

Uppgradering av biogas med askor från trädbränslen

Åke Nordberg, Institutionen för energi och teknik, SLU

Johan Andersson och Mats Edström, JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

Bakgrund

Det finns en stor outnyttjad potential i att producera biogas på gårdsnivå. I underlaget till Energimyndighetens framtagande av en nationell biogasstrategi angavs potentialen för gödsel och odlingsrester till 5,9 TWh [1]. Investeringsbidraget på 30 % för gödselbaserad rötning är i dagsläget en bidragande faktor till ökad investering i biogasteknik. Den producerade gasen från gårdsanläggningar används i huvudsak för kraftvärmeproduktion, eftersom det i dagsläget är det ekonomiskt mest intressanta alternativet.

En alternativ avsättning är att uppgradera gasen till fordonsgaskvalité för drivmedelsanvändning, antingen på gården eller för avsalu. Kostnaden för uppgradering är direkt beroende av gasflödet. Persson [2] skriver att vid rågasflödet 200 nm³/h är uppgraderingskostnaden 0,15 kr/kWh och vid flöden kring 50-100 nm³/h uppgår kostnaden till 0,35 kr/kWh. Liknande uppgifter ges av Blom et al. [3] där kostnaden anges uppgå till 0,30-0,40 kr/kWh för flöden kring 40 nm³/h. Stora gårdsanläggningar producerar i storleksordningen 1-2 GWh per år. Det motsvarar ett genomsnittligt gasflöde på 20-40 nm³/h och investeringskostnaden för en uppgraderingsanläggning som kan hantera dessa flöden är i storleksordningen 3-4 miljoner kronor [3]. För att reducera denna kostnad behövs innovativa tekniska lösningar med förutsättning att tillämpas i relativt enkla och billiga system.

Askor från förbränning av kol och avfall har i tidigare studier använts för att fastlägga koldioxid från förbränningsanläggningar och accelerera stabiliseringen av askor. Vidare har bl.a Mostbauer m.fl. [4] visat att bottenaska från avfallsförbränning kan rena biogas till en metanhalt på 97 %. Aska från förbränning av trädbränslen har generellt ett högt pH och högre CaO-halt än t.ex. kol- och avfallsaska. Det indikerar att förutsättningarna för biobrännleaska att nå en hög fastläggning av koldioxid (karbonatisering) och en hög metanhalt i utgående gas borde vara bättre än för kol- och avfallsaskor. Därmed skulle en restprodukt med lågt värde som finns i stora mängder ha potential att användas för kostnadseffektiv uppgradering av biogas vid gårdsanläggningar.

Projektets syfte var att i laboratorieskala undersöka fastläggning av biogasens koldioxid med aska från förbränning av trädbränslen för att nå fordonskvalitet (97 % metanhalt) och att utifrån resultaten föreslå utformning och göra en kostnadskalkyl av system för uppgradering av biogas med aska.

Genomförande och avgränsningar

Projektet är en initial studie för att undersöka förutsättningar och begränsningar innan mer omfattande studier genomförs. Den gas som använts består av en definierad blandning av koldioxid och metan. Initialt provades försöksupställningens utformning fram i olika steg avseende val av askbehållare, flödestester med olika askblandningar för att fastställa nödvändig trycknivå och utrustning för tryckreglering och flödesmätning. De i rapporten redovisade försöken har huvudsakligen framkommit inom ett examensarbete av Johan Andersson (bifogas). Examensarbetet medgav att utöka studien med att belysa kemin bakom fastläggningen av koldioxid i aska, beskriva den askbildande processen i eldstaden samt bedöma vilken effekt valet av trädbränsle har på askans karaktäristik.

Material och Metoder

Askor

Under försöken studerades tre typer av aska. Torr bottenaska från förbränning av pellets togs från en 100 kW panna (Sala Heby Energi). Aska (både botten- och flygaska) från förbränning av sågverksflis vid tre pannor med total effekt på 1 000 kW (Kungsängens försöksgård, SLU, Uppsala) togs från en uppsamlingscontainer, som pga otätheter utsatts för en del fukt.

