

Gårdsbaserad uppgradering av biogas med askfilter

Farm-based upgrading of biogas using ash filter

Ulf Hävermark

BioGas2020 

Interreg

Öresund-Kattegat-Skagerrak
European Regional Development Fund



Gårdsbaserad uppgradering av biogas med askfilter

Farm-based upgrading of biogas using ash filter

Ulf Hävermark

Handledare: Johan Andersson, RISE
Ämnesgranskare: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Daniel Nilsson, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 15 hp
Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A1N, teknik
Kurstitel: Projektarbete i energisystem
Kurskod: TE0012
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2017
Serietitel: Projektarbete i energisystem, institutionen för energi och teknik, SLU
Delnummer i serien: 2017:2
Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: småskalig, fordonsgas, demonstrationsförsök, fixering, koldioxid, svavelväte

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

Most of the biogas produced in small scale biogas plants in Sweden today is used for combined heat and power production. With the price of electricity being relatively low, the small biogas plants are hardly profitable. Since the electricity in Sweden is largely renewable the environmental motivation for farmers to build their own small scale biogas plants is low. If the biogas could be used as vehicle fuel instead this might change. Vehicle fuel is still mostly fossil which means that production of small scale vehicle fuel would benefit both the environment and the producers. The problem however is that upgrading small flows of biogas is too expensive with today's established technologies.

Because of this, RISE and SLU are researching alternative methods of upgrading with the purpose of making them cheaper for small scale biogas plants. The one featured in this paper is called *ash filter*. This method involves filling a container, the ash filter, with moist ash, sealing it up and letting biogas pass through the ash bed. The CO₂ in the biogas will carbonize with the Ca²⁺ in the ash and remain fixated while the CH₄ enriched gas will pass through. Any H₂S in the biogas will also be fixated in the ash forming sulfites. Ash filters have been used in the laboratory multiple times and the aim of this project was to use the method for the first time on a demonstration scale at the biogas plant in Sötåsen. The biogas produced at this plant contained an average of 56 % CH₄, 43 % CO₂ and 700 – 1000 ppm H₂S at the time of the trial.

The trial was a success with the dry upgraded gas reaching concentrations of 99.1 % CH₄, <0.1 % CO₂ and <2 ppm H₂S. When sampled immediately after the filter the gas had a moisture content of 1.5 %. The ash had a capacity of fixating 99 g CO₂/kg dry ash. About 52 % of the fixation happened before the breakthrough of CO₂ occurred, after which the upgraded gas increased its CO₂ content slowly during the rest of the trial. All of the H₂S in the biogas was fixated by the filter. After the trial was ended the ash was examined and proved to be easy to handle and suitable for storage outside.

Since almost half of the upgrading capacity remained after the breakthrough, multiple filters should be used in series to ensure a steady stream of completely upgraded gas. The upgraded biogas reached the specifications for vehicle fuel except for the moisture content. This would have to be removed before the gas could be compressed and odorized in future trials. Different types of ashes could be tested with other gas flows as well to obtain even more experience of the upgrading method.

Sammanfattning

Biogas producerad på småskaliga gårdsanläggningar är i dagens läge svår att göra lönsam. Uppgraderad till fordonsgas skulle den kunna få ekonomiska såväl miljömässiga fördelar över den kraftvärme som framförallt produceras av biogas i dagsläget. Problemet är att kostnaden för uppgradering av de små biogasflöden som gårdsanläggningarna producerar är för hög. RISE och SLU utvecklar därför alternativa uppgraderingsmetoder för små biogasanläggningar och en av dessa metoder innefattar att uppgradera biogas med askfilter. Tekniken går ut på att låta biogas passera en fuktig askbädd i vilken CO₂ fixeras genom karbonatisering med Ca²⁺. Dessutom reagerar H₂S i biogasen med metaller i askan och fixeras som sulfider. Detta resulterar i att en uppgraderad gas som är renad på CO₂ och H₂S kan erhållas av filtret. Denna gas kan sedan torkas, odöras och komprimeras för att användas som fordonsgas. När askbädden är mättad med CO₂ byts askan ut, och den använda askan har då stabiliserats vilket är intressant ur lagringsperspektiv samt återföring av träddränsleaska. Tanken är att askfiltertekniken under rätt förutsättningar ska vara tillräckligt billig för att göra fordonsgasproduktion lönsam för små anläggningar. Flera framgångsrika försök har tidigare genomförts i laboratorie- och pilotskala för olika asksammansättningar. Detta projektarbete behandlade det första försöket genomfört i demonstrationsskala. Aska samlades inför försöket in från Moälvens värmeverk i Töreboda och askfiltret placerades vid biogasanläggningen på Sötåsens naturbruksgymnasium. Askan fuktades, blandades med en traktormonterad cementblandare på Sötåsen och fördes därefter över till filtret vid första försöksdagen där uppgraderingen genomfördes under ca två dygn.

Sötåsens biogasanläggning producerade vid försöket en biogas med ca 56 % CH₄, 43 % CO₂ och 700 – 1000 ppm H₂S med ett gasflöde som varierade mellan 0 – 8 m³/h. Gasen uppgraderades till ca 99,1 % CH₄, <0,1 % CO₂, <2 ppm H₂S för torr gas. Omedelbart efter askfiltret höll den uppgraderade gasen en fukthalt av ca 1,5 % H₂O. Drygt hälften av karbonatiseringen skedde innan genombrott inträffade, alltså den tidpunkt vid vilken > 1 % CO₂ passerar askbädden. Efter genombrottet klingade uppgraderingskapaciteten av tills all aska blivit karbonatiserad. Kapaciteten hos den blandning av flyg- och bottenaska från förbränning av träddränslen som användes vid detta specifika försök visade sig vara 99 g CO₂/kg torr aska. Under försöket fixerades all ingående H₂S av askfiltret. Den använda askan var finkornig och lätt att gräva i och lagrades efter försökets avslut på hög utomhus. Efter fyra månaders lagring var den fortfarande lätthanterlig. Sammanfattningsvis fungerade askfiltret väl i detta första demonstrationsförsök.

Eftersom en betydande del av askans karboniseringskapacitet återstod efter genombrottet bör flera askfilter användas i serie för att en askbädd ska kunna utnyttjas fullständigt utan att den erhållna uppgraderade gasen minskar i kvalitet. I ett sådant scenario bör det färskaste filtret placeras sist i kedjan och det äldsta först. Detta kräver även en väl planerad logistik som fungerar både vad gäller uppsamling, transport och laddning av ny aska samt hantering av de mättade askfiltren.

Då karboniseringsprocessen är exoterm och askan fuktig fick den varma uppgraderade gasen en ökad fukthalt. Eftersom fordonsgas måste vara torr innan den komprimeras behöver torkning av den uppgraderade gasen genomföras. Möjliga metoder för detta i framtida försök är att använda kylslingor och adsorptionsfilter efter askfiltret. Gasen behöver även odöras enligt kraven för fordonsgas. För fortsatta försök kan torkning och odöring därför ingå för att möjliggöra komprimering och tankning av ett gasdrivet fordon i syfte att demonstrera hela processen från biogas till fordonsgas. I framtida försök kan även askor från olika träddränslen användas såväl som olika biogasflöden och fukthalter. Detta i syfte att erhålla kunskaper och erfarenheter av metoden i full skala.

Förord

Följande projektarbete genomfördes som ett led i ett större EU-projekt om småskalig uppgradering av biogas. Det övergripande EU-projektet handlar om att testa två uppgraderingsmetoder under utveckling. Själva projektarbetet innefattade det första försöket med askfilter i demonstrationsskala och genomfördes med personal från RISE och SLU på Sötåsens naturbruksgymnasium.

Det övergripande projektet innefattade förberedande verksamhet som konstruktion av försöksutrustning, tidsplanering och etablerande av försöksplan. Därefter återstod genomförande av försöket i sig och slutligen behandling och sammanställning av data i rapportform. Design av askfiltret såväl som planering av försöket utfördes av Johan Andersson på RISE. Åke Nordberg på SLU assisterade i försökets utformande. Konstruktionen av askfiltret samt tillhörande övrig utrustning utfördes av Thomas Reilander och Anders Ringmar på RISE. Planeringen av projektarbetet etablerades av rapportens författare Ulf Hävermark på SLU i samarbete med Johan Andersson och Åke Nordberg i deras roller som handledare respektive ämnesgranskare. Inför försöken fraktades utrustning i omgångar till Sötåsen av Ulf som hade löpande kontakt med och hjälp från personal på Sötåsen och Moälvens värmeverk.

Vid försöket åkte Anders, Henrik Olsson (RISE), Johan och Ulf till Sötåsen och förberedde anläggningen för försöket. Anders och Johan blandade aska och vatten och matade filtret medan Henrik och Ulf arbetade med anslutningspunkter för askfiltret och mätutrustningen. När försöket påbörjades skedde övervakning och provtagning av samtliga på plats, efter första dygnet utfördes provtagningarna och mätningarna främst av Ulf. Försöket avslutades och askfiltret tömdes av Henrik och Ulf. Efter detta extraherades och sammanställdes data från temperaturloggarna och gasflödesloggen av Johan. Han tog även fram merparten av gaskvalitetsdatan som Ulf sedan bearbetade och utförde sina beräkningar på för att slutligen använda till att sammanställa sin rapport. Rapporten växte sedan fram med tät feedback från Johan och Åke. Inför presentationen läste Daniel Nilsson på SLU som examinator för projektet genom rapporten och gav feedback inför den slutliga inlämningen.

