biogas.com</a>
Haffmans	<a href="http://www.haffmans.nl">www.haffmans.nl</a>
Gastechnik Himmel	<a href="http://www.gt-himmel.com">www.gt-himmel.com</a>
Mainsite Technologies	<a href="http://www.mainsite-technologies.de">www.mainsite-technologies.de</a>
Memfoact	<a href="http://www.memfoact.no">www.memfoact.no</a>
MT-Biomethan	<a href="http://www.mt-biomethan.com">www.mt-biomethan.com</a>

*Tabell 6 Tillverkare av kryogena anläggningar*

<b>Company</b>	<b>Homepage</b>
Acion Technologies	<a href="http://www.acion.com">www.acion.com</a>
Air Liquide	<a href="http://www.airliquideadvancedtechnologies.com">www.airliquideadvancedtechnologies.com</a>
Cryostar	<a href="http://www.cryostar.com">www.cryostar.com</a>
FirmGreen	<a href="http://www.firmgreen.com">www.firmgreen.com</a>
Gas treatment Services	<a href="http://www.gastreatmentservices.com">www.gastreatmentservices.com</a>
Gasrec	<a href="http://www.gasrec.co.uk">www.gasrec.co.uk</a>
Hamworthy	<a href="http://www.hamworthy.com">www.hamworthy.com</a>
Prometheus Energy	<a href="http://www.prometheusenergy.com">www.prometheusenergy.com</a>
Terracastus Technologies	<a href="http://www.terracastus.com">www.terracastus.com</a>

*Tabell 7 Tillverkare med speciellt focus på småskalig biogasuppgradering*

<b>Company</b>	<b>Homepage</b>
Biosling	<a href="http://www.biosling.se">www.biosling.se</a>
Metener	<a href="http://www.metener.fi">www.metener.fi</a>

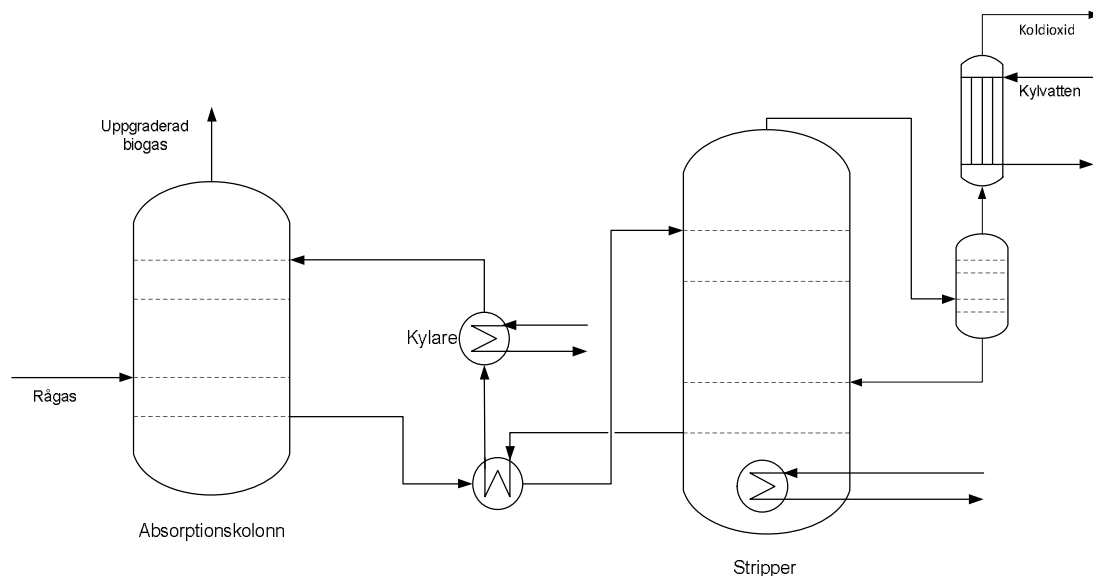


## 2 Beskrivning av de kommersiella uppgraderingsteknikerna

I denna svenska sammanfattning beskrivs uppgraderingsteknikerna endast kortfattat. För dig som vill ha ett större teoretiskt djup och mer information rekommenderas den engelska versionen av denna rapport.

### 2.1 Aminskrubber

Användningen av reagerande system för att ta bort koldioxid från biogas har vuxit kraftigt de senaste åren. Vid denna typ av separation använder man sig av ett ämne som kemiskt reagerar med koldioxidmolekylerna och bildar komplex. Detta sker vanligen med en vattenlösning av aminer. De vanligaste aminerna som använts historiskt med syftet att avlägsna koldioxid och svavelväte är metyldietanolamin (MDEA), dietanolamin (DEA) och monoetanolamin (MEA). Idag är det vanligt att använda en blandning av MDEA och piperazin (PZ), som ibland kallas aktiverad MDEA (aMDEA). Aktiverad MDEA har en betydligt högre absorptionskapacitet jämfört med MDEA.



Figur 3 Förenklat flödesschema för aminskrubbern.

I allmänna termer består en amin skrubber, som visas i figur 3, av en absorptionskolonn där koldioxid avlägsnas från biogasen och en stripper där koldioxid avlägsnas från aminlösningen genom tillsats av värme. Rågasen injiceras i botten av absorptionskolonnen och aminlösningen i toppen. När koldioxiden kommer i kontakt med aminen binds ämnena kemiskt till varandra och värme avges. Lösningen värms på detta vis från 20-40 °C till 45-65 °C i absorptionskolonnen. Absorptionen gynnas av låga temperaturer från en termodynamisk synvinkel men av högre temperaturer från en kinetisk synvinkel. Produktgasen tas ut från toppen. Driftrycket är ca 1-2 bar(a).