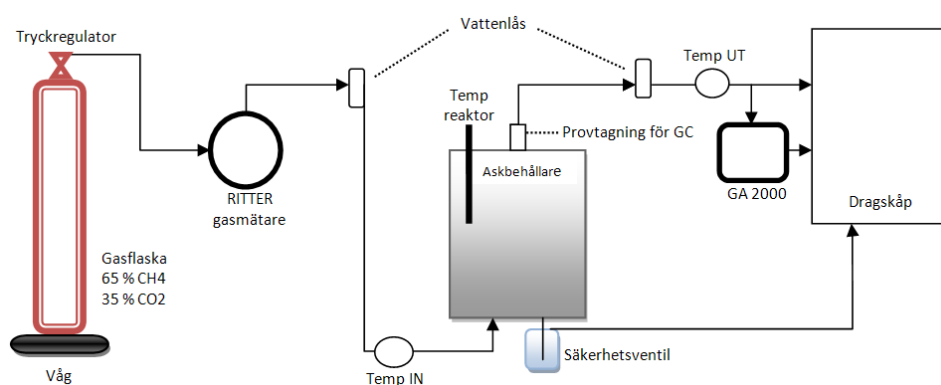
Våtutmatad bottenaska från förbränning av en bränsemix (70 % flis, 10 % returflis, 10 % salix, 5 % sågspån och 5 % bark) togs från en 80 MW rosterpanna (ENA Energi, Enköping).

Vidare siktades torkad aska för att bestämma fraktionsfördelning. I rapporten används följande namn på de olika askorna: *Pelletaska*, *Flisaska* och *ENA-aska*.

Försöksuppställning

Gasen som användes vid försöken hade en definierad sammansättning på 65 % metan och 35 % koldioxid. Gasflödet justerades med en tryckregulator och en gasmätare registrerade den ackumulerade mängd gas som passerat (Figur 1). För att validera mätvärden från gasmätaren avlästes gasflaskans viktminskning. Efter gasmätaren passerade gasen ett vattenlås och leddes därefter in i botten på askbehållaren. Den cylinderformade askbehållaren med glasmantel och med lock och botten av plast rymde 20 L (höjden 30 cm; innerdiametern 30 cm). Inför försöken fylldes askbehållaren med ca 12 L fuktad aska. Askbädden var upphöjd fem centimeter från botten och låg på en viraduk samt ett grovt stålnät. Gasen passerade askbädden och ut genom locket på behållaren. Direkt vid utloppet skedde provtagning för senare CH₄-analys med gaskromatograf (GC). Efter utloppet leddes gasen genom ett vattenlås och vidare ut i ett dragskåp. Gasen analyserades även under försökets gång med en gasanalysator (GA2000, Geotechnical Instruments). Om summan av metan, koldioxid och syrgas inte uppgick till 100 % angavs resterande del som en balans. Temperaturen registrerades i askbehållaren samt vid in- och utgående gas.

Vid tre försök kompletterades försöksuppställningen med ytterligare en askbehållare som kopplades i serie med den befintliga askbehållaren. Syftet med 2-steps-försöken var att använda behandlad aska från tidigare försök i första askbehållaren och obehandlad aska i den andra askbehållaren.



Figur 1. Översikt över försöksuppställning. Figuren visar försöksuppställningen som den såg ut vid 1-steps-försöken. Vid 2-steps-försöken var ytterligare en behållare kopplad i serie.

Genomförda försök

Genomförda försök finns sammanfattade i Tabell 1. Försöken inleddes med att aska blandades med vatten till önskad fuktkvot. Kvoten mellan vatten och torr aska, L/S (Liquid/Solid), varierade mellan 0,12 och 0,43. Det ingående gasflödet varierade mellan 1,5 och 3,9 L/kg invägd aska/h. När askbädden hade mätts detekterades CO₂ i utgående gas. Försöken avslutades då koldioxidhalten uppgick till 20-25 % i utgående gas.