Författaren vill tacka all personal som med sin kompetens och arbetstid assisterat vid både planeringen och utförandet av försöket, samt de många konversationer och anteckningar med feedback som Johan och Åke har bidragit med.

Uppsala, oktober 2017

Ulf Hävermark

Innehåll

Bakgrund	1
Syfte och mål	2
Avgränsningar.....	2
Teori.....	2
CO ₂ -fixering.....	2
Blandning med vatten och gasens fukthalt.....	3
H ₂ S-fixering.....	3
Krav för fordonsgas	4
Material och metod.....	4
Askor.....	4
Insamling och blandning av aska.....	5
Konstruktion av askfilter	5
Gassystemet vid Sötåsens biogasanläggning	6
Försöksupställning.....	7
Provtagning och analys.....	8
Beräkningar	8
Resultat och diskussion	9
Blandning av aska	9
Ingående biogaskvalitet	9
Uppgraderad gaskvalitet	10
Gasflödet	11
Askän efter karbonatisering	12
Övergripande diskussion	13
Uppgraderingskapacitet.....	13
H ₂ S-rening.....	14
Fukt i uppgraderad gas.....	15
Slutsatser	15
Framtida studier	15
Referenser	16

Bakgrund

Förbränning av fossila bränslen leder till ökade halter av växthusgaser i atmosfären och i Sverige användes 2015 148 TWh fossil energi varav ca 60 % som drivmedel inom transportsektorn (Energimyndigheten 2017). Biobränslen kan ersätta fossila drivmedel för att minska växthusgasemissionerna (Ramakrishnan 2015). Ett av dessa drivmedel är biogas, som produceras genom rötning av biomassa och sedan uppgraderas för att kunna användas som fordonsbränsle. Uppgraderingen sker främst på biogas producerad i stora (> 3000 m³ i denna rapport) rötkammare. Från dessa storskaliga anläggningar går drygt hälften av gasen till uppgradering (Harrysson 2015). Biogas som produceras på småskaliga anläggningar skulle även kunna tillgodose en del av efterfrågan på förnybara drivmedel, dock är småskaligt producerad biogas idag svår att göra lönsam då uppgradering till fordonsgas är dyrare ju mindre gasflöden som behandlas (Bauer m.fl. 2012). Dessa mindre gårdsbaserade biogasanläggningar använder därför mestadels sin gas till kraftvärmeproduktion. Då en förhållandevis liten andel kraftvärme i Sverige framställs av fossila bränslen, till skillnad från drivmedelsektorn där denna andel är ca 80 %, finns det miljömässiga vinster att göra genom att uppgradera mer biogas till drivmedel (Harrysson 2015; Petersson 2011). Om billigare tekniker för småskalig uppgradering blev tillgängliga skulle incitamentet för att uppgradera biogas för eget bruk eller försäljning öka. Dessutom skulle möjligtvis fler gårdar våga satsa på att bygga en egen biogasanläggning och öka Sveriges totala gasproduktion, som 2014 endast till 3 % kom från småskaliga anläggningar (Harrysson 2015).

Idag finns det ett antal alternativa metoder för att uppgradera biogas från småskaliga anläggningar och fler tekniker är dessutom under utveckling (Lems och Dirkse 2012; Biosling 2012). Gemensamt för dessa är att de ska erbjuda ekonomiskt rimliga möjligheter för småskaliga producenter att uppgradera sin biogas. Två tekniker för småskalig uppgradering utvecklas vid RISE (f.d. JTI) och SLU. Den ena, *processintern metananrikning*, fungerar genom att CO₂ desorberas med hjälp av luft som blåses genom ett delflöde av rötkammarinnehåll vilket resulterar i en biogas med högre CH₄-halt. Processintern metananrikning har tidigare visats kunna uppgradera biogas från ca 60 % CH₄ till ca 80 % CH₄ (Andersson m.fl. 2014). Den andra tekniken som utvecklas är askfilter, som är en metod för att fixera CO₂ från biogasen genom att låta den passera en behållare med en fuktig askbädd. Askan och CO₂ reagerar med varandra medan CH₄ passerar filtret och således ökar CH₄-halten. Vid flera försök har gasen uppgraderats till > 97 % CH₄ (Andersson och Nordberg 2017). Utöver den CO₂-fixerande effekten från askfiltertekniken har det tidigare även demonstrerats att filtret bidrar med en effektiv H₂S-rening (Andersson, m.fl. 2017). Detta är av intresse då H₂S är korrosivt för utrustning samt giftigt för levande organismer. Askan är H₂S-fixerande en betydande längre tid efter det att CO₂-reningen har upphört (Andersson, m.fl. 2017). Som ytterligare en bieffekt stabiliserar askan efter att den har använts vilket är intressant för spridning av trädbränsleaska inom exempelvis skogsbruket (Kristoffersson 2015).

Stiftelsen lantbruksforskning (SLF), Västra götalandregionen (VGR) och Interreg ÖKS finansierar via Biogas 2020 ett projekt som RISE och SLU genomför i samarbete med Sötåsens Naturbruksgymnasium. Gymnasiets biogasanläggning utrustas med de två ovan nämnda uppgraderingsteknikerna för att göra försök med dem i demonstrationsskala, baserat på de tidigare pilotskaleförsöken. Askfiltret är tänkt att fyllas med aska från ett närliggande värmeverk och uppgradera gasen så att den uppnår svensk standard för fordonsgas vilket bl.a. innebär en CH₄-halt av 97 ± 1 % (SS 15 54 38, se övriga detaljer i teoridelen).

Askfiltertekniken har tidigare visats uppgradera biogas till fordonsgaskvalitet oavsett den ingående biogasens CH₄-halt. Askfiltret kan fungera som ensam uppgraderingsmetod och har utvärderats som

sådan i detta projektarbete. En ambition i det övergripande Biogas2020-projektet är dock att processintern metananrikning och askfilter ska användas i tillsammans för att för att maximera den mängd biogas som kan uppgraderas med samma filter. Biogasanläggningen som används i försöken har en rötchammare med 260 m³ aktiv volym, ett gasflöde på ca: 5 – 10 m³/h och en genomsnittlig gassammansättning på ca 56 % CH₄, 43 % CO₂ och 700 - 1000 ppm H₂S.

Syfte och mål

Syftet är att utvärdera uppgradering med askfilter i demonstrationskala (för ett biogasflöde på ca 5 - 10 m³/h) vid Sötåsens biogasanläggning med avseende på askegenskaper, gaskvalitet i utgående gas samt askans karbonatiseringskapacitet (CO₂-fixerande kapacitet). Målen är att:

- Samla och blanda flyg- och bottenaska från det närliggande värmeverket och ladda askfiltret.
- Nå en CH₄-halt som motsvarar fordonsgaskvalitet (97 %) samt att rena gasen från H₂S till <15 ppm vid 0 °C.
- Bestämma CO₂-fixeringskapaciteten hos den aktuella askblandningen.
- Undersöka hur askans mekaniska egenskaper påverkas av att användas i askfilter och därefter lagras utomhus.
- Ge underlag och erfarenheter inför kommande försöksdrift vad gäller kapacitet samt blandning, insamling och hantering av aska.

Avgränsningar

Detta projektarbete genomfördes inom Biogas2020-projektets ramar. Det avgränsades till ett enskilt försök på Sötåsen där endast askfilter användes som uppgraderingsmetod. Det var det första demonstrationsförsöket på anläggningen där det senare kommer utföras nya försök då processintern metananrikning och askfilter används tillsammans samt där filtret laddas med olika askblandningar.

Projektets systemgränser var från biogasens inlopp i askfiltret till förbränning av den uppgraderade gasen. Provtagningar och analyser genomfördes innan, under och efter gasens passage genom filtret. Själva produktionen av biogasen i rötchammaren eller gasens slutliga användning som fordonsbränsle avhandlades inte i detta projektarbete, även om de områdena spelar viktiga roller i Biogas2020-projektet överlag.