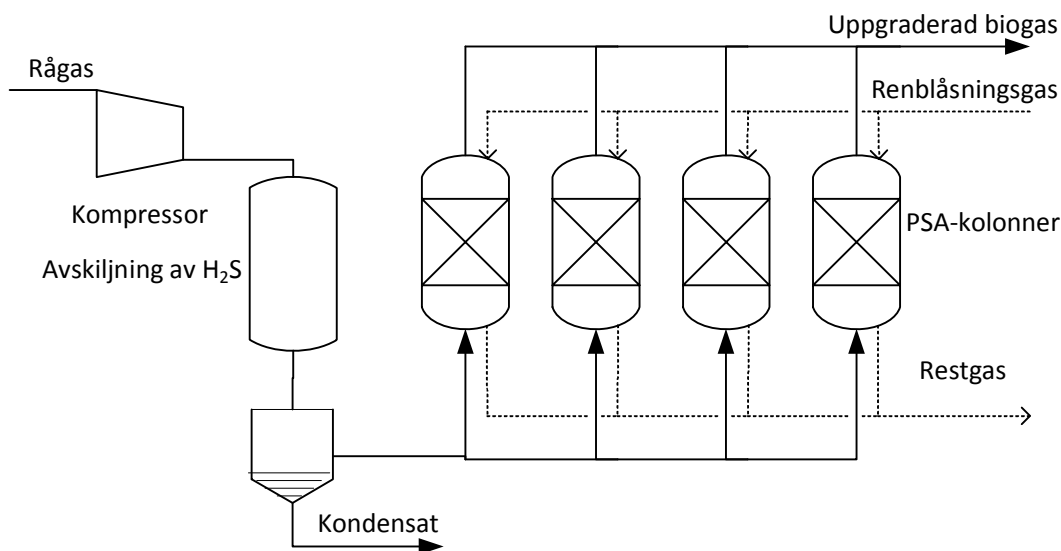
Aminlösningen går via en värmeväxlare till toppen av stripperkolonnen. I botten av denna kolonn tillförs värme vid ca 120-150 °C för att producera ånga genom att koka delar av aminlösningen. Ångan sänker partialtrycket av koldioxiden, samt avger värme till lösningen för att driva reaktionen baklänges, dvs dela på det ke-



miska komplex som bildats av aminen och koldioxiden. Trycket i denna kolonn är vanligtvis 1,5-3 bar(a).

## 2.2 Pressure swing adsorption (PSA)

PSA är en torr metod som kan användas för att separera gaser via fysikaliska egenskaper, dvs den fysiska interaktionen mellan gasmolekyler och adsorbentmaterial. De adsorbenter som används är porösa fasta ämnen med hög specifik yta för att maximera kontakten mellan gasen och adsorbenten. Separation mellan metan och koldioxid uppnås genom att adsorbenten antingen kan adsorbära mer koldioxid än metan (jämviktsadsorbent) eller genom att koldioxid adsorbäras snabbare än metan (kinetisk adsorbent), vilket kan styras med kontrollerade diffusionshastigheter. Vanliga adsorbentmaterial är aktivt kol, naturliga och syntetiska zeoliter, titansilikater, silikageler och kolmolekylsiktter. De adsorbenter som används skadas ofta irreversibelt av svavelväte som därmed måste tas bort från gasen innan PSA-kolonnerna. Figur 4 visar ett förenklat processflödesdiagram för en PSA-enhet.



Figur 4 Förenklat flödesschema för en uppgraderingsanläggning baserad på PSA-teknik.

En cykel för en PSA-kolonn består huvudsakligen av fyra faser: trycksättning, drift, trycksänkning och regenerering. Under driftfasen matas kolonnen med rågas som är trycksatt till ca 4-10 bar (a). Koldioxiden adsorbäras i kolonnen medan metanet till största delen passerar rakt igenom. När hela bädden är mättad med koldioxid stängs inloppet och trycket sänks. Trycket minskar till atmosfärstryck, eller något lägre, för att desorbära så mycket av koldioxiden som möjligt. Denna koldioxidrika gas lämnar vanligtvis anläggningen. När trycket sänkts hela vägen ner inleds regenereringsfasen. I denna fas blåses uppgraderad gas genom kolonnen för att tömma den från all kvarvarande koldioxid. Därefter är kolonnen klar att trycksättas igen.

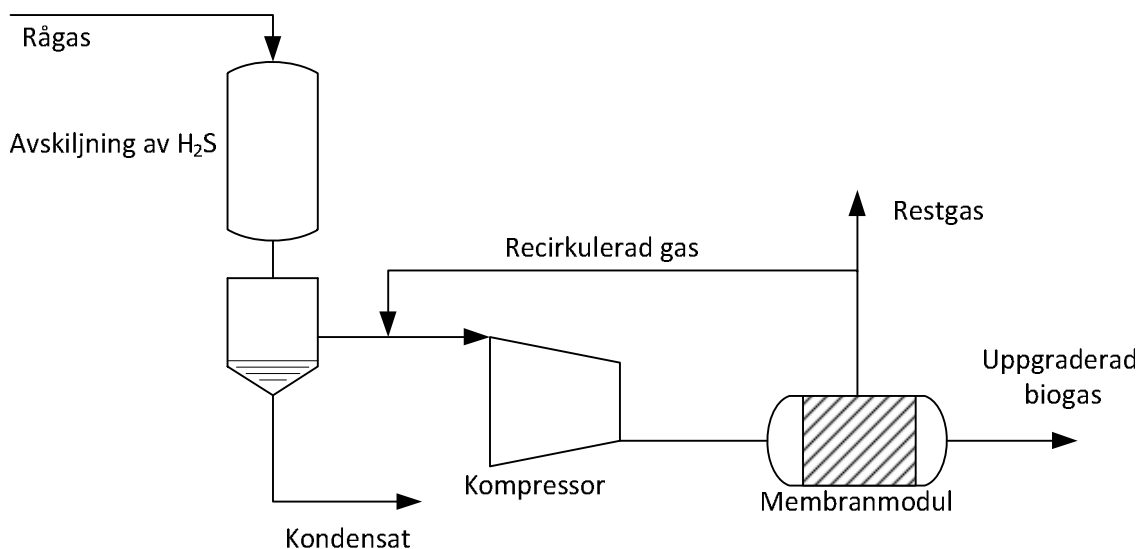
Eftersom cykeln består av flera faser där kolonnen inte matas med rågas, måste flera parallella kolonner finnas. På så vis kan det säkerställas att minst en av kolonnerna är i driftfasen hela tiden. För att minska förlusten av metan från proces-