Tabell 1. Sammanställning över utförda försök. Försöken är grupperade efter typ (1-stegsförsök eller 2-stegsförsök). Vid en del försök där askan behandlas en andra gång har inte askbehållaren öppnats mellan försöken. Det saknas därför uppgifter om vilken fuktkvot askan har när det senare försöket börjar (gäller försök 6 och 9).

| Försök | | | Invägd fuktad aska kg | Fuktkvot | | Rumstemp °C | Flöde in* L/h/kg aska |
|--------|---------|---|--------------------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| nr | Aska | Beskrivning | | L/S (liquid/solid) | motsv. TS (%) | | |
| 1 | Pellets | 1-steg med färsk askblandning | 7,1 | 0,42 | 70,5 | 21 | 2,0 |
| 8 | Pellets | 1-steg med färsk askblandning | 6,5 | 0,43 | 70 | 15 | 3,7 |
| 3 | ENA | 1-steg med färsk askblandning | 7,3 | 0,43 | 70 | 21 | 1,5 |
| 5 | Flis | 1-steg med färsk askblandning | 8,1 | 0,34 | 68,6 | 19 | 2,0 |
| 2 | Pellets | 1-steg. Försök 1 omblandad | 7,2 | 0,31 | 76,3 | 21 | 2,0 |
| 4 | ENA | 1-steg. Försök 3 omblandad och ompackad | 7,3 | | | 19 | 2,1 |
| 6 | Flis | 2-steg. 1:a behållaren. Aska efter försök 5 | | | | 17 | 1,7 |
| 7 | Flis | 2-steg. 2:a behållaren. Färsk askblandning | 6,3 | 0,12** | 89,4 | 17 | 2,0 |
| 9 | Pellets | 2-steg. 1:a behållaren. Aska efter försök 8 | | | | 16 | 3,9 |
| 10 | Pellets | 2-steg. 2:a behållaren. Färsk askblandning | 6,2 | 0,25 | 79,6 | 16 | 3,9 |
| 11 | Pellets | 2-steg. 1:a behållaren. Försök 9 omblandad | 6,8 | 0,33 | 75,4 | 15 | 3,6 |
| 12 | Pellets | 2-steg. 2:a behållaren. Försök 10 omblandad | 6,0 | 0,17 | 85,5 | 15 | 3,8 |

*Flödet justerat till 20 °C

** Askan har inte tillförts vatten innan försöket. Fuktkvot densamma som askan hade vid inhämtningstillfället

Resultat

Torrsubstans, densitet och kemisk sammansättning

Pelletsaskan hade den högsta TS-halten (99,5 %) eftersom den förvarades och hämtades inomhus, medan flisaskan (89,4 % TS-halt) inhämtades från en container som läckte in en del nederbörd (Tabell 1). Den våtutmatade askan från ENA Energi i Enköping hade den lägsta TS-halten (48,2 %). Pellets- och ENA-askan uppvisar liknande torrdensitet medan flisaskan har något högre densitet, vilket kan förklaras av att den även innehåller flygaska (Tabell 2).

Tabell 2. Askans egenskaper och sammansättning. Analyserna är utförda av ackrediterat företag med undantag för torrdensitet och glödförlusten vid 550 °C som utförts vid JTI och SLU.