Teori

CO₂-fixering

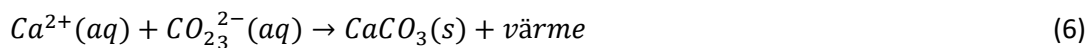
Principen bakom askfilter är att använda metalloxider i form av främst CaO i askan för att rena biogasen från CO₂ genom karbonatisering. Detta uppnås genom att låta gasen passera en bädd av fuktig aska. Processen består av flera steg där fri CO₂ reagerar exotermt med Ca och bildar kalciumkarbonat enligt (2 - 6). Först blandas askan med vatten så att kalciumjonerna frigörs:



När den fuktiga askan laddats i filtret släpps biogasflödet på och CO₂ karbonatiseras enligt:



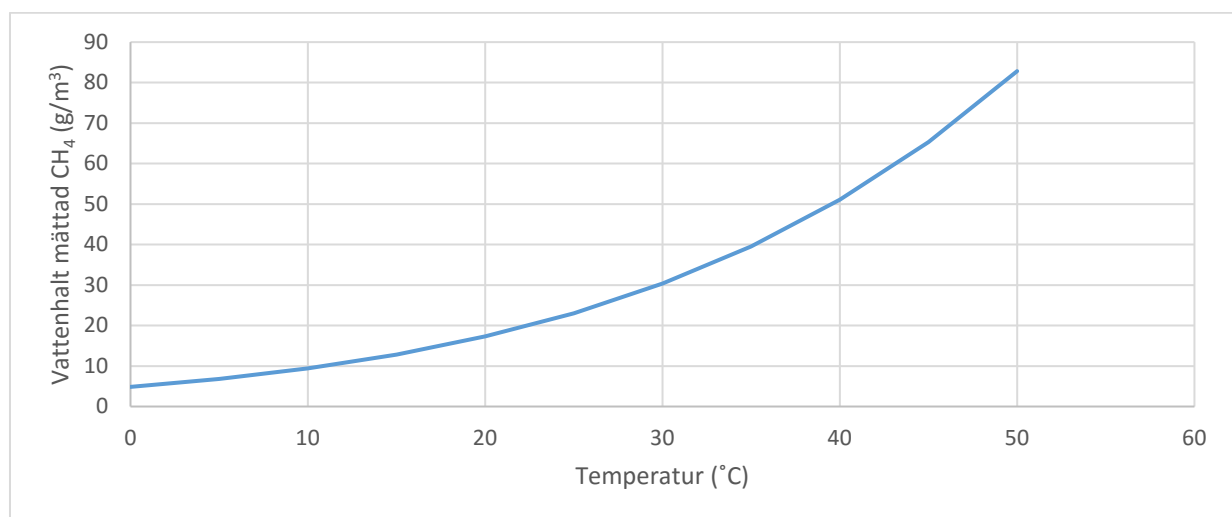
Kalcium- och karbonatjonerna kan nu reagera och bilda kalciumkarbonat enligt:



Med CO₂ fixerad som CaCO₃ i askbädden har den utgående gasen renats från CO₂ och CH₄-halten har ökat. Filtret kan fixera CO₂ tills dess att askan har mättats och inget Ca längre kan karbonatiseras. Vid detta skede behövs ny aska om uppgraderingen ska fortgå. Drifttiden för en mängd aska beror av gasflödet, den ingående CO₂-halten i biogasen samt kvaliteten på askan (Andersson 2013). En konsekvens av vätejonerna som frigörs i processen är att pH på askan sjunker något i takt med att filtret används. Askans förmåga att rena biogas från CO₂, dess kapacitet, anges i projektet som g CO₂/kg torr aska. Denna kapacitet varierar beroende på vad askan kommer från för bränsle, hur effektiv förbränningen var samt dess fukthalt. Tidigare försök har uppnått kapaciteter mellan 100 – 240 g CO₂/kg torr aska (Andersson 2013).

Blandning med vatten och gasens fukthalt

Askans blandas inledningsvis med vatten för att starta processen beskriven i (1). Det är viktigt att tillräckligt med vatten tillförs för att fuktig aska ska kunna reagera med CO₂ i hela askbädden. Samtidigt får det inte vara så mycket vatten att porvolymen fylls upp, vilket förhindrar ett effektivt utspritt gasflöde. Vid blandning med vatten och aska benämns proportionerna i rapporten som L/S-kvot vilket är förhållandet mellan vätska (liquids) och aska (solids). Försök har visat att beroende på askan kan en L/S-kvot på ca 0,2 – 0,4 ge en fungerande CO₂-fixering (Andersson och Nordberg 2017). Dessutom för biogasen ofta med sig vatten in i filtret. Eftersom karbonatiseringen är exoterm är den utgående gasen varm och således finns det ett intresse av att studera vattenhalten på den uppgraderade gasen för att utröna om filtret torkas ut eller fuktas upp av processen. Om gasen antas vara fuktmättad har den en fukthalt enligt Figur 1 (*Humidity Calculator*).



Figur 1: Den mängd vatten som fuktmättad CH₄ innehåller vid olika temperaturer.

H₂S-fixering

Den H₂S-fixerande effekten hos askfiltret uppstår då metalljoner i askan reagerar med svaveljoner i biogasen och bildar sulfider, vilket illustreras med järn i (7 - 9):



Krav för fordonsgas

För att uppnå fordonsgaskvalitet (SS 15 54 38) behöver biogasen bestå av följande sammansättning (Petersson, 2011):

- CH₄-halt på 97 ± 1 % (± 2 % för motorer med lambda-reglering)
- vattenhalt på max 32 mg/Nm³ (39 ppm vid 0 °C och 1 atm)
- CO₂ + O₂ + N₂ volymhalt på max 4,0 % (5,0 med lambda-reglering)
- O₂-halt på max 1,0 %
- H₂S-halt på max 23 mg/Nm³ (15 ppm vid 0 °C och 1 atm)
- kväveföreningar exklusive N₂ på max 20 mg/Nm³
- max partikelstorlek på 1 µm.

Material och metod

Askor

Både flyg- och bottenaska från trädbränslen förbrända vid VänerEnergi AB:s värmeverk vid Moelvans industriområde i Töreboda användes för försöket. Denna aska producerades nära Sötåsen och ansågs därför vara rimlig att använda till demonstrationsförsök. Bottenaskan var kompakt och tung, medan flygaskan var dammig och luftig. I Tabell 1 visas sammansättningarna hos askorna från värmeverket vid en tidigare genomförd analys på ackrediterat laboratorium (ALS Scandinavia AB).

Sammansättningen hos askan vid det aktuella försökstillfället analyserades inte.

Tabell 1. Sammansättningen av metalloxider hos askorna.

	Flygaska	Bottenaska	Enhet
TS	94,1	99,5	%
SiO ₂	1,64	29,5	% av TS
Al ₂ O ₃	0,169	6,48	% av TS
CaO	17,9	25,3	% av TS
Fe ₂ O ₃	0,543	2,61	% av TS
K ₂ O	7,33	9,76	% av TS
MgO	2,10	4,37	% av TS
MnO	2,28	2,19	% av TS
Na ₂ O	2,36	2,00	% av TS
P ₂ O ₅	0,554	2,70	% av TS
TiO ₂	0,0768	0,289	% av TS
Summa	35,0	85,2	% av TS
Glödförlust (1000 °C)	60,7	11,7	% av TS

Värt att notera är att torrsubstansen (TS) i dessa prover för botten- och flygaskan var mycket hög (>94 %). Utöver det innehöll flygaskan 60,7 % glödförlust vilket är en kombination av bl.a. oförbränt organiskt material, oorganiskt kol och lättflyktiga salter (Bjurström 2006). En hög halt av dessa begränsar dess förmåga att fixera CO₂ då halten CaO blir relativt låg. En annan konsekvens av detta är att flygaskan får en lucker struktur. Bottenaskan innehöll i sin tur mindre oförbränt och en högre andel CaO samt var tät i sin beskaffenhet jämfört med flygaskan. Till försöket valdes att blanda

askorna för att erhålla en kombination av de båda askornas CO₂-fixeringspotential samt mekaniska struktur.

Insamling och blandning av aska

För att samla och lagra aska konstruerades en container för bottenaska (Figur 2) samt en för flygaska som placerades vid värmeverket innan försöken inleddes. Dessutom kunde behållarna transporteras med lastmaskin och tömmas via en eldriven skruv vilket minimerade hälsoriskerna förknippade med askhantering ytterligare. Även om hanteringen så långt som möjligt genomfördes i slutna behållare användes skyddsutrustning för ögon och luftvägar vid hanteringen då askorna innan blandning med vatten var torra och dammiga.



Figur 2: Uppsamlingscontainern för bottenaska redo för transport. De två rören på taket samlade upp aska som sedan kunde tömmas från sidan via en skruv.

När en tillräckligt stor mängd aska var samlad blandades den med vatten i en cementblandare (Fliegl Mischmeister 802 SS, 800 l kapacitet) och placerades sedan i askfiltret. Påfyllnaden genomfördes satsvis tre gånger då blandaren var för liten för att ta allt på en gång. Den slutliga blandningen av aska och vatten, samt vikten hos askfiltret kan läsas i Tabell 2:

Tabell 2: Vikten för aska, vatten samt total nettovikt.

