

## Slutrapport SLF V1340023

### Optimerat upptag av koldioxid från biogas med kalciumrik aska

Johan Andersson JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik  
Åke Nordberg, Institutionen för energi och teknik, SLU

#### Bakgrund

Uppgradering av biogas till drivmedelskvalitet vid gårdsanläggningar skulle öka värdet på gasen och möjliggöra att lantbrukare kan bli helt eller delvis självförsörjande på drivmedel, eller att den uppgraderade biogasen avyttras externt. Regeringen har under 2012-2014 avsatt 8 miljoner kronor i det s.k. MEKA (MetandieselEfterKonvertering av Arbetsmaskiner)-projektet i syfte att förbättra förutsättningarna för introduktion av dual-fuelteknik för arbetsmaskiner och göra jordbruksmaskiner mer miljövänliga [1]. Vidare planeras det att införas ett produktionsstöd mellan 2014-2024 på upp till 20 öre/kWh producerad biogas från gödsel för ökad klimatnytta [2]. För närvarande är dock kostnaderna för uppgradering vid låga gasflöden förhållandevis höga och nya kostnadseffektiva tekniska lösningar behöver utvecklas.

Aska från förbränning av trädbränslen har ett högt pH-värde och en hög kalciumoxidhalt (CaO), vilket ger förutsättningar att fastlägga koldioxid (CO<sub>2</sub>) från biogas genom karbonatisering och därmed nå en hög metanhalt (CH<sub>4</sub>) i utgående gas. Under 2011-2012 genomfördes det SLF-finansierade projektet *Uppgradering av biogas med bottenaska från trädbränslen* (H4010207), där tre olika askor från förbränning av trädbränslen studerades med avseende på deras kapacitet att binda upp koldioxid från biogas [3]. Resultaten visade att aska från förbränning av pellets gav ett totalt upptag på 0,24 g CO<sub>2</sub>/g torr aska och en gaskvalitet på 95-100 % metan. Beräkningar baserade på denna kapacitet och ett föreslaget system vid en biogasanläggning som producerar 1 GWh/år (18 Nm<sup>3</sup> biogas/h) indikerade att uppgraderingskostnaden nästan kan halveras från ca 0,45 kr/kWh med konventionell teknik [4] till ca 0,24 kr/kWh förutsatt att gasrening med aska kan tillämpas i produktionsskala.

I det tidigare genomförda projektet identifierades en rad frågeställningar som behöver belysas mer ingående innan konceptet är moget att demonstreras i större skala. Avsikten med detta fortsättningsprojekt är att klarlägga betydelsen av viktiga faktorer/parametrar för systemets prestanda, vilket utgör ett viktigt underlag för framtida försök.

#### Syfte och mål

Syftet är att med försök i laboratorie- och pilotskala undersöka hur en askbäddes förmåga att binda koldioxid påverkas av olika gasflöden och fuktkvoter på askan samt hur processen påverkas då askbäddens höjd varieras. Vidare syftar projektet till att undersöka gaskvaliteten på gasen från askbädden med avseende på föroreningar såsom siloxaner och svavelämnen. Projektet ska även ge svar på hur en effektiv evakuering av askbädden kan göras för att minimera metanemissionerna från systemet.

Målet är att förbättra beslutsunderlaget avseende utformning av ett energi- och kostnadseffektivt system för uppgradering av biogas med aska till fordonsgaskvalité inför framtida försök i större skala.

## Material och Metoder

### Askor

Torr aska från två förbränningsanläggningar med olika bränslen inhämtades för försöken:

- Bottenaska från förbränning av sågverksflis vid Lövsta gård utanför Uppsala. Gården har två rosterpannor (REKA) med totalt installerad effekt på 1 600 kW. Denna aska användes i laboratorieförsöken och benämns *flisaska* i rapporten.
- Blandning av botten- och flygaska (gemensam utmatning) från förbränning av träpellets vid Vattenfalls anläggning i Storvreta. Askan från panna 1 (rosterpanna LINKA, 2 MW) användes i pilotförsöken och benämns *pelletsaska* i rapporten.

Efter inhämtningen lagrades askan i tätslutande behållare för att förhindra kontakt med luft och fukt inför försöken. Pelletsaska användes i pilotförsöken eftersom denna använts i ett annat parallellt projekt vid pilotanläggningen samt att mängden flisaska var begränsad vid inhämtningstillfället.