sen är kolonnerna vanligtvis sammankopplade så att gasen som frigörs vid trycksänkningen används för att trycksätta en annan kolonn, vilket också minskar energiförbrukningen i processen. Vid användning av flera kolonner finns det många sätt att modifiera processcykeln för att öka utbytet av metan från rågasen till uppgraderad gas samt minska metanförlusten och energiförbrukningen.

### 2.3 Membranseparation

Ett membran är ett tätt filter som kan separera komponenterna i en gas. Separationen sker, oftast baserat på molekylstorleken. Membran har använts för uppgradering av biogas sedan 90-talet. Membranen som används för biogasuppgradering är tillverkade så att koldioxiden kan passera igenom membranet medan metanen hålls kvar. Förutom koldioxid kan även vattenånga, väte och till viss del syre separeras under uppgraderingen. Vanligtvis behövs t.ex. ingen gastork för att nå den dagpunkt som krävs för att använda den uppgraderade biogasen. Även om tekniken har funnits på marknaden under många år i detta sammanhang, har det under de senaste åren skett en kraftig utveckling vilket gör tekniken intressant för framtida applikationer. Fördelar som nämns med denna teknik är bristen på behovet av vatten eller kemikalier, förmågan att skala ner processen utan större effektivitetsförluster, snabb uppstart och bra reglerbarhet. Dessutom kan tekniken i vissa konfigurationer nå låga metanförluster (< 0.5%). Figur 5 visar ett förenklat processflödesdiagram för en typisk membranläggning.

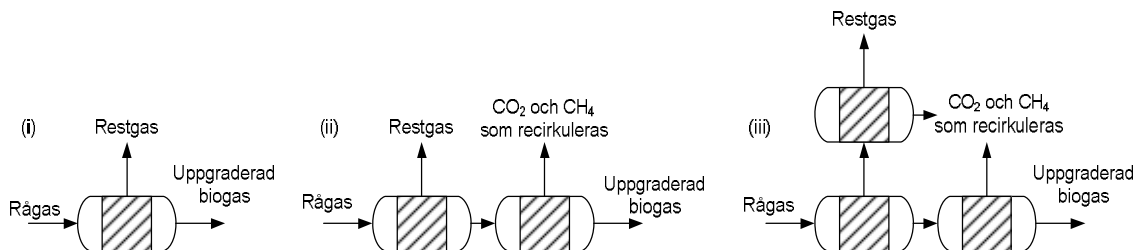


Figur 5 Förenklat flödesschema för uppgradering av biogas med membrantechnik.

Biogasen renas först från vatten och föroreningar, t.ex. svavelväte, innan den komprimeras till 5-20 bar (a) och matas till membranheten. Olika design på membransteget är tillgängliga på marknaden idag. Den enklaste konstruktionen (i) består endast av en membranmodul utan intern cirkulation av någon gas. Detta medför lägre energiförbrukning för kompressionen, men metanförlusten kan vara ganska hög. Det är därför viktigt att ha en kostnadseffektiv behandling av restgasen. En andra existerande design (ii) är att dubbla membranmoduler används för



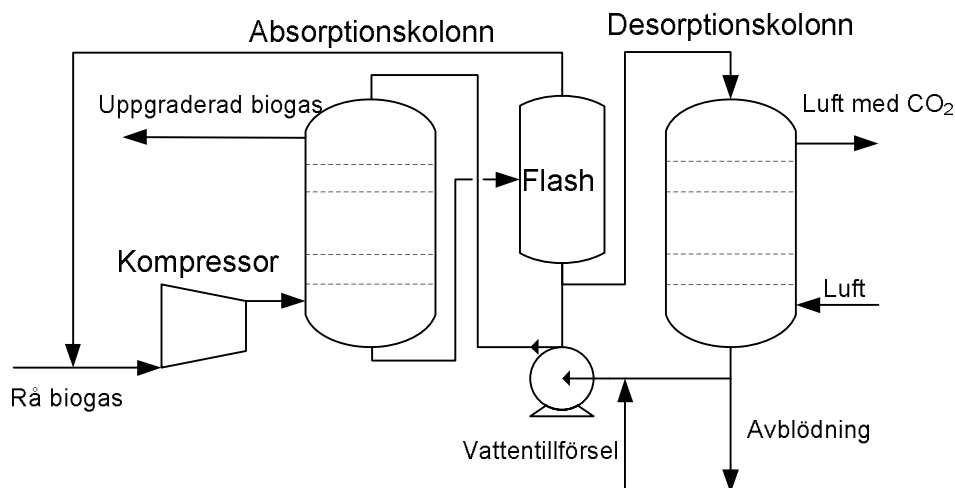
att minska metanförlusten. Permeatet (den gas som passerar igenom membranet) från den första membranmodulen avlägsnas från systemet medan permeatet från det andra membranet (med större andel metan) återcirkuleras tillbaka till kompressorn. I en tredje existerande design (iii) är grunddesignen den samma som i föregående beskrivning (ii), men med den skillnaden att det finns ytterligare en membranmodul för att separera metanen och koldioxiden i permeatet från den först membranmodulen och på så vis minska metanförlusten ytterligare. Alla dessa designalternativ visas i Figur 6.



Figur 6 Olika design av membransteget som finns på marknaden idag.