	Vikt (kg)
Bottenaska	848
Flygaska	251
Vatten	275
Totalvikt (netto)	1374

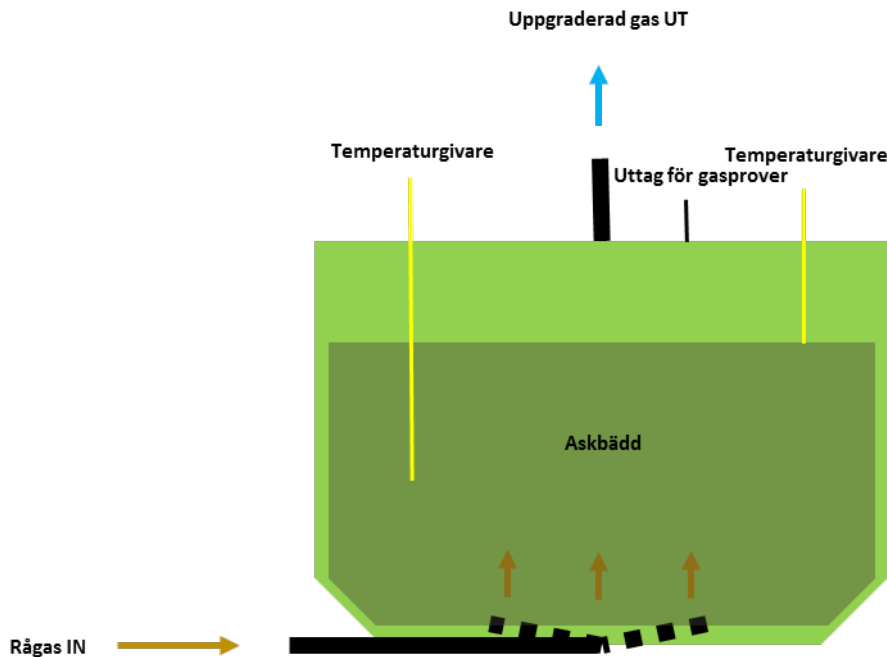
Förhållandet mellan flyg- och bottenaska var 0,30 och mellan vatten och torr aska 0,25. Blandningsförhållandet för askorna på 0,30 valdes med utgångspunkt från insamlade mängder samt önskad porositet.

Konstruktion av askfilter

Askfiltret med en volym av 3 m³ designades av Johan Andersson (RISE) och ritningen togs fram med CAD samt konstruerades i verkstaden på RISE. Även en upphängningsanordning för att manuellt

vinscha av och på locket till askfiltret byggdes. Dimensionering och detaljerad utformning av askfiltret kan inte anges p.g.a. pågående patentutredning.

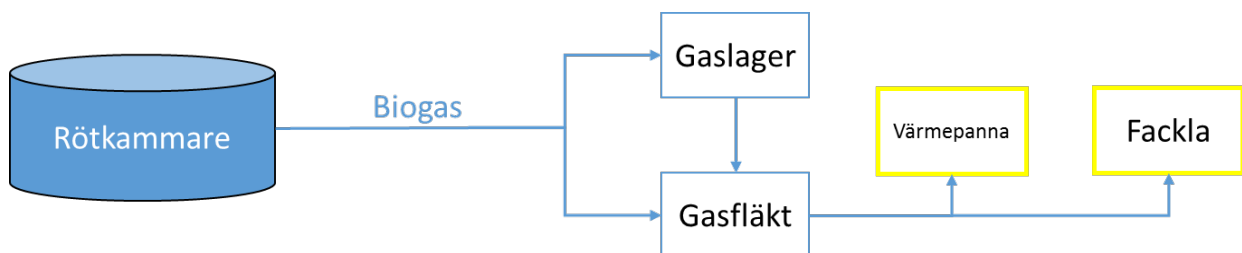
Figur 3 visar en schematisk bild över hur biogas passerade askbädden via inlopp i botten på filtret. När gasen nådde utloppet hade karbonatiseringen i den fuktiga askan renat gasen på CO₂. Temperaturgivare nedstucken 35 cm i askan samt på ytan av askan loggade temperaturerna under försökets lopp. Ett litet utlopp på locket möjliggjorde provtagning av den uppgraderade gasen i filtrets headspace.



Figur 3: Översiktsbild av askfiltrets konstruktion.

Gassystemet vid Sötåsens biogasanläggning

Sötåsen förbränner vanligtvis sin biogas i en panna som levererar värme till röt-kammaren. Det finns även en fackla som används då gasen av en eller annan anledning inte kan gå till pannan. Systemet ser ut enligt Figur 4.

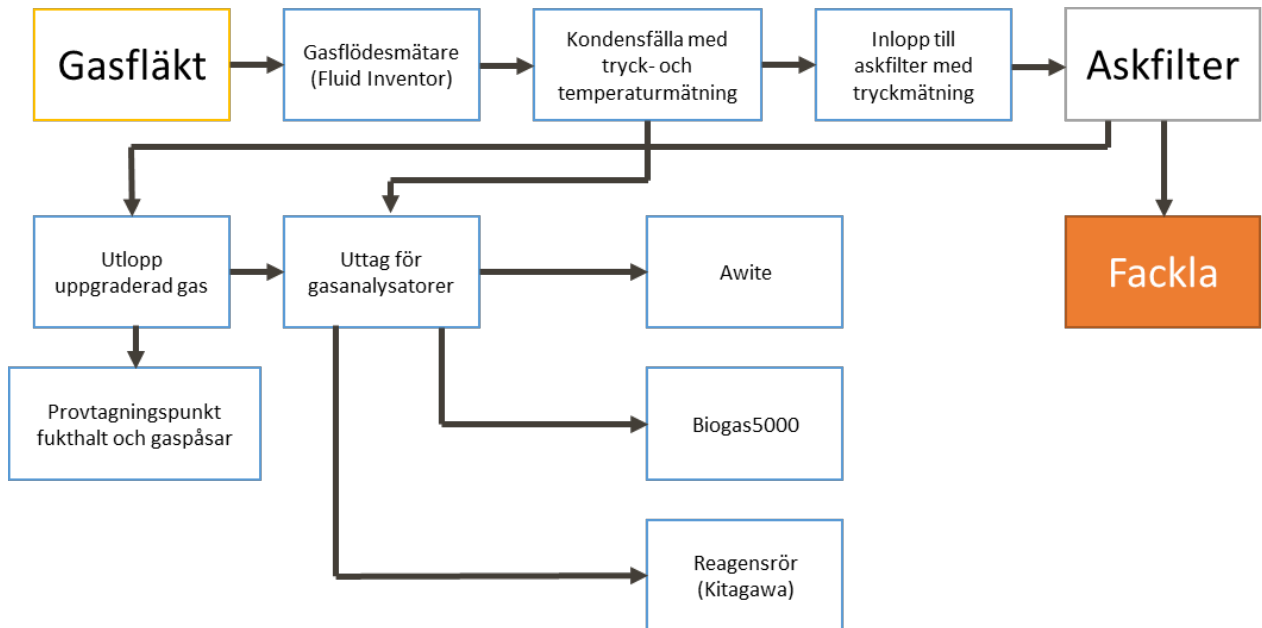


Figur 4: Blockschema över det ordinarie gassystemet på Sötåsen.

Röt-kammaren levererar biogas via en gasflödesmätare in i en nedgrävd ledning. Denna ledning är öppet ansluten till ett gaslager samt en gasfläkt som driver gas till pannan eller facklan beroende på driftsinställningar. Biogasflödet ligger oftast mellan 5 – 7 m³/h, och när produktionen överskrider behovet från pannan fyller gasen på gaslagret. Genom det befintliga styrsystemet kan gaslagrets fyllnadsgrad ställas in, vilket utnyttjades innan försöksledet då pannan och facklan stängdes av för att så mycket biogas som möjligt skulle fylla på lagret.

Försöksuppställning

Vid försöket kopplades askfiltret och mätutrustningen in efter gasfläkten och innan pannan och facklan (Figur 4). Gasen leddes ut av fläkten via en utgång mellan pannan och facklan. Figur 5 visar en principiell skiss över gasens väg under försöket.



Figur 5: Blockschema över försöksuppställningen.

Figur 5 beskriver hur biogasen fläktades till en gasflödesmätare med automatisk loggning såväl som en display varifrån manuella avläsningar gjordes. Härifrån leddes biogasen vidare in i en kondensfälla med utgång för analyser av systemtrycket, gastemperaturen och gassammansättningen. Temperatur- och tryckdatan användes senare för att normalisera gasflödesdatan till 1 atm och 0 °C.

Vidare leddes gasen in i askfiltret där den passerade ytterligare en kondensfälla med en provtagningspunkt för tryck. Därefter spreds gasen jämnt i filtrets botten. Efter att gasen stigit genom askan gick den vidare till utloppet i locket. Merparten av den uppgraderade gasen leddes via ett vattenlås till destruering i facklan. I locket fanns även ett mindre utlopp där uppgraderad gas leddes till samma analysutrustning som användes på ingående biogas. Omväxlingen mellan vilken gas som analyserades gjordes manuellt via ventiler vid mätutrustningen. Temperaturen i samt ovanpå askbädden loggades av temperaturgivare. På locket fanns även en provtagningspunkt för tryckmätningar och påfyllning av provpåsar för GC-analyser.