### Försöksuppställning

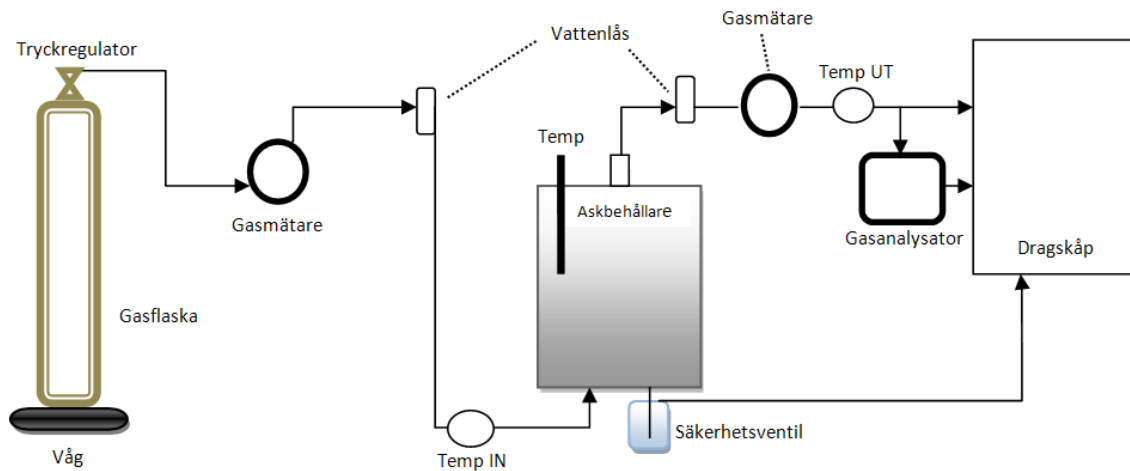
#### Laboratorieskala

Försöken i laboratorieskala utfördes inomhus enligt en sedan tidigare beprövad försöksuppställning [3], se Figur 1. Gas med en bestämd sammansättning leddes från en gasflaska genom en gasmätare (RITTER TG1) och ett vattenlås in i botten av en behållare fylld med uppfuktad aska. Gasen passerade genom askbädden varpå koldioxiden karboniserades till kalciumkarbonat i askan. Den utgående uppgraderade gasen passerade därefter en gasmätare (RITTER TG05) via ett vattenlås. Gasens sammansättning bestämdes med en gasanalysator (Biogas 5000, Geotech Inst.) och leddes sedan ut i ett dragskåp. Gasmätarna var under försöken uppkopplade till en dator och mätvärden för flöde och ackumulerad volym loggades var femte minut. Temperaturen mättes på ingående och utgående gas samt på askbädden genom ett dyrör som nådde ner 16 cm från locket. En säkerhetsventil var kopplad till inloppet på askbehållaren och bestod av ett vattenlås som löste ut om övertrycket var större än 14 mbar. Under stabil drift kunde vattenlåset användas för att bestämma mottrycket i behållaren genom att läsa av vattenpelarens höjd.

Askbehållaren var cylinderformad och hade en mantel av glas och botten samt lock av plast. Manteln var utvändigt täckt med 14 mm isolering. Behållarens höjd samt innerdiameter var 30 cm och den totala volymen uppgick till 20 L för alla försök utom ett då behållaren var dubbelt så hög (men med samma diameter som tidigare).

#### Pilotskala

Principen för försöksuppställningen vid pilotförsöken liknade den i Figur 1. Gasen kom i detta fall från JTI:s mobila biogasanläggning med en rötkammare på 5 m<sup>3</sup>. Rågasen samt den uppgraderade biogasen analyserades med täta intervall med avseende på dess sammansättning med två olika instrument (Biogas 5000 och Biolyzer SSM 6000 classic). Flöde och volym in och ut från askbehållaren med pelletsaska bestämdes med två gasmätare (RITTER TG5 och RITTER TG1). Båda gasmätarna var även här kopplade till dator för lagring av mätdata. Formen på askbehållaren kunde liknas vid en kolonn med en diameter på 31 cm, höjd på 150 cm och en total volym på 113 L. Behållaren var av stål och saknade isolering. Försöksutrustningen var placerad i en isolerad container och försöken genomfördes under sensommaren. Temperaturen mättes med 15 minuters intervall på ingående och utgående gas från askbehållaren.



Figur 1. Översikt av försöksupställningen vid laborieförsöken.

## Försöksupplägg

### Försök i laboratorieskala

Inledningsvis studerades vilken effekt olika gasflöden hade på askans upptag av koldioxid. Tre försök (F1-F3) genomfördes där ingående gasflöde var 6-40 L/h samtidigt som fuktkvoten var konstant vid L/S (liquid/solid) = 0,3 (Tabell 1). Därefter gjordes fyra försök (F4-F7) då fuktkvoten varierades från 0,1 till 0,4 samtidigt som gasflödet var konstant. Efter att F6 avslutats genomfördes evakueringsförsök där ren kvävgas (273 L/h) tillfördes i botten av askbehållaren i syfte att driva ut gasfasen som var kvar i askbädden. Samtidigt undersöktes sammansättningen på utgående gas genom kontinuerlig mätning med gasanalysator i syfte att bestämma huruvida gasen i askbädden rörde sig som ett pluggflöde eller inte.

Tabell 1. Sammanställning av utförda laborie-och pilotförsök. Gasflödet är angivet per kilogram fuktig aska.