#### 2.4 Vattenskrubber

I en vattenskrubber används vatten för att separera koldioxiden från rågasen. Detta sker i absorptionskolonnen under högt tryck. Koldioxiden frigörs därefter från vattnet igen i desorptionskolonnen, genom tillsats av luft och sänkning av trycket till atmosfäriskt tryck. Moderna anläggningar har ett recirkulerande system för vattnet, som visas i figur 7, men tidigare tillverkades även vattenskrubbar utan recirkulation av vattnet. Några av dessa är fortfarande i drift i dag, men med ett recirkulerande vattensystem uppnås en stabilare process med möjlighet till mer optimerad drift.



Figur 7 Schematisk illustration av en vattenskrubber.

Rågasen injiceras med ett tryck runt 6-10 bar(a) i botten av absorptionskolonnen, som är fylld med fyllkroppar för att optimera kontakten mellan gas och vätska, medan vatten sprutas in i toppen av kolonnen. Ett motströmsflöde av gas och vätska

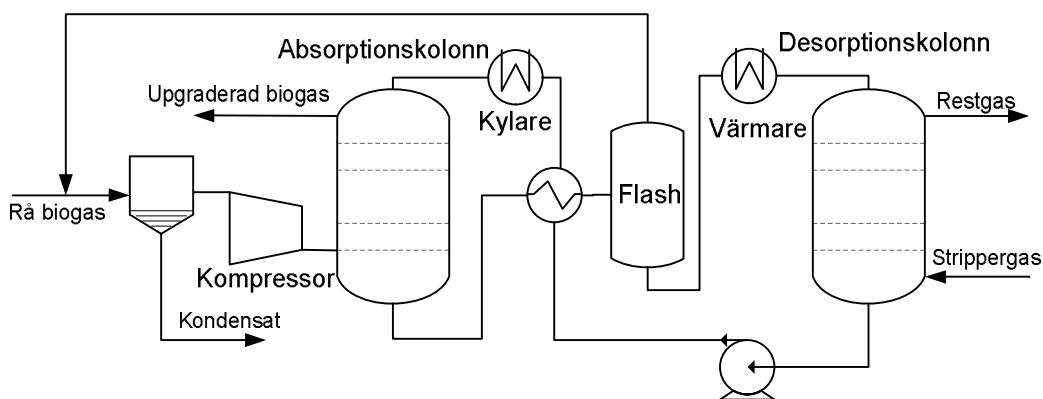


är avgörande för att säkerställa en hög effektivitet, dvs minimera energiförbrukningen och metanförlusten. Koldioxiden och en liten andel av metanen absorberas fysiskt i vattnet. Lösligheten för koldioxid i vatten är ca 25 gånger högre än för metan.

Efter absorptionskolonnen transporteras vattnet till en flashkolonn för att minimera metanförlusten. I flashkolonnen sänks trycket till cirka 2,5 - 3,5 bar (a). Den största delen av det lösta metanet, liksom en del av koldioxiden frigörs från vattnet och recirkuleras till kompressorn. Vattnet går sedan in i toppen av desorptionskolonnen, där koldioxiden desorberas vid atmosfärstryck med hjälp av luft som blåses in i botten av kolonnen. Det vatten som transporteras till desorptionskolonnen innehåller huvuddelen av koldioxiden, men mindre än 1% av metanen i den råa biogasen. Metankoncentrationen i rågasen har ingen inverkan på vattenflödet.

## 2.5 Organisk fysisk skrubber

Flera organiska lösningsmedel kan användas för att absorbera koldioxid, t.ex. metanol, N-metyl-pyrrolidon och polyetylenglykoletrar. Inom ramen för biogasuppgradering, är det vanligaste lösningsmedlet Genosorb®, vilket är en blandning av dimetyletrar av polyetylenglykol. Själva processen liknar vattenskrubbers process, men lösligheten av koldioxid är ungefär fem gånger högre i organiska lösningsmedel än i vatten. På grund av den högre lösligheten av koldioxid i lösningsmedlet, är volymen av det lösningsmedel som recirkuleras i systemet väsentligt mindre i jämförelse med en vattenskrubber. Ett flödesschema för en organisk fysisk skrubber visas i figur 8.



Figur 8 Ett förenklat flödesschema för en organisk fysisk skrubber.

Biogasen komprimeras till 6-8 bar (a) och kyls därefter innan den injiceras in i botten av absorptionskolonnen. Det organiska lösningsmedlet tillsätts i den övre delen av kolonnen, så att gasen och vätskan har ett motströmsflöde. Det organiska lösningsmedlet kyls innan det injiceras i kolonnen för att hålla absorptionskolonnen omkring 20 °C. Det organiska lösningsmedlet som lämnar botten av absorptionskolonnen värmeväxlas med det organiska lösningsmedel som är på väg till absorptionskolonnen från desorptionskolonnen. Därefter injiceras lösningsmedlet i



flashkolonnen där trycket sänks för att återföra den metan som absorberats i lösningsmedlet. Huvuddelen av den lösta metanen, liksom viss koldioxid löses ut och cirkuleras tillbaka till kompressorn. För att regenerera det organiska lösningsmedlet, värms det till ca 40°C innan det injiceras i toppen av desorptionskolonnen. Den ökade temperaturen minskar lösligheten av koldioxid och underlättar desorptionen. Trycket i desorptionskolonnen är atmosfärstryck och luft blåses kontinuerligt in i kolonnen för att minska partialtrycket av koldioxid. All värme som krävs i processen kan genereras av kompressorn och den regenerativa termiska oxidationsenheten (RTO) som oxiderar metanet i restgasen från desorptionen.





### 3 Jämförelse mellan de olika teknikerna

I detta kapitel jämförs de kommersiella teknikerna mot varandra. Kryogen uppgradering (se Kapitel 4) är en teknik under utveckling och demonstration och det skulle inte vara rättvist att använda de uppgifter som finns i dag i en jämförelse med de mogna teknikerna.