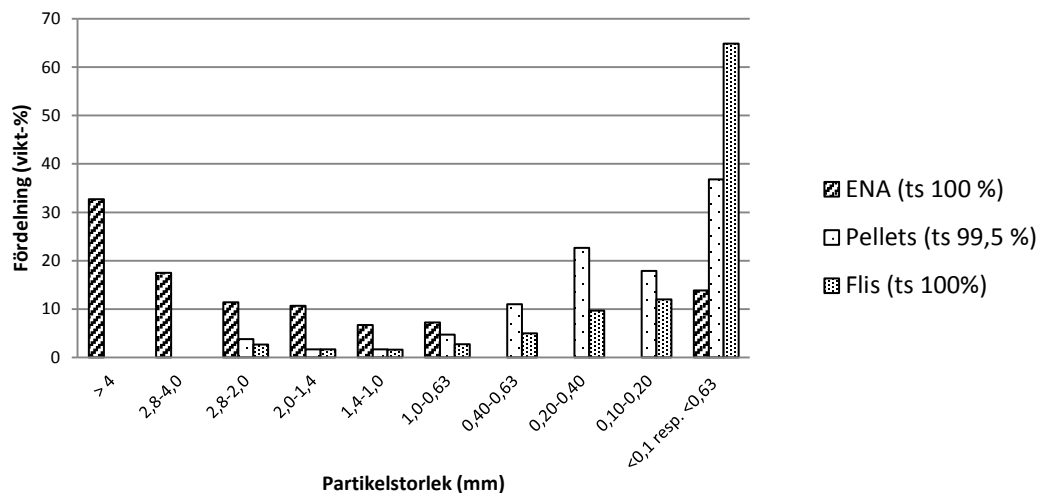
| | Enhet | ENA-aska | Pelletsaska | Flisaska |
|--------------------------------|---------|----------|-------------|----------|
| Torrdensitet* | kg/L | 0,42 | 0,43 | 0,50 |
| Torrsubstans | % | 48,2 | 99,5 | 89,4 |
| Glödförlust 550 °C* | % av TS | 7,5 | 0 | 5,5 |
| Glödförlust 1000 °C | % av TS | 9,6 | 14,2 | 30,4 |
| SiO ₂ | % av TS | 53,7 | 7,8 | 7,9 |
| Al ₂ O ₃ | % av TS | 9,6 | 1,5 | 1,2 |
| CaO | % av TS | 9,0 | 36,0 | 31,2 |
| Fe ₂ O ₃ | % av TS | 4,2 | 2,1 | 0,6 |
| K ₂ O | % av TS | 4,6 | 10,1 | 14,1 |
| MgO | % av TS | 2,8 | 8,5 | 7,0 |
| MnO | % av TS | 0,3 | 3,5 | 1,9 |
| Na ₂ O | % av TS | 2,0 | 0,5 | 0,3 |
| P ₂ O ₅ | % av TS | 0,9 | 3,5 | 2,8 |
| TiO ₂ | % av TS | 0,9 | 0 | 0,04 |

*Egen analys

Den kemiska analysen utfördes efter upphettning till 1000°C och ger egentligen svar på hur mycket kalcium det finns i det ursprungliga provet, trots att den redovisas som CaO. Kalcium kan i aska ingå i till exempel kalciumkarbonat, kalciumsilikater och som fri kalciumoxid. Dessutom kan kalcium föreligga som kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) om askan utsatts för fukt. Pellets- och flisaskan innehåller relativt mycket kalcium, kalium, natrium och fosfor samt mindre kisel och aluminium jämfört med ENA-askan. Utifrån pellets- och flisaskans höga andel av kalcium jämfört med ENA är det rimligt att anta att potentialen att fånga upp koldioxid bör vara bättre med pellets- och flisaska jämfört med ENA-aska.

Fraktionering

ENA-askan innehöll mestadels grövre partiklar i form av oförbränt bränsle och slaggsprodukter från eldstaden. Pellets- och flisaskan var däremot finkornig och huvuddelen av partiklarna var mindre än 0,4 millimeter (Figur 2). Sällstorleken justerades då ENA-aska siktades på grund av dess stora innehåll av grova partiklar. Det är anledningen till att staplarna längst till höger i figur 11 visar resultatet för två olika siktar, mindre än 0,63 millimeter för ENA-askan och mindre än 0,1 millimeter för pellets- och flisaskan.



Figur2. Fraktionsfördelning för torkad aska. ENA-askan innehåller betydligt högre andel grova partiklar jämfört med pellets- och flisaska. På grund av ENA-askans låga andel av fina partiklar justerades sällstorleken för denna aska. Därför anger stapeln längst till höger två sällstorlekar, <0,63 mm för ENA-askan och <0,1 för övriga.