Försök	Aska	Volym	Fuktig aska	Ask-höjd	Fuktkvot	Gasflöde	Gas-kvalitet	CO <sub>2</sub> -upptag genombrott	CO <sub>2</sub> -upptag totalt
<i>nr</i>	<i>typ</i>	<i>L</i>	<i>kg</i>	<i>cm</i>	<i>L/S</i>	<i>L/h/kg</i>		<i>g CO<sub>2</sub>/kg torr aska</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kg torr aska</i>
F1	flis	20	13,4	18	0,3	3,0	a	47	75
F2	flis	20	12,7	18	0,3	1,2	a	74	85
F3	flis	20	12,6	18	0,3	0,5	a	90	100
F4	flis	20	11,2	18	0,1	2,5	b	56	66
F5	flis	20	10,2	18	0,2	2,5	a	72	79
F6	flis	20	12,8	18	0,3	2,5	b	77	82
F7	flis	20	12,8	18	0,4	2,5	a	0	0
F8	flis	40	38,3	53	0,3	0,7	a	108	114
F9	pellets	113	68,9	140	0,25	1,7	c	167	203
F10	pellets	113	69,0	140	0,25	2,4	c	182	198

a) 50 % CO<sub>2</sub>, 50 % N<sub>2</sub>

b) 50 % CO<sub>2</sub>, 49,7 % CH<sub>4</sub>, 3000 ppm H<sub>2</sub>S

c) Biogas från mobil pilotanläggning (ca 63 % CH<sub>4</sub>, 35 % CO<sub>2</sub>, 2 % H<sub>2</sub>O och 420 ppm H<sub>2</sub>S)

Ingående gasblandning bestod av 50 % kvävgas och 50 % koldioxid i försöken F1-F3, F5 och F7-F8. Kvävgas fungerade som bärgas och hade således samma egenskaper som metan skulle haft genom askbädden (inert). Motivet till att välja kvävgas framför metan till dessa försök var med hänsyn till säkerhet, arbetsmiljö, kostnad och klimatpåverkan. För försök F4 och F6 användes en biogasblandning bestående av 50 % koldioxid, 49,7 % metan och 3000 ppm

svavelväte. Med denna gasblandning var det möjligt att undersöka vilken förmåga askan hade att binda upp svavelväte under försöken samtidigt som det medgav att evakuering kunde göras med kvävgas då försöken var avslutade. Vid försök 8 undersöktes vilken effekt en tre gånger högre askbädd hade med avseende på mottryck och upptag av koldioxid från askan.

### Försök i pilotskala

Två försök genomfördes där askhöjden var 140 cm. Rågasflödet var i genomsnitt 145 L/h för F9 och 200 L/h för F10. Den mobila biogasanläggningen tillfördes substrat varje timme, vilket bidrog till att biogasproduktionen fluktuerade en del. Rågasens sammansättning var i medeltal 63 % metan, 35 % koldioxid, 2 % vattenånga och 420 ppm svavelväte. Vid båda försöken var fuktkvoten på askblandningen 0,25.

### Analys och beräkningar

Den kemiska sammansättningen av askorna analyserades enligt analyspaketet MG2-AM vid ett ackrediterat externt laboratorium (ALS Scandinavia). Gasens innehåll av koldioxid, metan och svavelväte bestämdes med analysinstrumenten Biogas 5000 (Geotech Instruments) och Biolyzer SSM 6000 classic (Afriso). Resultaten för koldioxid validerades genom analys med en saccharometer fylld med NaOH enligt Jarvis m.fl. [5]. Vidare bestämdes halten av metan, koldioxid, vätgas, kolmonoxid och vattenånga genom analys vid externt ackrediterat laboratorium (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut). Samma laboratorium analyserade även förekomsten av svavelämnen (svavelväte, metylmerkaptan, dimetylsulfid samt dimetyldisulfid) och siloxaner i den utgående gasen från askbädden med laser IR spektrometri för svavelväte och GC-FID /-MS för övriga. Termogravimetriska analyser (TGA) genomfördes för obehandlad respektive behandlad aska för att studera dynamiken av koldioxidavdrivning vid olika temperaturer. Analyserna gjordes i kvävgasatmosfär och temperaturhöjningen var 20 °C/min (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut).

Askans upptag av koldioxid beräknades genom att upprätta massbalanser av ingående och utgående mängd koldioxid till och från askbehållaren. Till grund för dessa beräkningar låg volymmätningar för ingående och utgående gas, analyser av gasens innehåll av koldioxid samt mätning av temperatur och tryck före och efter askbehållaren. Dessutom validerades gasmätningen vid försöken i laboratorieskala genom att väga gasflaskan före och efter försöken för att på så sätt fastställa vilken volym gas som tillförts.