#### 3.1 Separation av koldioxid och föroreningar

Den viktigaste egenskapen för en uppgraderingsanläggning är att effektivt kunna avlägsna koldioxiden från rågasen. I PSA-anläggningar, membranläggningar och fysiska skrubbrarna separeras normalt 98-99% av rågasens koldioxid och en metankoncentration runt 98% är möjlig att uppnå i de flesta applikationerna. Aminskrubbern har den bästa prestandan i detta avseende och separerar normalt ca 99,8% av den koldioxid som finns i rågasen.

Ingen av teknikerna separerar kväve i sina standardkonfigurationer. PSA och fysiska skrubbrar separerar inte heller syre, medan aminskrubbrar kommer att skadas irreversibelt av syre genom oxidation av de reagerande aminerna. Membran har förmågan att delvis separera syre. Normalt finns väldigt lite luft i rågasen varför detta inte är något problem. När det gäller svavelväte så avlägsnar alla tekniker, utom de flesta vattenskrubberanläggningarna, dessa före uppgraderingsanläggningen. En undersökning av förekomsten av andra föroreningar i rågasen och hur dessa separeras vid uppgradering har presenterats i SGC Rapport 246.

Från aminskrubbrar, PSA och membranläggningar består restgasen i princip endast av koldioxid och en liten del metan, medan restgasen från de fysiska skrubbrarna är blandad med luft. Detta kan ha betydelse för de anläggningar som i framtiden vill använda restgasen i "Power to gas" applikationer dvs. använda billig el för att producera vätgas som sedan får reagera med koldioxiden och bilda metan som kan ersätta naturgas.

#### 3.2 Driftkostnader

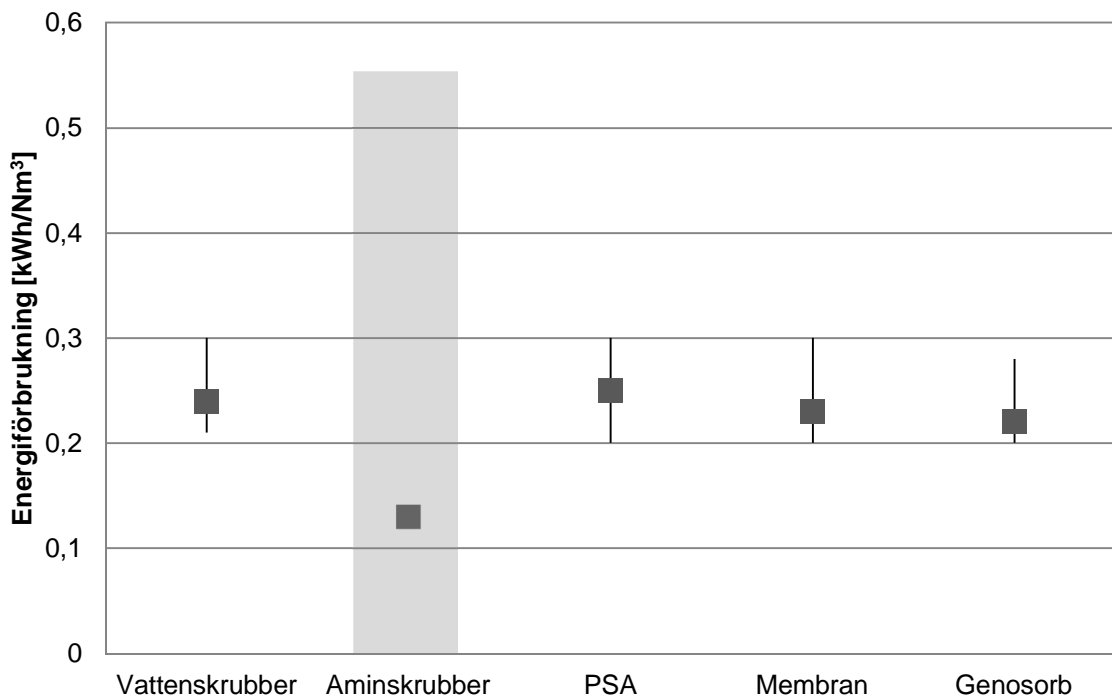
Det finns tre stora förbrukningsvaror att tänka på när man diskuterar biogasuppgradering: vatten, el och kemikalier. Bortsett från dessa tre har aminskrubbern ett extra värmebehov som ingen av de andra teknikerna har.

Vattenförbrukningen för vattenskrubber är ganska varierande beroende på belastning och design, men kan inskränkas till 0,00004-0,0004 m<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>. Denna siffra är ganska lik den rapporterade vattenförbrukningen för aminskrubbern på 0,00003 m<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>. Övriga tekniker har ingen vattenförbrukning.

Från leverantörernas uppgifter kan man dra slutsatsen att den specifika elförbrukningen varierar ganska mycket beroende på design, leverantör, kapacitet och reningskrav. För vattenskrubbern är elbehovet ca 0,3 kWh/Nm<sup>3</sup> rågas för de mindre anläggningarna och närmare 0,2 kWh/Nm<sup>3</sup> rågas för de större anläggningarna. Det finns också en betydande variation över årstiderna i elförbrukningen på grund av den dyrare kostnaden att kyla vattnet under sommaren. I fallet med aminskrubbern så finns det ett elbehov på ca 0,14 kWh/Nm<sup>3</sup> rågas vid leverans av uppgraderad gas med ett tryck på 4 bar (g) huvudsakligen från kompressorns energiförbrukning. För PSA-anläggningar varierar elförbrukningen ganska mycket beroende på design och storlek och är normalt mellan 0,2-0,3 kWh/Nm<sup>3</sup> rågas,



vilket är samma område som för membranläggningarna. Samtliga studerade tekniker visas i Figur 9.