Upptag av koldioxid

Pelletsaska

1-stegsförsök

Tre försök har genomförts där pelletsaska behandlats i ett steg. Försök 1 och 8 har utförts med liknande förutsättningar bortsett från att det ingående gasflödet varit högre för försök 8 (Tabell 3). Det högsta koldioxidupptaget uppgick till 0,17 g CO₂/g torr aska och åstadkoms under försök 1. Efter att askan från försök 1 hade vägts ut, blandats om och provtagits, behandlades den ytterligare en gång (försök 2). Den andra behandlingen av askan gav ett upptag på 0,05 g CO₂/g torr aska och den totala kapaciteten för askan uppgick därmed till 0,22 g CO₂/g torr aska. Gashalterna för metan och koldioxid i utgående gas under försök 1 redovisas i figur 3. Metanhalten stiger inledningsvis kraftigt och efter åtta timmar har den uppnått ca 96 %. Denna metanhalt upprätthålls fram till dess att koldioxid börjar detekteras i utgående gas. Genombrottet av koldioxid sker efter 78 timmar och halten stiger därefter relativt snabbt upp till 20 %.

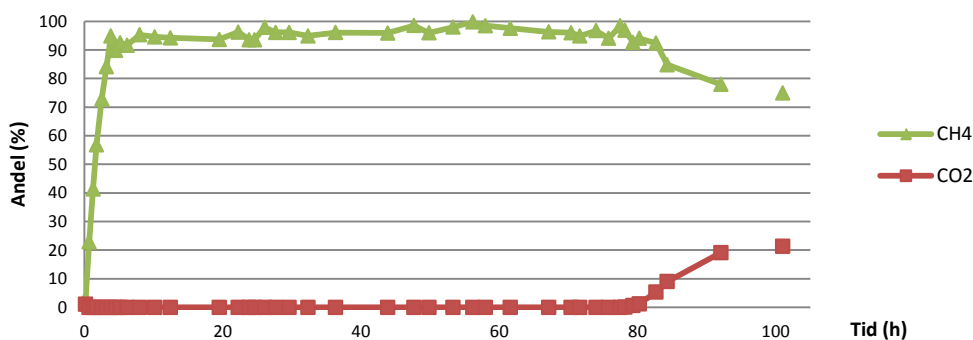
Tabell 3. 1- och 2-stegsförsök utfört på pelletsaska. Försök 2 är utfört på aska från försök 1 med omblandning av askan mellan försöken. Askan i försök 9 har behandlats tidigare under försök 8 och fungerar som ett förfilter till den färska askan i 2-stegsförsökets andra behållare. Försök 11 och 12 utfördes på aska från försök 9 och 10 efter omblandning av askan.

| Försök | | Fukt-kvot | Flöde | Tid till genombrott | CO ₂ -upptag fram till genombrott | CO ₂ -upptag totalt | CH ₄ | |
|--------|---|-----------|--------------|---------------------|--|--------------------------------|-----------------|--------------|
| nr | Beskrivning | L/S | L/h/kg aska* | h | g CO ₂ /g torr aska | | max (%)** | medel (%)*** |
| 1 | 1-steg. Färsk askblandning | 0,42 | 2,0 | 78 | 0,149 | 0,174 | 98,9 | 95,6 |
| 2 | 1-steg. Försök 1 omblandad | 0,31 | 2,0 | 5 | | 0,046 | 93,8 | |
| 8 | 1-steg. Färsk askblandning | 0,43 | 3,8 | 35 | 0,122 | 0,134 | 99,5 | 98,1 |
| 9 | 2-steg. 1:a behållaren. Aska efter försök 8 | | 3,9 | | | 0,068 | 86,6 | |
| 10 | 2-steg. 2:a behållaren. Färsk askblandning | 0,25 | 3,9 | 51 | 0,112 | 0,12 | 96,9 | 93,1 |
| 11 | 2-steg. 1:a behållaren. Försök 9 omblandad | 0,33 | 3,6 | 0 | | 0,033 | 80,6 | |
| 12 | 2-steg. 2:a behållaren. Försök 10 omblandad | 0,17 | 3,8 | 18 | | 0,028 | 92,8 | |