## Resultat och diskussion

### Askans sammansättning och egenskaper

Båda askorna hade en torrsubstanshalt på över 99 % (Tabell 2). Pelletsaskan (botten- och flygaska) uppvisade en nästan dubbelt så hög halt av kalcium som flisaskan (bottenaska). Vidare var halten kisel i pelletsaskan ca 5 gånger lägre än i flisaskan. Pelletsaskans höga andel av kalcium jämfört med flisaskan indikerar att potentialen att fånga upp koldioxid bör vara högre än för flisaskan. Vid visuell jämförelse mellan de två asktyperna upplevdes pelletsaskan vara mer homogen även om det förekom enstaka större sintringsprodukter. Flisaskan innehöll däremot relativt mycket sintringsprodukter vilket kan relateras till den höga andelen kisel i askan [3]. Torrdensiteten för pelletsaskan var 0,87 kg/L och 0,95 kg/L för flisaskan.

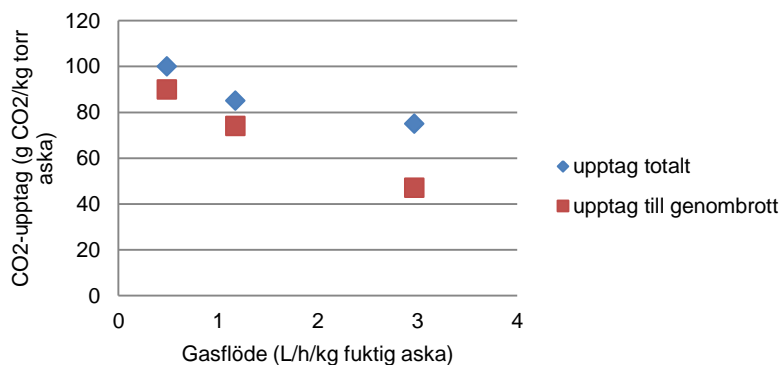
Tabell 2. Analysresultat för sammansättningen av flis- respektive pelletsaska. LOI = loss on ignition.

Element		Flisaska <sup>a</sup>	Pelletsaska <sup>b</sup>
TS	%	99,8	99,1
SiO <sub>2</sub>	% TS	35,8	7,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% TS	6,7	1,3
CaO	% TS	23,1	43,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% TS	1,6	1,3
K <sub>2</sub> O	% TS	8,6	7,7
MgO	% TS	3,7	7,2
MnO	% TS	1,5	3,9
Na <sub>2</sub> O	% TS	1,5	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% TS	1,7	3,7
TiO <sub>2</sub>	% TS	0,1	0,1
Summa	% TS	84,3	76,5
LOI 1000°C	% TS	12,1	20,8

a: Bottenaska  
b: Flyg- och bottenaska

### Upptag av koldioxid för flisaska vid olika gasflöden

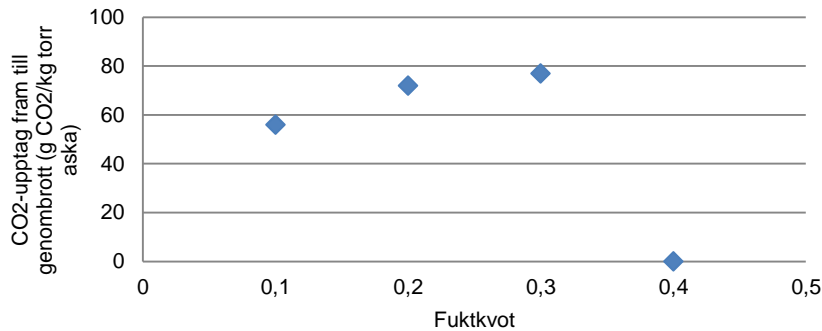
Tre försök (F1-F3) genomfördes där gasflödet varierades samtidigt som askhöjden och fuktkvoten var lika för försöken (Figur 2). För varje försök redovisas koldioxidupptaget dels fram till genombrott (1 % CO<sub>2</sub> i utgående gas), dels totalt upptag under hela försöket (30 % CO<sub>2</sub> i utgående gas = slut på försök). Från figur 2 framgår det att upptaget är högst vid låga flöden och att det därefter avtar exponentiellt. Det är tydligt att det vid höga flöden finns kvar en betydande potential att binda upp koldioxid efter att genombrott nåts. För försöket med det högsta gasflödet (F1) motsvarar upptaget fram till genombrott 63 % av totala koldioxidupptaget. Det kan jämföras med 87 % respektive 90 % för försöken med de lägre gasflödena.



Figur 2. Upptaget av koldioxid vid olika ingående gasflöden. Försöken visar ett tydligt samband där upptaget ökar ju lägre gasflödet är.

### Upptag av koldioxid för flisaska vid olika fuktkvoter

Fyra försök med flisaska (F4-F7) har genomförts där fuktkvoten varierat från 0,1 till 0,4 samtidigt som gasflöde och askhöjd varit lika (Figur 3). Resultaten visar att fuktkvoten har stor betydelse för askans förmåga att binda upp koldioxid och högst upptag nåddes för flisaskan då fuktkvoten var omkring 0,2-0,3. Då askan blandades till fuktkvoten 0,4 blev blandningen för kompakt och ingen gas kunde passera askbädden. Det bör dock noteras att askans struktur kan ha betydelse för vilken maximal L/S-kvot som kan användas. I tidigare försök med pelletsaska [3] fungerade till exempel L/S = 0,42.