*Figur 94 Energiförbrukningen för olika uppgraderingstekniker. Alla tekniker har ett elektriskt energibehov, som visas som ett intervall med en markering för det mest sannolika behovet. Aminskrubbern har också ett värmebehov, vilket framgår av den grå stapeln. Trycknivåerna hos den uppgraderade biogasen varierar mellan teknikerna och inom teknikerna. För mer information om värdet av den inneboende energin skapad av detta tryck, se Figur 11.*

Det är endast aminskrubbern som har ett extra värmebehov. Värmen behövs för att driva den kemiska reaktionen baklänges så att den inbundna koldioxiden kan desorberas. Mängden värme som behövs beror i viss utsträckning på inloppets metankoncentration. Ett typiskt värde för värmebehovet är 0,55 kWh/Nm<sup>3</sup> rågas. Värmen tillsätts vid 120-150 °C och 80% av värmen kan återanvändas för t.ex. uppvärmning av rötkamaren. Katalytisk eller termisk oxidation av metanet i restgasen samt värmeproduktionen från kompressorerna, och i vissa fall även från kylmaskinen kan med rätt design användas från samtliga tekniker för att täcka delar av värmebehovet i en biogasanläggning.

I både vatten- och aminskrubbern används vanligtvis skumdämpare i processen. Förbrukningen är liten och av marginell betydelse för driftkostnaden. För aminskrubbern behövs även kemikalier i form av ny aminlösning för att ersätta det som förloras under driften. Om svavelväte separeras separat krävs vanligtvis aktivt kol, vilket är vanligt förekommande för samtliga anläggningar förutom vattenskrubbern där det bara förekommer i undantagsfall. Viss förbrukning av smörjolja till kompressorerna förekommer också för samtliga tekniker.



### 3.3 Metanförlust

Metanförlusten är vanligtvis något högre, 1,5-2,0%, för PSA och Genosorbanläggningar i jämförelse med de andra teknikerna. I nyare vattenskrubberanläggningar ligger metanförlusten runt 1%, medan metanförlusten från dagens membranläggningar varierar mellan 0,5 och 2%, beroende på design och leverantör. Samtliga dessa tekniker har vanligen någon sorts behandling av restgasen, t.ex. regenerativ termisk oxidering, för att nå de hårt ställda krav som finns i de flesta länder med regleringar av biogasproduktion idag. Aminskrubbern kan garantera en metanförlust under 0,1% och kan därmed undgå behovet av behandling av restgasen.

I vissa membranläggningar på marknaden kondenseras koldioxiden i restgasen. På så vis fås en kryogen separation av koldioxiden och metanen och 100% av metanen i restgasen kan cirkuleras tillbaka in i processen, enligt tillverkaren.

I Tabell 8 sammanfattas kapitel 3.1 till 3.3, dvs. elförbrukning, koldioxid separation och metanförlust. Detta är en svår sammanställning att göra eftersom det finns stora variationer mellan tillverkare inom de olika teknikerna. Dessutom är de värden som redovisas beroende av egenskaperna för rågasen.

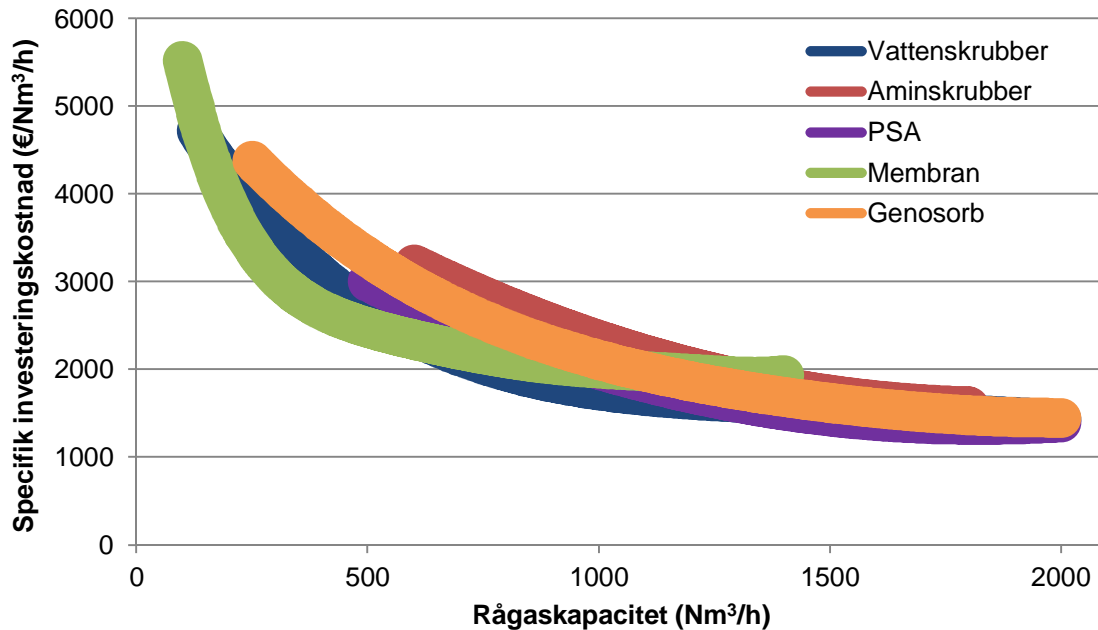
*Tabell 8 Sammanfattning av elförbrukning, koldioxid separation och metanförlust för de olika teknikerna. Elförbrukningen anges per normal kubikmeter rågas.*

Uppgraderingsteknik	Elförbrukning	Metanhalt	Metanförlust
<b>Vattenskrubber</b>	0.2-0.3 kWh/Nm <sup>3</sup>	96-98%	~1%
<b>Aminskrubber</b>	0.12 kWh/Nm <sup>3</sup> + värme (+0.55 kWh/Nm <sup>3</sup> )	>99%	~0,1%
<b>Organisk fysisk skrubber</b>	0.2-0.3 kWh/Nm <sup>3</sup>	96-98%	1,5-2%
<b>PSA</b>	0.2-0.3 kWh/Nm <sup>3</sup>	96-98%	1,5-2%
<b>Membran</b>	0.2-0.3 kWh/Nm <sup>3</sup>	96-98%	0,5-2%

### 3.4 Investeringskostnad

Den ungefärliga investeringskostnaden för de olika teknikerna visas i Figur 10.