* Flödet är justerat till 20 °C

** Anges som medelvärdet av de tre högsta mätvärdena

*** Metanhalten anges även som ett medelvärde för försök som har behandlat färsk aska. Medelvärdet gäller metanhalten fram till genombrott av koldioxid



Figur 3. Resultat från försök 1 där färsk pelletsaska behandlats. Koldioxid detekteras i utgående gas efter 78 timmar.

2-stegsförsök

Försök 2 visar att det är möjligt att fånga koldioxid även från tidigare behandlad aska och dessa resultat har föranlett att försöksuppställningen kompletterats med ytterligare en askbehållare. Aska från försök 8 har använts som seriekopplat förfilter till den andra behållaren med färsk aska. För att förtydliga redovisningen benämns den första askbehållaren som försök 9 och andra behållaren som försök 10 (Tabell 3). Det totala koldioxidupptaget i första behållaren fås genom att summera försök 8 och 9 och uppgår till 0,20 g CO₂/g torr aska.

Den låga fukthalten kan vara en anledning till att försök 10 endast ger 0,12 g CO₂/g torr aska, vilket är lägre än försök 1 och 8. För att undersöka om det fanns mer potential gjordes ytterligare ett 2-stegsförsök där omblandad aska från försök 9 och 10 användes (benämns försök 11 och 12 i Tabell 3). Upptaget i första behållaren är 0,033 g CO₂/g torr aska, vilket är högt med tanke på att askan tidigare genomgått två behandlingar (försök 8 och 9). Det totala upptaget i askan efter tre behandlingar är 0,24 g CO₂/g torr aska.

Flisaska

1-stegsförsök

Gasanalyserna med gaskromatograf visar att metanhalten för försök 5 är mycket hög fram till dess att koldioxid bryter igenom askbädden efter 53 timmar (Tabell 4). Det totala upptaget av koldioxid för försök 5 uppgick till 0,11 g CO₂/g torr aska. Behållaren öppnades inte utan askan användes istället vid det efterföljande 2-stegsförsöket.

Tabell4. Resultaten från flisförsöken.

| Försök | | Fukt-kvot | Flöde | Tid till genombrott | CO ₂ -upptag fram till genombrott | CO ₂ -upptag totalt | CH ₄ | |
|--------|--|-----------|--------------|---------------------|--|--------------------------------|-----------------|--------------|
| nr | Beskrivning | L/S | L/h/kg aska* | h | g CO ₂ /g torr aska | | max (%)** | medel (%)*** |
| 5 | 1-steg. Färsk askblandning | 0,34 | 2,0 | 53 | 0,100 | 0,105 | 101,3 | 99,6 |
| 6 | 2-steg. 1:a behållaren. Aska från försök 5 | | 1,7 | 5 | | 0,031 | 92,0 | |
| 7 | 2-steg. 2:a behållaren. Färsk askblandning | 0,12 | 2,0 | 59 | 0,061 | 0,074 | 99,8 | 96,4 |

* Flödet är justerat till 20 °C

** Anges som medelvärde av de tre högsta mätvärdena

*** Metanhalten anges även som ett medelvärde för försök som har behandlat färsk aska. Medelvärdet gäller metanhalten fram till genombrott av koldioxid

2-stegsförsök

Askan från försök 5 används som förfilter seriekopplad med den andra behållaren med färsk flisaska, som inte har fuktats aktivt innan försöket. Det innebär att askans fuktkvot endast är 0,12 vilket motsvarar den fuktkvot askan har vid inhämtningstillfället. Upptaget av koldioxid i förfiltret uppgår till 0,031 g CO₂/g torr aska och tillsammans med den tidigare behandlingen under försök 5 är askans totala upptag 0,14 g CO₂/g torr aska. Upptaget i den andra behållaren är 0,074 g CO₂/g torr aska, vilket är lågt med tanke på att det är färsk aska som behandlas (jämför med försök 5). En förklaring är att askan var för torr för att det skulle uppstå effektiv karbonatisering. Vid utvägning av askan förekom dammbildning, men fukthalten visade sig dock vara likvärdet med fukthalten på invägd aska, dvs 89 %.