Figur 3. Koldioxidupptag vid olika fuktkvoter på askan. Bäst resultat nås med fuktkvot kring 0,2-0,3.

### Mottryck och koldioxidupptag vid olika askhöjder

Askhöjden under F8 var ca 3 gånger så hög som i övriga laborieförsök med flisaska. Den ökade askhöjden hade ingen större påverkan på mottrycket i systemet. Det kunde däremot noteras att den högre askbädden hade positiv inverkan på koldioxidupptaget som var högre (+20 %) jämfört med försök med liknande gasflöde men med lägre askhöjd (F3).

Pilotskaleförsöken med pelletsaska (F9 och F10) hade en askhöjd på 140 cm och uppvisade inledningsvis ett mottryck < 1 mbar. I takt med att karbonatiseringen fortgick och porvolymen i askbädden blev mindre steg mottrycket något och var vid avslut 5 mbar. Som jämförelse var övertrycket i rötchammaren under försökens gång 20-30 mbar. Det behövdes således ingen gasfläkt för att få biogasen genom askbädden. Pelletsaskan visade god förmåga att binda upp koldioxid för båda försöken där upptaget fram till genombrott var 167 respektive 182 g CO<sub>2</sub>/g torr aska.

### Gaskvalité

Den uppgraderade gasens sammansättning och kvalité undersöktes mer ingående i F6 (Tabell 3). Analysen 5,5 h efter uppstart visade att den uppgraderade gasen innehöll 96 % metan samt spår av koldioxid, syrgas, kvävgas och vätgas. Provtagningen gjordes vid rumstemperaturen 25 °C och var då mättad på vattenånga, vilket motsvarar ca 3 %. Detta kan förklara balansen på 2,8 %. För torkad gas motsvarar metanhalten 98,8 %. Förekomsten av syrgas och kvävgas tyder på att gasprovet blivit kontaminerat med luft antingen vid provtagningsförfarandet eller genom läckage från försöksuppställningen. Halten vätgas på 0,2 % kan troligen förklaras av att vätgas bildas då askans innehåll av metalliskt Al reagerar med vatten vilket ger H<sub>2</sub> [6].

Analys av svavelämnen gjordes vid tre olika tillfällen. Samtliga analyser var under detektionsnivån för svavelväte samt svavelämnena metylmerkaptan, dimetylsulfid och dimetyldisulfid (Tabell 3). Med den höga ingående halten av H<sub>2</sub>S (3 000 ppm) visar resultaten att askbädden har mycket god förmåga att rena bort svavelväte samt att askbädden inte bidrar med andra svavelämnen.

Analys av olika siloxanföreningar gjordes vid två tillfällen (Tabell 3). Båda analyserna var under detektionsnivåerna. Ett s.k. nollprov analyserades för att säkerställa att materiel från försöksuppställningen inte skulle ge ifrån sig siloxaner och visade även på halter under detektionsnivå.

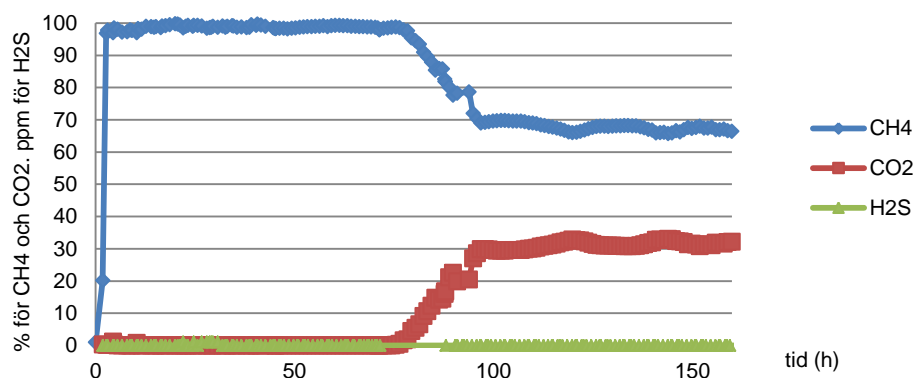
Sammanfattningsvis visar analyserna på att uppgradering med askbädd bör kunna uppfylla de krav på gaskvalité som anges för fordonsgas (SS 15 54 38) [7].