Figur 10 Investeringsskostnaden för de olika uppgraderingsteknikerna som en funktion av anläggningens rågaskapacitet.

Såsom framgår av figuren, har aminskrubbern något högre och membranläggningarna något lägre investeringskostnad för de mindre anläggningarna. Däremot börjar investeringskostnaderna konvergera för samtliga tekniker vid de högre kapaciteterna. Det finns inte mycket skillnad från en investeringssynvinkel mellan PSA och de fysiska skrubberteknikerna någonstans i det studerade kapacitetsområdet. Den något större kostnaden vid de mindre kapaciteterna för Genosorb-skrubbern är delvis beroende av att den regenerativa termiska oxideringsanläggningen inkluderas i den redovisade investeringskostnaden för denna teknik men inte för övriga tekniker.

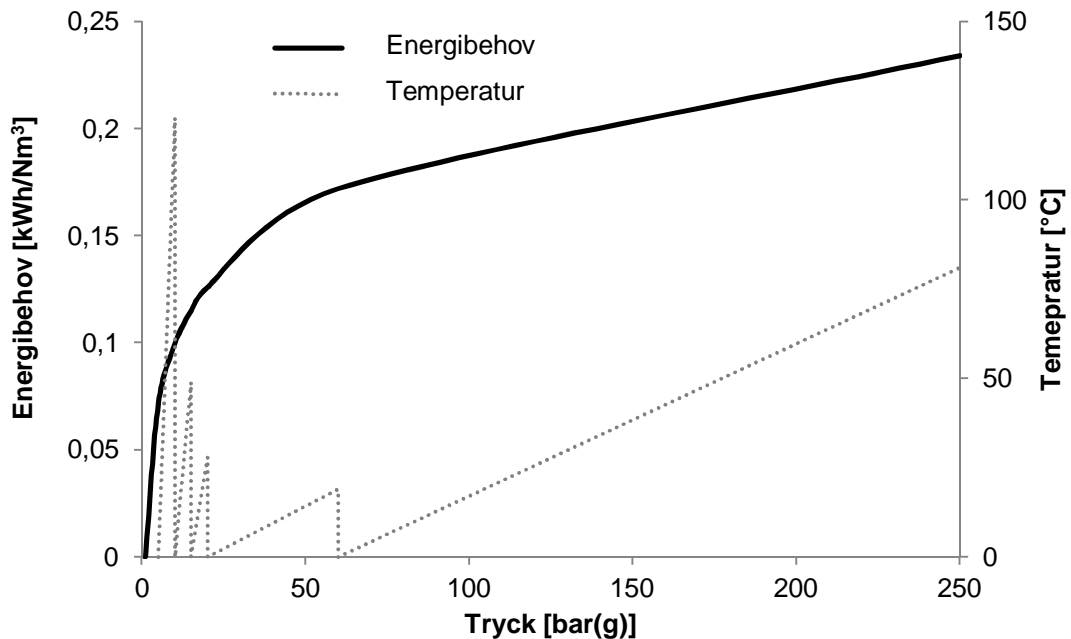
### 3.5 Gaskompression

Den uppgraderade biogasen används ofta i applikationer som kräver ett högt tryck, såsom fordonsgas. Uppgraderingsteknikerna levererar uppgraderad gas med olika tryck, liksom olika leverantörer och designlösningar inom de enskilda teknikerna ger olika gstryck. För att energiförbrukningen ska kunna jämföras av en framtida investerare bör denna energi inkluderas i utvärderingen mellan de olika lösningarna. För att underlätta en jämförelse kan Figur 11 och 12 användas. Här visas energibehovet som behövs för komprimering av metan från atmosfärstryck till 250 bar samt ett specifikt tryckförhållande mellan inkommande och utgående gas. Energiförbrukningen för ett specifikt tryckförhållande är beroende av det absoluta trycket, dvs. den energi som behövs för komprimering från 1 till 10 bar (a) är samma som den energi som behövs för komprimering från 10 till 100 bar (a). Figurerna visar även temperaturen hos gasen efter kompression.

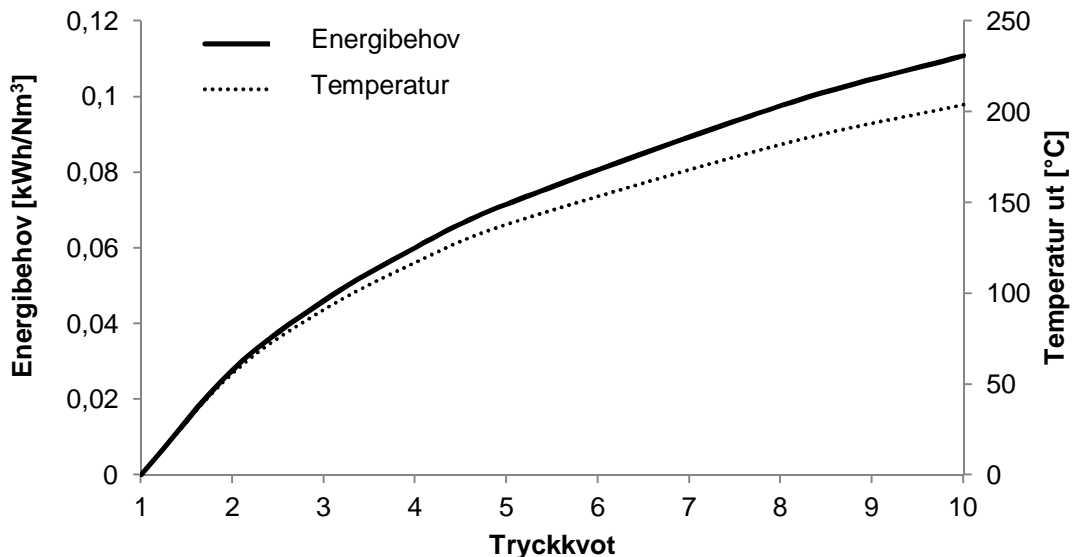
Den energi som behövs för att komprimera en gas beror på den gasvolym som skall komprimeras, inloppstemperaturen hos gasen, förhållandet mellan specifika värmen ( $c_p/c_v$ ) för gasen, specifika tryckförhållandet samt effektiviteten hos kompressorn. Förhållandet mellan de specifika värmekapaciteterna är den enda parametern som är beroende av gasens sammansättning och för koldioxid och metan