ENA-aska

Askan från ENA Energi i Enköping har behandlats i två försök. Under det inledande försöket detekterades koldioxid redan efter tre timmar. Därför avbröts försöket efter drygt fem timmar, askan togs ut, blandades om och vägdes åter in. Vid denna invägning placeras askan i tunna lager och varje lager kompakteras ordentligt. Det totala upptaget i askan var endast 0,012 g CO₂/g torr aska, vilket är 20 gånger sämre än upptaget för pelletsaskan.

Askförbrukning och systemutformning vid uppgradering med aska

I beräkningarna har det högsta koldioxidupptaget med pelletsaska som behandlats i tre omgångar använts, dvs 0,24 g CO₂/g aska. Biogasanläggningen antas i basfallet producera 1 GWh biogas per år med sammansättningen 65 % metan och 35 % koldioxid, vilket motsvarar ett genomsnittligt gasflöde på 18 nm³/h. Uppgradering med aska skulle även kunna integreras med annan uppgraderingsteknik, till exempel *Biosling* för att därmed ”polera” gasen från ca 90 % metanhalt till fordonskvalitet.

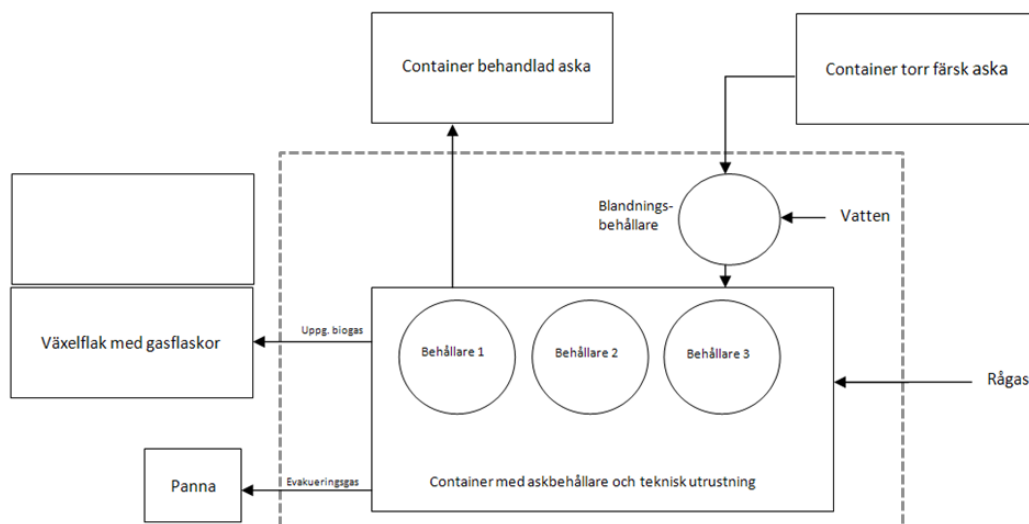
Askan transporteras i torrt tillstånd i slutna containers och tillsats av vatten sker vid uppgraderingsanläggningen. Varje container bedöms rymma en nettolast av 8 ton torr aska. Det innebär att det förbrukas aska motsvarande en container per vecka för basfallet eller en container per månad då gasen uppgraderas från 90 % metanhalt (Tabell 5).