**Tabell 3. Gassammansättning för fuktig uppgraderad gas vid försök 6. Den ingående gasen bestod av 50 % CO<sub>2</sub>, 49,7 % CH<sub>4</sub> och 3 000 ppm H<sub>2</sub>S. För torkad uppgraderad gas uppgick metanhalten till 98,8 %.**

Ämnen	Enhet	1,5-2 h efter uppstart	5,5 h efter uppstart	26 h efter uppstart
Metan	%-vol	e.a.	96,0 ± 1	e.a
Koldioxid	%-vol	e.a	0,3 ± 0,1	e.a
Syrgas	%-vol	e.a	0,2 ± 0,1	e.a
Kvävgas	%-vol	e.a	0,5 ± 0,3	e.a
Kolmonoxid	%-vol	e.a	<0,1	e.a
Vätgas	%-vol	e.a	0,2 ± 0,1	e.a
Balans	%-vol	e.a	2,8 ± 1,6	e.a
Svavelväte	ppm-vol	< 1	< 1	< 1
Metylmerkaptan	ppm-vol	< 5	< 5	< 5
Andra svavelämne(dimetylsulfid, dimetyldisulfid, mm)	ppm-vol	< 1	< 1	< 1
Hexametyldisiloxan L2	µg/m <sup>3</sup>	< 5	e.a	< 5
Hexametylcyclotrisiloxan - D3	µg/m <sup>3</sup>	< 30	e.a	< 30
Oktametyltrisiloxan -L3	µg/m <sup>3</sup>	< 5	e.a	< 5
Oktametylcyclotetrasiloxan - D4	µg/m <sup>3</sup>	< 15	e.a	< 15
Dekametyltetrasiloxan - L4	µg/m <sup>3</sup>	< 10	e.a	< 10
Dekametylcyklopentasiloxan - D5	µg/m <sup>3</sup>	< 10	e.a	< 10
Dodekametylpentasiloxan - L5	µg/m <sup>3</sup>	< 30	e.a	< 30
Dodekametylcyclohexasiloxan D6	µg/m <sup>3</sup>	< 10	e.a	< 10

e.a. = ej analyserad

Under samtliga försök har förloppet avseende gassammansättningen dynamik i utgående gas från askbädden varit liknande oavsett vilken aska som använts. I Figur 4 visas gassammansättningen under F10 som exempel på förloppet. Initialt når metanhalten snabbt upp till 99-100 % samtidigt som koldioxidhalten är 0 %. Genombrott av koldioxid sker efter 77 h, varefter koldioxidhalten ökar och metanhalten minskar för att nå motsvarande halt som ingående gas. Trots att karbonatiseringen minskar på grund av mättnad kvarstår reduktion av svavelväte (420 ppm i ingående gas) och inget genombrott detekteras. Motsvarande fenomen har även rapporterats för avfallsaska av Mostbauer et al [8] och indikerar att aska skulle kunna användas som ett effektivt sätt att reducera svavelväte även efter att den mättats på koldioxid.



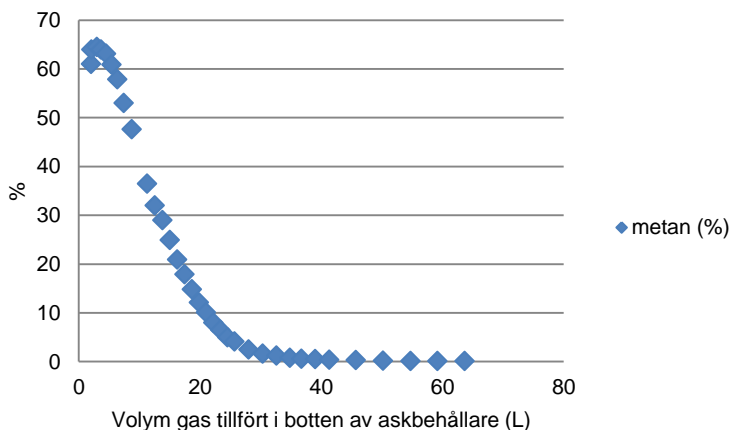
**Figur 4. Gassammansättningen för uppgraderad gas under försök 10. Metanhalten är 99-100 % fram tills koldioxid bryter igenom bädden efter 77 timmar. Halten svavelväte är 0 ppm under hela försöket.**

## Evakuering och metanförlust

När askbädden är mättad på koldioxid består gasinnehållet i askbehållaren av en blandning av koldioxid och metan. Denna gasblandning behöver evakueras och tas omhand för att förhindra metanemissioner från systemet då askbehållaren öppnas för att tömma ut förbrukad aska.

Evakueringsförsök har genomförts där kvävgas har tillförts i botten samtidigt som metanhalten för utgående gas studerats (Figur 5). Resultatet visar att gasen rör sig likt ett pluggflöde genom askbädden och metanhalten svänger snabbt in mot 0 %. Det innebär att den gas som lämnar behållaren inledningsvis innehåller höga metanhalter och kan således destrueras genom förbränning med fackla eller gaspanna. Ett räkneexempel visar att det går att få en gasblandning på i medeltal 40 % metan genom att samla upp de inledande 19 L som lämnar behållaren vid evakuering. Denna gasmängd bedöms då vara möjlig att destrueras. Den kvarvarande mängden metan skulle då uppgå till 0,9 L vilket motsvarar en metanemission på 0,2 % för det aktuella försöket.