är denna kvot mycket lik ( $c_p/c_v$  är 1,307 för metan och 1,304 för koldioxid vid 15 ° C och 1 atm (a)). Effektiviteten hos kompressorn är vanligtvis ganska konstant för olika laster och för varierande inloppstryck och inloppstemperatur. Således är de värden som presenteras nedan giltiga även för kompression av rågasen.



Figur 11 Energibehov för kompression av metan mellan olika trycknivåer i 5 trycksteg mellan 0 och 250 bar(g).



Figur 12 Energibehov för kompression av metan mellan specifika tryckkvoter.



## SGC Rapport 2013:270 (Svensk sammanfattning)

Värdena har beräknats för en enstegs isentropisk kompression med hjälp av mjukvaran Aspen Plus med antagande om en isentropisk verkningsgrad på 0.85 och en elektrisk verkningsgrad på 0.9.



#### 4 Flytande biogas

I de kryogena processerna används låga temperaturer för att uppnå de önskade resultaten. Det finns ingen bestämd temperaturnivå där en process börjar kallas kryogen, men de förfaranden som beskrivs här är vid temperaturer långt under -50 °C, dvs. i ett område där gaser ändrar fas till fast eller flytande. Vid atmosfärstryck sublimerar koldioxid, dvs övergår direkt från gasfas till fast fas, vid -78 °C, medan metan kondenserar vid -161 °C. För att skilja gaserna åt som flytande används därför högre tryck där koldioxid kondenserar till flytande form.

Två kryogena uppgraderingsanläggningar har byggts i Sverige, Loudden och Sundsvall, men ingen av dessa är i drift eller kommer att tas i drift p.g.a. olika problem. Däremot har en uppgraderingsanläggning baserad på samma teknik tagits i drift i Holland under hösten 2012, vilket är den första kommersiella kryogena uppgraderingsanläggningen i drift i världen som författarna känner till.

Flytande biogas (LBG, från eng. *liquefied biogas*) produceras från och med 2012 på den svenska marknaden vid Lidköping biogas. Detta är en av de första storskaliga produktionsanläggningarna för LBG i världen. Här uppgraderas biogasen i en konventionell vattenskrubber innan den slutliga uppreningen och kondenseringen sker.

Även om kombinationen av kryogen uppgradering och kondensering har diskuterats och utvärderats en längre tid är det framförallt kombinationen av konventionell uppgradering och kondensering som man ser på marknaden idag.

LBG erbjuder ett sätt att avsevärt öka energitätheten av biogas och därmed underlätta övergången till biogas för flera nya tillämpningar, inklusive långväga tunga transporter.



## 5 Småskalig biogasuppgradering

Att uppgradera biogas i liten skala (mindre än 200 Nm<sup>3</sup>/h) har ännu varit för dyrt för att vara riktigt intressant. Detta beror på höga investeringskostnader vilket i sin tur beror på att en liten anläggning behöver samma ventiler, analysutrustning och reglerteknik som en mycket större anläggning. Även om dimensionerna på rören och ventilerna blir mindre, kommer investeringskostnaden att vara hög i förhållande till kapaciteten. Konventionella tekniker såsom vattenskrubber, PSA och membran är alla tillgängliga i liten skala på marknaden idag. Därutöver finns också nya metoder specifikt för småskalig uppgradering av biogas.

I Finland har Metener utvecklat en speciell typ av vattenskrubber för småskalig biogasuppgradering. Den huvudsakliga skillnaden mot en konventionell vattenskrubber är det mycket höga driftrycket som används i systemets två absorptionskolonner, 150 bar(a). Den uppgraderade biogasen drivs från absorptionskolonnen med vatten, så vid slutet av den satsvisa cykeln är kolonnen helt fylld med vatten. Därefter töms kolonnen och cykeln börjar på nytt. Vattnet behandlas, såsom i en konventionell vattenskrubber, i en flashkolonn för att minimera metanförlusten och därefter i en desorptionskolonn för att avlägsna koldioxiden. På grund av det höga trycket är kolonnerna mycket mindre än i en konventionell vattenskrubber, men trycket ställer också andra krav på material och komponenter.

Det svenska företaget Biosling har utvecklat en speciell typ av en vattenskrubber som använder en roterande pump i vilken kompression och koldioxidabsorption sker. Den roterande pumpen består av en lång slangvinda i vilken det omväxlande leds in vatten och rågas. Rotationen ökar trycket upp till ca 10 bar (a) och merparten av koldioxiden löser sig i vattnet inuti dessa slangar. Med denna process kan en metanhalt på ca 94% uppnås enligt tillverkaren. Eftersom detta inte är tillräckligt för t.ex. fordonsgas enligt den svenska standarden, måste gasen renas ytterligare. Detta kan göras med en mindre vattenskrubber av konventionell typ som byggs in i anläggningen.