Gasanalyserna testkördes och kalibrerades upprepade gånger med gas från två gasflaskor (AGA) med 60,000 % CH₄ och 40,000 % CO₂ respektive 97,000 % CH₄ och 3,000 % CH₄ beroende på vilka gassammansättningar den in- och utgående gasen hade. Inledningsvis mättes biogasen av Biogas5000 efter en kalibrering mot 60 % CH₄. Därefter kalibrerades Awite för 97 % för att kunna göra bättre analyser på den uppgraderade gasen. Då Biogas 5000 lämpar sig bättre vid CH₄-halter runt 70 – 90 % än Awite, användes datan från den med täta intervall vid uppstart av försöket samt efter att askfiltret hade fått ett genombrott, d.v.s. då CO₂-halten i den uppgraderade gasen översteg 1 %. Mätosäkerhet hos analyserna samt N₂ ingick i balansen (den andel gas som varken var CH₄, CO₂, H₂S eller O₂).

Efter avslutat försök tömdes askfiltret på aska och lades i en hög utomhus för att egenskaperna efter en tids lagring skulle kunna undersökas med avseende på fysiska egenskaper som kornstorlek och porositet.

Provtagning och analys

Gasflödet mättes med en Fluid Inventor UNI200, temperaturerna registrerades med TinyTag view2. Geotech Biogas5000 fungerade både som ett automatiskt och manuellt mätinstrument. Under uppstarten av försöket användes den automatiska loggningsfunktionen hos Biogas5000 för att analysera den uppgraderade gasen. Därefter skedde de automatiska mätningarna med Awite AwifLEX Cool+, ända fram till genombrottet då Biogas5000 återigen loggade värdena automatiskt. Under tiden som Biogas5000 inte var inställd att logga användes den för att manuellt mäta den ingående biogasens sammansättning.

Manuella mätkampanjer genomfördes som komplement till den automatiska loggningen med instrumenten. Dessa genomfördes dels vid tidpunkter då dynamiken ändrades (vid uppstart och genombrott), dels under stabil drift för att ge ytterligare underlag att bekräfta data vid senare sammanställning. En manuell mätkampanj bestod övergripande av att göra alla de manuella mätningarna i ett svep. De manuella mätningarna inkluderade analyser med absorbertrör av märket Kitagawa med mätområdena: H₂: 0,05 – 0,8 %, H₂S: 1 – 60 ppm och 25 – 2000 ppm, CO₂: 0,1 – 5,2 % och 5 – 50 %. Därefter mättes systemtrycket (Testo) och analyser genomfördes manuellt med Biogas5000 (i förekommande fall) samt insamling av gasprover i gaspåse till gaskromatograf (GC)-analyser (vid särskilt intressanta tillfällen, vilka redovisas i Tabell 3 i resultatdelen). GC-analyserna genomfördes på RISE:s laboratorium med en gaskromatograf utrustad med en termisk konduktivitetsdetektor enligt SS-ISO6974.

Beräkningar

De ingående flödena av de enskilda gaserna till askfiltret togs fram genom att beräkna medelvärdena för respektive beståndsdel i biogasen under försökets gång. Dessa värden multiplicerades med gasflödesdatan för att ge de olika flödesandelarna (10).

$$\text{Enskild gashalt} \left(\frac{\%}{100} \right)_{\text{medel}} * \text{Biogas} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \text{Enskilt gasflöde} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (10)$$

För att bestämma de gasolymer som absorberades av filtret beräknades flödena av de olika gaserna hos den uppgraderade gasen under försökets gång med hjälp av datan från den uppgraderade gasens kvalitet och det kända flödet CH₄ som lämnade filtret. Det antogs att samma flöde CH₄ som gick in i filtret även gick ut (11). Dessa beräkningar utfördes genom att ett medelvärde för varje två intilliggande gasanalyser beräknades, och multiplicerades därefter med respektive ingående gasflödesdata för tiden mellan dessa två tidpunkter (12). På så vis erhöles så många beräkningar på den uppgraderade gasen som möjligt med den gasanalyssdatan som fanns.

$$CH_{4IN} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = CH_{4UT} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (11)$$

$$\text{Enskild uppg. gashalt} \left(\frac{\%}{100} \right)_{t_2-t_1} * \text{Enskilt gasflöde} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)_{t_2-t_1} = \text{Enskilt uppg. gasflöde} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)_{t_2-t_1} \quad (12)$$

Den volym gas som absorberades i askfiltret beräknades genom att subtrahera ingående gasflöde med den utgående vid vartenda av dessa tidsintervall. Vid uppstart och genombrott var dessa tidsintervall kortare än under stabil drift eftersom mätningarna skedde oftare.

$$\frac{CH_{4UT} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{CH_{4UT} \left(\frac{\%}{100} \right)} = CH_{4UT} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) + CO_{2UT} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (13)$$

Om den utgående volymen CO₂ från (13) löses ut ges (14),

$$CO_{2UT} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{CH_{4UT} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{CH_4 \left(\frac{\%}{100} \right)} - CH_{4UT} \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (14)$$

vilket tillsammans med ingående CO₂-flöde gav den absorberade volymen. Dessa beräkningar användes även för att ge momentana ingående flöden av olika gaser och deras fixering samt den totalt ackumulerade fixeringen, vilket redovisas i Figur 8 i resultatdelen.

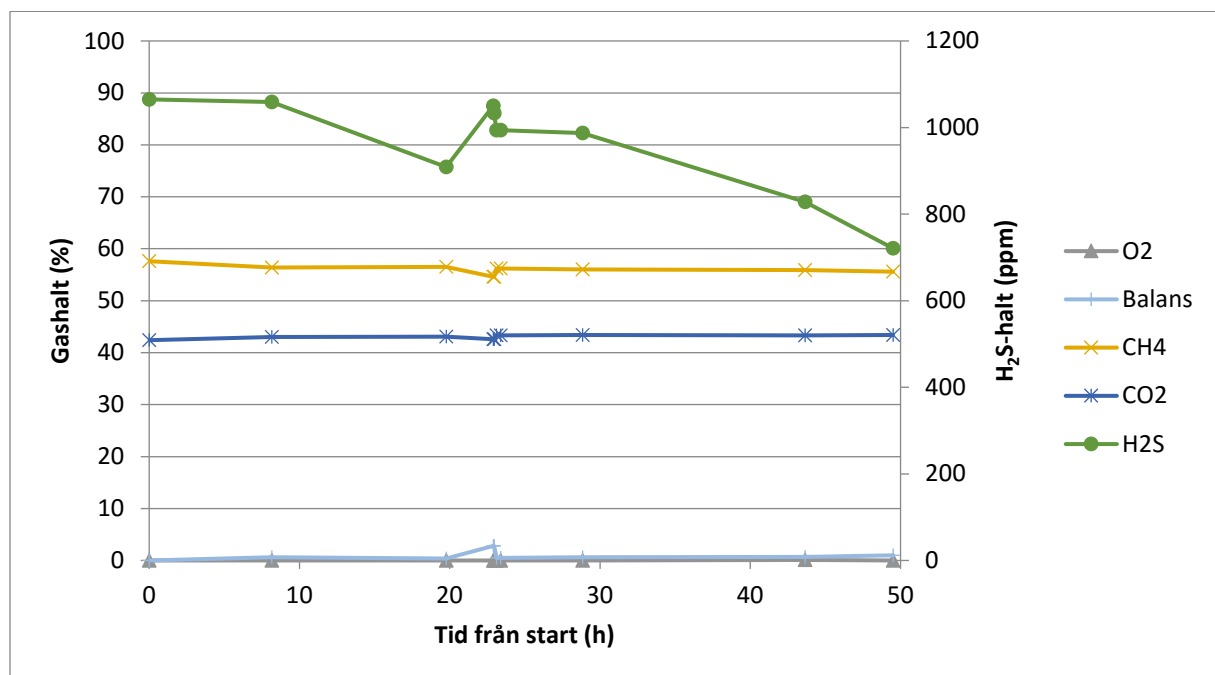
Resultat och diskussion

Blandning av aska

Den satsvisa laddningen av aska från blandaren till filtret fungerade väl och gav en homogen blandning av fuktig aska med en mörkgrå färgton. Containern med flygaska tömdes över till den toppmatade blandaren som planerat med hjälp av den eldrivna skruven i botten av containern. Containern innehållandes bottenaska fick inledningsvis tippas och skakas med en lastmaskin för att aska skulle rinna ut genom dess uttagslucka eftersom elmotorn som drev skruven inte kunde hantera hela vikten hos den samlade bottenaskan. Vid detta arbetsmoment användes skyddsutrustning i form av skyddsmask för ögon och luftvägar samt skyddshandskar då askorna, i synnerhet flygaskan, dammade innan vattnet hade blandats in. Sammantaget blev askan väl blandad med vattnet med vald utrustning och metod. Dock kunde det konstateras att elmotorn som drev skruven för bottenaskan behövde vara starkare eller ha en annorlunda utväxling.

Ingående biogaskvalitet

Innan uppstart och under försökets gång togs analyser på biogasen innan den fördes genom askfiltret för att möjliggöra beräkningar på askans kapacitet (Figur 6).