Innan evakueringen påbörjades fanns det totalt 8,5 L metan i behållaren vilket motsvarar 2,0 % av den metan som passerat askfiltret fram till genombrott under försöket. Av denna mängd kan alltså 7,6 L destrueras enligt exemplet ovan. Det är troligt att det finns optimeringspotential när det gäller att minimera den mängd metan som måste destrueras enligt räkneexemplet. Ett alternativ skulle till exempel kunna vara att återföra en del av den evakuerade gasen tillbaka till röt-kammaren för att på så sätt minimera energiförlusten. Mängden återförd gas blir då en avvägning mot gaskvalitén i rågasen som får en ökad andel ballast i form av kvävgas.



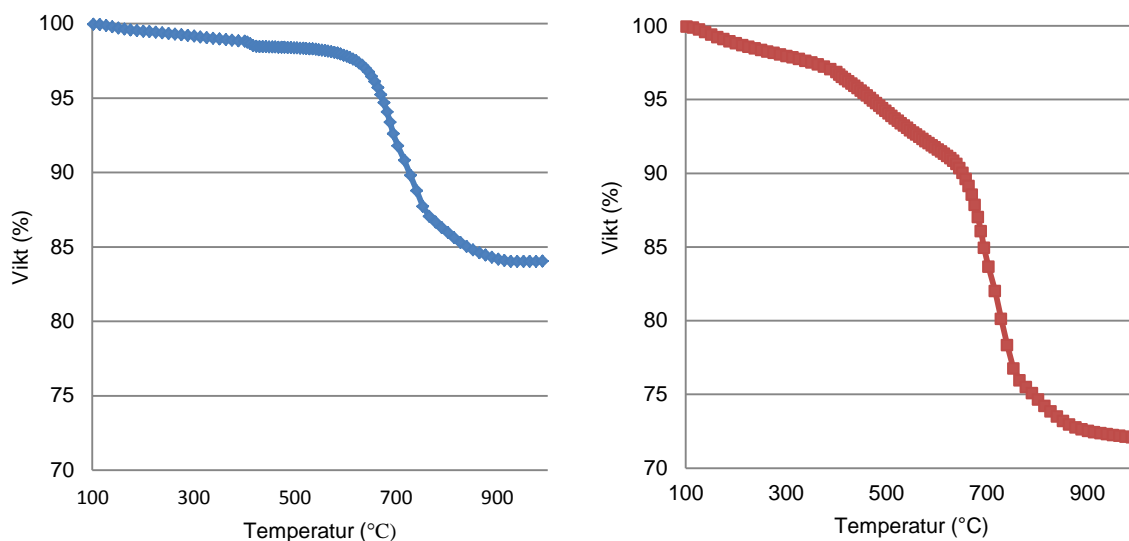
Figur 5. Evakueringsförsök för att undersöka dynamiken i gassammansättningen då kvävgas tillförs i botten av behållaren. Metanhalten sjunker snabbt ner mot 0 % och beteendet kan liknas vid ett pluggflöde.

## Viktavgång vid uppvärmning av aska

Karbonatisering är en exoterm reaktion som genererar värme. Genom att värma upp aska sker den omvända reaktionen med slutprodukterna koldioxid och kalciumoxid. I detta projekt har behandlad respektive obehandlad torr aska undersökts med termogravimetriska analyser (TGA), vilket innebär att provets viktavgång mäts samtidigt som temperaturen stiger mot 1 000 °C (20°C/min). Atmosfären vid analysen var kvävgas för att förhindra oxidering av organiskt material. Analysresultaten visar att viktavgången är betydligt större för behandlad aska jämfört med obehandlad torr aska (Figur 6). Det beror till största del avgång av den koldioxid som tidigare fixerats under uppgraderingsförsök. Det är även troligt att den ökade viktavgången för behandlad aska beror på att komplexbundet vatten avgått. Då torr aska blandas med vatten kan det nämligen bildas komplex mellan vatten och olika föreningar, till



exempel gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) Vid uppvärmning bryts denna komplexbindning och vattenånga avgår.



Figur 6. Viktreduktion vid uppvärmning av aska till 1000 °C (20°C/min). Obehandlad aska (t.v.) reduceras med 16 % och behandlad aska (t.h.) med 28 %.

Vid jämförelse av de två graferna i Figur 6 framgår det att den största viktavgången sker mellan 650 °C och 750 °C för både obehandlad och behandlad aska. Däremot sker det en relativt stor avgång mellan 400 °C och 600 °C för behandlad aska (5,1 % viktreduktion) medan avgången är betydligt mindre för obehandlad aska (1,0 % viktreduktion). Här kan en stor del av skillnaden mellan askorna förklaras av det koldioxidupptag som åstadkoms under uppgraderingen. För temperaturer över 850 °C var viktavgången låg för de båda askorna.

## Övergripande diskussion

Med de erhållna resultaten har projektets syfte och mål uppfyllts. Betydelsen av en rad faktorer och parametrar för konceptets prestanda har kunnat klarläggas och det finns ingenting som pekar på att förutsättningarna för tidigare föreslagna systemutformning och kostnadsbedömning skulle försämrats av de resultat som framkommit. Det är dock viktigt att notera att askor är heterogena material och att det kan vara svårt att överföra absoluta resultatvärden från laboratorieskala till fullskala. Ett viktigt klarläggande i de framkomna resultaten var att mottrycket vid en askbäddshöjd på 1,4 m och en diameter på 0,3 m klart understiger en rötkammares övertryck. Fastställande av optimal utformning av askbädden, dvs förhållande mellan diameter och höjd kvarstår för framtida försök. I ett parallellt pågående projekt (SE-Biomethane, ERA-NET) har en askbädd med motsvarande volym, men med en större diameter och lägre höjd, uppvisat god prestanda för att ta upp koldioxid från en biogas med ca 20 %  $\text{CO}_2$ -halt (opublicerade resultat). Trots att det fortfarande återstår frågor kring askbäddens utformning bedöms det att konceptet är moget att testas i demonstrationsskala. Ett sådant demonstrationsprojekt bör även inkludera aspekter på hantering, logistik och slutlig avsättning av askan.

## Resultatförmedling

En vetenskaplig artikel sammanställs för närvarande i syfte att skickas in till Environmental Technology.

Projektets har presenterats vid en rad tillfällen: ERA-net symposium i Olsztyn, Polen; inom plattformen SP Biofuels, Borås; SP-dagen 2013; VA-mässan, Elmia, Jönköping; besök av delegation från Vietnam.

Vid Askdagen 2013 och 2014, anordnad av Värmeforsk, har projektet diskuterats med aktörer från askbranschen avseende om hur uppgradering med aska kan göra det attraktivare att sprida aska i skog och mark.

Projektet har presenterats i JTIs magasin DRIV (våren 2014, s 5). I kommande nr av DRIV kommer en större artikel om vårt arbete med småskalig uppgradering att skrivas. Vidare har projektet förekommit i en nyhetsnotis från JTI, [www.energinyheter.se](http://www.energinyheter.se) och [www.svenskaenergiaskor.se](http://www.svenskaenergiaskor.se).

## Slutsatser

- Det finns ett samband mellan gasflöde och upptag av koldioxid i flisaska, där ett lägre flöde ger ett högre upptag fram till genombrott
- En fuktkvot på 0,2-0,3 gav det bästa upptaget av koldioxid i flisaska
- Flis- och pelletsaska har en mycket god förmåga att reducera H<sub>2</sub>S även efter att upptaget av koldioxid avtar
- Den uppgraderade gasen från flisaskbädden uppnår en kvalitet som uppfyller svensk standard (SS 15 54 38) avseende metanhalt och innehåll av spårgaser
- Evakuering av metangas från avslutad askbädd kan ske med kvävgas i ett pluggliknande flöde för förbränning, vilket innebär en metanemission på endast 0,2 %
- En askhöjd på 1,4 m ger ett mycket lågt mottryck, vilket innebär att trycket i en rötchammare (20-30 mbar) räcker för att få gasen igenom askbädden

## Referenser

- [1] <http://www.regeringen.se/sb/d/16062/a/190453>. Tillgänglig: 2014-09-29
- [2] <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/stod/foretagsochprojektstod/pilotprojektgodselgasstod.4.37e9ac46144f41921cd22d1c.html>. Tillgänglig 2014-09-29
- [3] Andersson, J. (2013). Uppgradering av biogas med aska från trädbränslen. ISSN 1654-9392. SLU, Uppsala 2013. [http://stud.epsilon.slu.se/5224/1/andersson\\_j\\_130124.pdf](http://stud.epsilon.slu.se/5224/1/andersson_j_130124.pdf)
- [4] Blom H, Mccann M och Westman J. 2012. *Småskalig uppgradering och förädling av biogas*. Pöyry SwedPower AB.
- [5] Jarvis, Å., Nordberg, Å., Mathisen, B. and Svensson, B.H. 1995. Stimulation of conversion rates and bacterial activity in a silage-fed two-phase biogas process by initiating liquid recirculation. *Antonie van Leeuwenhoek* 68: 317-327.
- [6] Arm, M., Lindeberg, J., Rodin, Å., Öhrström, A., Backman, R., Öhman, M. och Boström, D. 2006. Gasbildning i aska. Värmeforskrapport 957, Värmeforsk Service AB, Stockholm, ISSN 1653-1248.
- [7] Svensson, M. 2011. Utvärdering av svensk biogasstandard – underlag för en framtida revision. SGC rapport 229. Svenskt Gastekniskt Center, Malmö, ISSN 1102-7371.
- [8] Mostbauer, P., Lombardi, L., Olivieri, T. and Lenz, S. 2014. Pilot scale evaluation of the BABIU process – Upgrading of landfill gas or biogas with the use of MSWI bottom ash. *Waste Management* 34, 125-133.