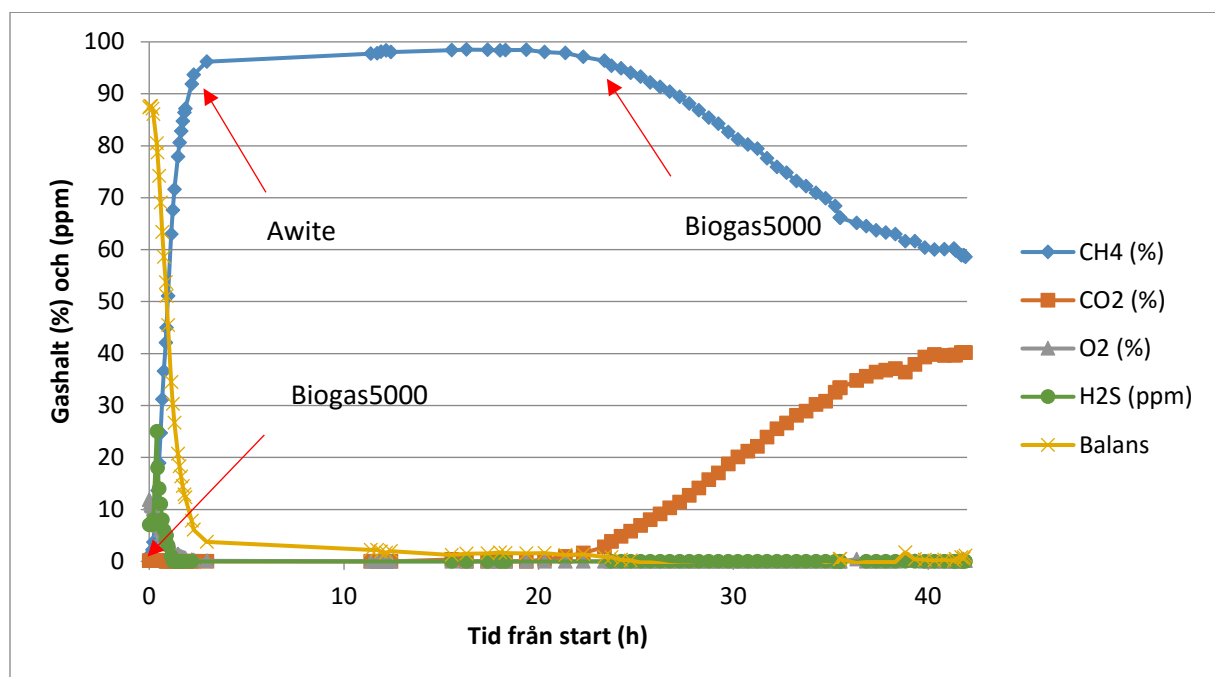
Figur 6: Gassammansättningen på den ingående biogasen från sju timmar innan försökets början till dess slut, analyserad från kondensfällan efter gasflödesmätaren.

Resultaten visade att biogaskvaliteten avseende CH₄ och CO₂ var jämn under försökets längd på ca två dygn. Eftersom själva rötningsprocessen inte påverkas av askfilter var detta förväntat. H₂S-halten sjönk från ca 1000 ppm till ca 700 ppm under tiden men var inte anmärkningsvärt baserat på tidigare driftsdata från Sötåsens biogasanläggning. Resultaten visar att en del atmosfärsluft läckte in i slangen

i samband med provtagning efter 23 h. Orsaken till detta var att provtagningsslangen hade avlägsnats en kort stund innan för att möjliggöra en provtagning med absorbertrör precis innan gasanalysatorn satte igång en analys. Detta resulterade i att balansen tillfälligt ökade till 2,8 % samt att halten CO_2 och CH_4 gick ned något. Med den provtagningen exkluderad erhöles följande genomsnittliga sammansättning på biogasen: CH_4 : 56,3 %, CO_2 : 43,2 %, O_2 : 0,01 %, H_2S : 945 ppm och balans: 0,54 %. Den återstående balansen kan dels vara en följd av osäkerheten i mätinstrumenten samt utgöras av små mängder atmosfärluft i gassystemet, exempelvis som en rest av gammal luft i gaslagret. Detta stöds av att GC-analys för ingående biogas vid avslutning av försöket visade 0,6 % N_2 (Tabell 3).

Uppgraderad gaskvalitet

Analyser av den uppgraderade gasen visas från Biogas5000 då CH_4 -halten var mindre än 90 % och från Awite då den var över 90 % under uppstart i Figur 7. Strax efter genombrott av > 1 % CO_2 användes Biogas5000 igen då den kunde utföra mätningar i tätare intervall.



Figur 7: Gassammansättningen på den utgående uppgraderade gasen under försöket.

Inledningsvis sjönk balansen från drygt 80 % ned mot ca 1 %. Under detta skede tömdes askfiltret på dess atmosfärluft i takt med att biogasen passerade. Även O_2 -halten minskade ned mot 0 % under samma tid. Detta korrelerar med att CH_4 -halten steg från 0 % till ca 97 % under samma tidsrymd samt att CO_2 inte kunde detekteras i utgående gas. Med andra ord fylldes askfiltret snart med biogas vars CO_2 fixerades och gasen blev uppgraderad. CO_2 -halten steg först vid genombrottet efter drygt 21 h till en nivå som kunde registreras av mätutrustningen. Vid samma tidpunkt sjönk CH_4 -halten eftersom en del biogas därefter tog sig igenom utan fullständig uppgradering. Försöket fortsatte efter genombrottet till dess att koncentrationerna av CH_4 och CO_2 motsvarade den inkommande biogasen. H_2S -halten hölls nere även efter genombrottet. GC-analyserna (5 st) kompletterade utvärderingen av uppgraderingen (Tabell 3).

Tabell 3. GC-analyser genomförda på RISE från prover tagna med gaspåsar. Biogas är analys på rågasen från röt-kammaren, resten är den uppgraderade gasen.

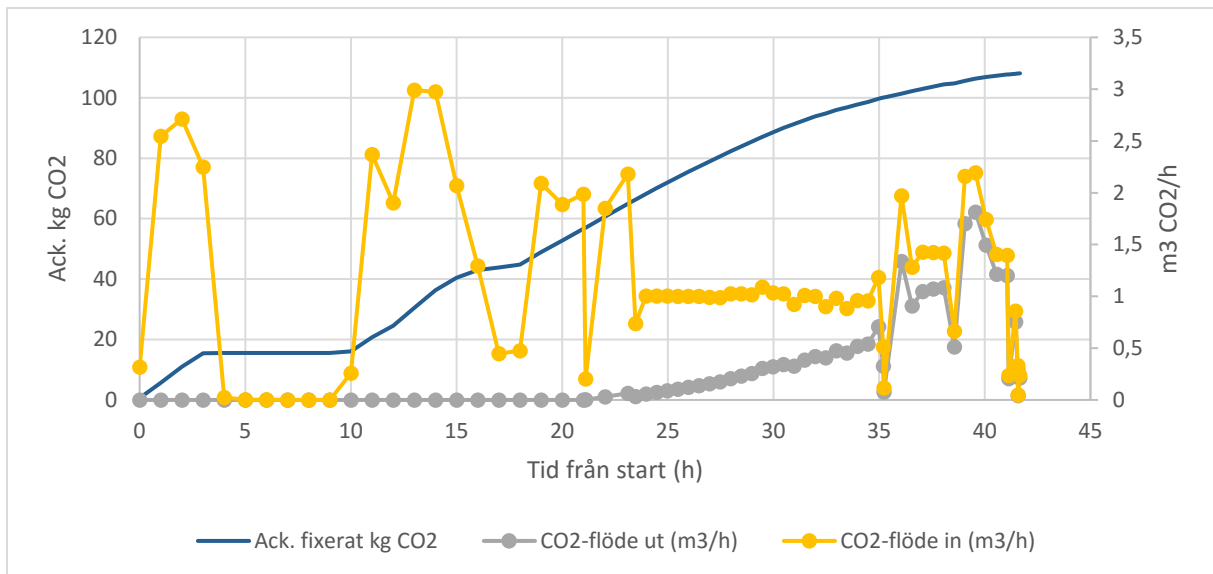
Prov	Tid (h)	CH ₄ vol-%	CO ₂ vol-%	CO vol-%	O ₂ vol-%	H ₂ vol-%	N ₂ vol-%	H ₂ S vol- ppm	H ₂ O vol-%
Uppstart	1,27	78,9 ± 0,8	<0,1	<0,1	1,7 ± 0,1	<0,1	19,1 ± 0,2	<2	0,4 ± 0,1
Drift (steady state)	12,2	97,6 ± 1,0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,9 ± 0,3	<2	1,5 ± 0,1
Genombrott	22,8	95,0 ± 1,0	2,3 ± 0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,3 ± 0,3	<2	1,4 ± 0,1
Avslut	42,3	58,8 ± 0,6	39,3 ± 0,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,8 ± 0,3	<2	1,0 ± 0,1
Biogas	42,3	56,5 ± 0,6	42,2 ± 0,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,6 ± 0,3	750 ± 80	0,8 ± 0,1

Enligt analyserna fixerades all mätbar CO₂ så länge filtret fungerade med full kapacitet, d.v.s. från uppstart till genombrott. Att CH₄ trots det inte gick till 100 % kan möjligtvis delvis förklaras av en del balans i form av kvävgas från den ingående biogasen (Tabell 3). Det är även möjligt att Biogas5000 inte klarade av att registrera 100 % CH₄, men Awite och GC-analyserna kompletterade data för de högsta CH₄-halterna på ca 97,6 %. GC-analyserna indikerar att den uppgraderade gasen var fuktig. Exakt vilken fukthalt gasen hade vid försöket är något osäkert, eftersom gasen kan ha kylts av något då den samlades in och därigenom kan kondens ha fällts ut vid provtagningsrörets väggar.

Gasflödet

Direkt efter att försöket startades, d.v.s. gas släppts in i askfiltret, justerades flödet något genom att vattennivån i vattenlåset vid kondensfällan efter askfiltret höjdes eller sänktes. Biogasflödet låg därefter mellan 4 – 7 m³/h bortsett från ett par uppehåll. Försöket startades ca kl. 22:00 och under första natten frös kondens i slangen och satte stopp för den utgående gasen, vilket syns mellan 4 - 9 h i Figur 8 som visar flödena av CO₂ in i och ut ur askfiltret samt den ackumulerade mängden som fixerades. Efter ca 15 h sänktes flödet för att tillåta service av facklan. Den andra natten arbetades det i tvåskift på anläggningen för att undvika ytterligare proppbildning. Slutligen efter 24 h varierades gasflödet beroende på nivån i gaslagret över tiden, när det var nästan fullt togs så mycket gas som möjligt ut. Detta resulterade i ett stabilt flöde från ca 24 h till 35 h och därefter varierande i takt med hur mycket biogas som producerades.

Filtrets kapacitet delades upp i fixering innan genombrott, efter genombrott och sammanlagd fixering. Det varierande CO₂-flödet illustreras i Figur 8, där det även blir tydligt hur CO₂-flödet ut ur filtret ökade efter genombrott.



Figur 8: In- och utgående volym CO₂ samt den ackumulerade fixerade vikten.

Värt att notera är att askfiltret uppgraderade gasen trots det kraftigt varierande gasflödet, det var med andra ord opåverkat av intermitterande drift. Innan genombrottet fixerades 52,13 g CO₂/kg torr aska, därefter fixerades ytterligare 47,37 g CO₂/kg torr aska fram till att försöket avslutades och den utgående volymen CO₂ var i princip densamma som den ingående, se Figur 8. Efter genombrottet ökade den utgående CO₂-volymen kontinuerligt. Av askfiltrets totala uppgraderingskapacitet skedde 52,4 % innan genombrottet och 47,6 % efter. Under försöket fixerades 0,22 g H₂S/kg torr aska, vilket motsvarade den totala mängden H₂S som passerade filtret.

Askan efter karbonatisering

Den använda askan samlades i en hög utomhus. Askan var mer grovkornig efter försöket än innan och upplevdes inte dammig. Den var tillräckligt lucker för att grävas i och hade inte härdat ihop i större klumpar. Efter fyra månader såg askan ut som i Figur 9. Konsistensen hade lika egenskaper som då askan samlades för lagring och hade inte heller nu härdat ihop till tunga stycken, möjligtvis för att all härdning redan skett under försöket. Enstaka korn med ca 2-3 cm diameter kunde plockas upp och smulas sönder med fingrarna, i övrigt var kornstorleken under en halv centimeter i diameter och dessa korn var något svårare att smula sönder. Resultaten indikerar att askan inte skulle behöva krossas inför en eventuell återföring till skogen. Dock behöver vidare försök genomföras för att undersöka hur kornen av aska löser upp sig och tränger ned i marken vid spridning.



Figur 9: Den använda askan efter fyra månader utomhus.

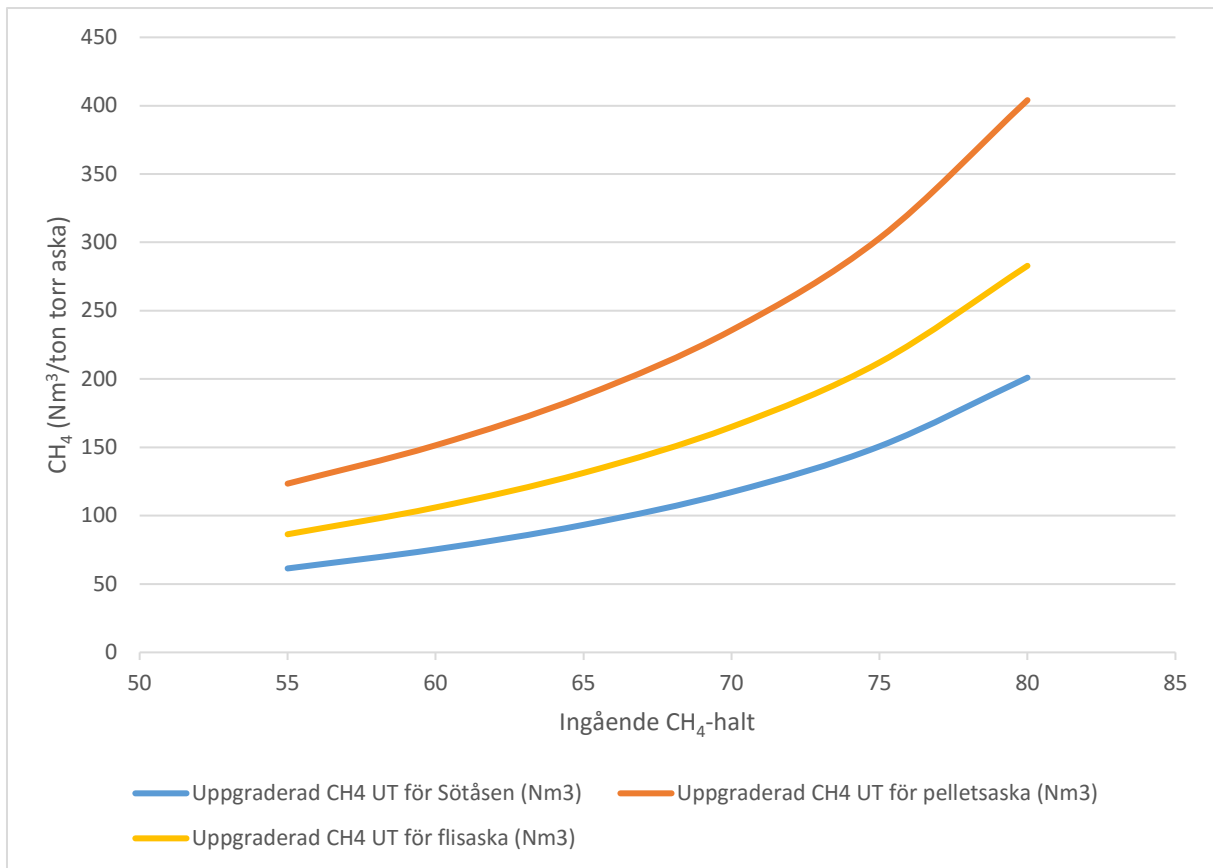
Övergripande diskussion

Uppgraderingskapacitet

Försöket visade att askfiltret renade biogasen fullständigt under ca 52 % av den totala drifttiden, därefter släpptes en del CO₂ igenom askbädden. Under återstoden av försöket renades dock fortfarande biogasen med en avklingande effekt. Detta innebär att ytterligare minst ett filter skulle behöva kopplas i serie för att hela kapaciteten i filtret skulle utnyttjas. Om det filter som har varit i bruk längst alltid placeras först i kedjan kan det användas tills dess CO₂-fixering helt har avstannat, eftersom det fräscha filtret då tar hand om den allt mindre uppgraderade gasen som lämnar det första filtret. När ett filter sedan är mättat ska det tömmas och fyllas på med ny aska för att sedan placeras sist i kedjan. På detta vis skulle det finnas kontinuerlig tillgång till fordonsgas på anläggningen så länge biogas- och askproduktionen är tillräcklig.

Huvudsyftet med detta försök var att demonstrera askfiltertekniken tillämpat i demonstrationsskala på en gårdsbaserad biogasanläggning samt att undersöka den tekniska prestandan hos filtret. Resultaten indikerade att filtret uppgraderade gasen enligt målet, vilket tidigare har visats i laboratorieskala. Detta var det första försöket av flera planerade. Det var med andra ord inte optimerat för att ge en så stor uppgraderingskapacitet som möjligt. Det kan dock vara intressant att ställa dessa tidiga resultat mot några försök i laboratorieskala. För pelletsaska har det tidigare påvisats en kapacitet på 200 g CO₂/kg torr aska. Denna höga fixeringsgrad uppnåddes genom att använda en väl förbränd aska med hög CaO-halt. Även askblandning från sågverksflis gav bra fixering på 140 g CO₂/kg torr aska (Andersson 2013). Därav bör försöket vid Sötåsens resultat på 99 g CO₂/kg torr aska kunna förbättras exempelvis med en bättre aska.

En aspekt som har stor inverkan på hur mycket fordonsgas som kan ges av askfiltret är den ingående biogasens halt av CO₂. Gaskvaliteten på biogas beror på många faktorer såsom exempelvis substratsammansättning och rötningsprocessens stabilitet. Som nämndes i bakgrunden ingår detta försök i ett större projekt där även processintern metananrikning ingår, vars användande också har en inverkan på biogasens kvalitet. I Figur 10 har därför den totala fordonsgasproduktionen för olika askor och olika ingående gaskvaliteter beräknats.



Figur 10: Den totala mängden uppgraderad fordonsgas som erhålls för olika askors fixeringskapacitet vid olika ingående biogaskvaliteter.

Det framgår av Figur 10 att spannet av hur mycket fordonsgas som erhålls per ton torr aska är starkt beroende på vilka ingångsvariablerna är. Med en CH₄-halt på 55 % och 45 % CO₂ med den aska som användes vid försöket på Sötåsen erhålls drygt 61 m³ fordonsgas för varje ton torr aska. I andra änden av spektrumet finns pelletsaskan med den högsta observerade fixeringskapaciteten av 200 g CO₂/kg torr aska och dessutom inkluderat processintern metananrikning som försteg med 80 % CH₄- och 20 % CO₂-halt. Med dessa förutsättningar skulle drygt 404 m³ fordonsgas erhållas per ton torr aska. Dessa hypotetiska bästa och sämsta förutsättningar kan i nuläget vara lite väl extrema. Därför beräknades även fordonsgasproduktionen för kapaciteten hos flisaskan på 140 g CO₂/kg torr aska för olika ingående biogaskvaliteter. För dessa var motsvarande värde drygt 86 respektive 282 m³ fordonsgas per ton torr aska beroende på ingående gassammansättning och askans kapacitet att karbonatisera CO₂.

H₂S-rening

Tidigare försök har visat den H₂S-renande effekten askfilter har på biogas. H₂S-fixering på upp till 62 g H₂S/kg torr aska har demonstrerats (Andersson m.fl. 2017). Även under detta försök renades biogasen på H₂S till nivåer som inte gick att detektera. Då detta försök främst handlade om CO₂-fixering avslutades försöket innan den H₂S-renande effekten hade avtagit. Därför erhöles inte data om hur länge filtret med denna aska skulle kunna användas enbart som H₂S-filter. Under försöket fixerades 0,22 g H₂S/kg aska, och även om de tidigare försöken inte helt kan jämföras med detta då olika askor nyttjades, hade filtret rimligtvis kunnat användas en avsevärt längre tid om endast H₂S-rening varit efterfrågat.

Fukt i uppgraderad gas

En konsekvens av den exoterma karboniseringsprocessen i kombination med fuktiga askbädden blev att den uppgraderade gasen var fuktig när den lämnade askfiltret. Således behöver den torkas innan den kan användas som drivmedel i framtida försök. Detta kan förslagsvis genomföras med ett coalescingfilter samt ett adsorptionsfilter. Efter detta bör sannolikt ett partikelfilter (förslagsvis ett till coalescingfilter) användas för att avlägsna eventuella partiklar från torkmaterialet. Ju mer gasen kyls ned innan den passerar dessa filter desto mer fukt fälls ut vilket är önskvärt då torkmaterialet i adsorptionsfiltret inte mättas lika fort ju lägre fukthalt gasen har.

Slutsatser

- Försöket visade att askfiltret fungerade i demonstrationsskala på Sötåsens biogasanläggning.
- Den använda askblandningen, som bestod av 848 kg bottenaska och 251 kg flygaska från Moälvens värmeverk, hade en CO₂-fixeringskapacitet på 99 g CO₂/kg torr aska.
- Knappt hälften av kapaciteten återstod efter genombrottet, alltså bör minst två askfilter användas i serie för att askan ska utnyttjas fullt ut och fullständigt uppgraderad gas ska erhållas hela tiden. Det äldsta filtret bör placeras först i kedjan vid varje byte.
- All ingående H₂S fixerades av filtret vilket adderade upp till 0,22 g H₂S/kg torr aska. Troligtvis kunde betydligt mer H₂S renas med samma aska.
- Innan genombrottet höll den uppgraderade gasen följande kvalitet (vol-%): CH₄: 97,6, CO₂: <0,1, CO: <0,1, O₂: <0,1, H₂: <0,1, N₂: 0,9, H₂O: 1,5, H₂S: <2 (vol-ppm). För helt torr gas motsvarar detta CH₄: 99,1, N₂: 0,9. Detta innebär att gaskvalitetskraven för fordonsgas uppnåddes bortsett från fukthalten.
- Hanteringen av bottenaskan behöver utvecklas om den ska hanteras enbart med maskiner, exempelvis skulle en starkare motor kunna skruva ut askan från uppsamlingscontainern.
- Omedelbart samt fyra månader efter användning var askan lätthanterlig och finkornig. Troligtvis var askan så härdad vid försökets avslut att den inte bildade större klumpar vid utomhuslagringen. Om återföring till skogen ska bli aktuell bör försök att sprida askan genomföras i framtiden.
- Överlag fungerade filtret väl under de förutsättningar som rådde vid försöket med intermittent drift, den uppgraderade gasen höll konsekvent kvalitet fram till genombrottet.

Framtida studier

Fortsatta studier i demonstrationsskala bör genomföras med olika askor för att ge en uppfattning om hur kapaciteten varierar beroende på sort och blandning. Dessa resultat bör jämföras med de tidigare i laboratorieförsöken, därefter kan prestationen på askfiltret utvärderas. Askorna kan även omarbetas genom att blandas med vatten igen för att undersöka om kapaciteten går att öka ytterligare. Även olika ingående biogasflöden kan testas för att undersöka var gränserna går för en totalt uppgraderad utgående gas. En plan för uppsamling av aska, uppgradering av biogas samt tankning bör tas fram om fordon ska kunna drivas på gasen i framtiden. Då behöver fukt- och partikelhalten i gasen dessutom hanteras innan gasen komprimeras inför tankning.

Referenser

- Andersson, J. (2013). *Uppgradering av biogas med aska från träbränslen*. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala
- Andersson, J., Nordberg, Å. (2017). *Biogas Upgrading Using Ash from Combustion of Wood Fuels: Laboratory Experiments*. Energy and Environment research, 7 (1), 38-47. doi:10.5539/eer.v7n1p38.
- Andersson, J., Olsson, H., Ascue, J., Rogstrand, G., Edström, M., Nordberg, Å. (2014). *Processintern metananrikning vid gödselrötning – Försök i pilotskala*. Rapport 50, Kretslopp & Avfall. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala
- Andersson, J., Westin, G., Nordberg, Å. (2017). *Askfilter för rening av svavelväte i deponigas*. Energimyndigheten, slutrapport Projektnr 42510-1.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1091297/FULLTEXT01.pdf>
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D. (2013). *Biogas upgrading – Review of commercial technologies*. Rapport 2013:270, SGC – Svenskt Gastekniskt Center AB, Malmö
- Biosling AB (2012). *Biosling product sheet 2012*.
http://biosling.se/wp-content/uploads/2015/10/produktblad_en.pdf (hämtad 2017-09)
- Bjurström, H. (2006). *Vad är oförbränt?* Seminarium miljöriktig användning av askor – ÅF-process AB
<http://www.energiaskor.se/pdf-dokument/presentationer%202006/Henrik%20Bjurstrom%201.pdf>
(hämtad 2017-05)
- Energimyndigheten (2017). *Energiläget i siffror 2017*.
<http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2017/nu-finns-energilaget-i-siffror-2017/> (.xls hämtad 2017-09)
- Harrysson, J., Bahr, H. (2015). *Produktion och användning av rötresten år 2014*. Energimyndigheten, Energigas Sverige
<https://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2015/produktion-och-anvandning-av-biogas-och-rotrester-ar-2014.pdf> (hämtad 2017-06)
- Humidity Calculator
<http://www.humcal.com/index.php> (hämtad 2017-05)
- Kristoffersson, S. (2015). Examensarbete - *Effekt på aska från träbränslen vid karbonatisering med biogas*. SP Processum AB, Tekniska Högskolan Umeå Universitet
- Lems, R., Dirkse E.H.M. (2012). *Small scale biogas upgrading: Green gas with the DMT Carborex-MS system*. DMT Environmental technology
- Petersson, A. (2011). *Biogas – Basdata om biogas*. SGC - Svenskt Gastekniskt Center
- Ramakrishnan, A.M. (2015). *Biofuel: A Scope for Reducing Global Warming*. Petroleum and Environmental technology. J Pet Environ Biotechnol 7:258. doi:10.4172/2157-7463.1000258.

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000