Tabell 5. Askförbrukning vid småskalig uppgradering. För basfallet vid årsproduktionen 1 GWh biogas förbrukas det motsvarande en container per vecka. Om biogasen uppgraderas från 90 % metan är åtgången ungefär en container per månad.

| | Enhet | | Basfall | |
|-------------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|
| Årlig gasproduktion | GWh | 0,5 | 1 | 1,5 |
| Uppgradering från 65 % metan | | | | |
| Biogas (65 % metan) | nm ³ | 77 077 | 154 154 | 231 232 |
| Flöde biogas | nm ³ /h | 9 | 18 | 26 |
| Varaktighet container | veckor/container | 2,0 | 1,0 | 0,7 |
| Förbrukning aska | container/år | 26 | 52 | 78 |
| Uppgradering från 90 % metan | | | | |
| Biogas (90 % metan) | nm ³ | 55 667 | 111 334 | 167 001 |
| Flöde biogas | nm ³ /h | 6 | 13 | 19 |
| Varaktighet container | veckor/container | 9,7 | 4,8 | 3,2 |
| Förbrukning aska | container/år | 5 | 11 | 16 |

Askan matas in i en av tre behållare (Figur 4). När en askbädd är mättad på koldioxid kopplas den bort, töms på aska och laddas med färsk och fuktig aska. Under tiden som en behållare töms och laddas pågår uppgraderingen i de övriga två behållarna. Behandlad aska lagras i container i väntan på vidare transport.

Den initiala gasen från en nyladdad askbädd förbränns i en befintlig panna, liksom evakuerad gas från en avslutad askbädd i syfte att undvika luft i den uppgraderade gasen respektive minimera eventuella metanemissioner från den behandlade askan. Den uppgraderade biogasen torkas och komprimeras för att sedan avyttras som fordonsgas.



Figur 4. Förslag på systemutformning för småskalig uppgradering med aska.

Kostnadskalkyl för uppgradering

Det streckade området i figur 4 visar systemgränsen för uppgraderingsanläggningen. Transporten av aska i containrar till och från anläggningen antas inte belasta kalkylen för uppgraderingsanläggningen utan denna kostnad förläggs istället på förbränningsanläggningen som gett upphov till askan samt den entreprenör som sprider askan i skog och mark. Uppgraderingsanläggningen har potential att fungera som ett mellansteg i den framtida askhanteringen. Den behandlade askan är stabiliserad och kan därmed spridas i skog.

Uppgraderingssystemet använder den panna som finns i anslutning till rötningsanläggningen för att förbränna initial och evakuerad gas. Växelflaken med gasflaskor ägs av den distributör som upphandlat gasproduktionen. Den kringutrustning som behövs för att trycksätta gasflaskorna belastar däremot uppgraderingsanläggningens kostnadskalkyl. Aska har ett högt pH och är reaktivt och därför görs bedömningen att askbehållarna bör vara av rostfritt stål. Processenergi behövs i form av el för drift av kompressorer, pumpar och skruvar.

En grov uppskattning av kostnaderna baserad på projektgruppens bedömning uppgår till 1 500 000 kr i investeringskostnad inklusive markarbete. Vidare uppgår kostnaden för drift, underhåll och service till ca 75 000 kr/år. Arbetsbehovet bedöms till 2 timmar/vecka, å 300 kr/timme. Anläggningens ekonomiska livslängd bedöms vara 20 år. Den årliga kapitalkostnaden för anläggningen är beräknat med annuitetsmetoden och beräkningar har utförts med 6 % kalkylränta. Kostnadskalkylen utgår i basfallet ifrån en biogasanläggning som producerar 1 GWh biogas per år. Tabell 6 visar vilka årliga kostnader uppgraderingsanläggningen ger upphov till. Uppgraderingskostnaden blir under angivna förutsättningar 0,24 kr/kWh fordonsgas.

Tabell 6. Kostnadskalkyl för basfallet. Kapitalkostnaden är beräknad med annuitetsmetoden.

| | kr/år |
|--------------------------------------|----------------|
| Kapitalkostnad* | 131 000 |
| Drift, underhåll och service | 75 000 |
| Arbetskostnad | 31 000 |
| Total årlig kostnad | 237 000 |
| Uppgraderingskostnad (kr/kWh) | 0,24 |

*Beräknat med annuitetsmetoden

Känslighetsanalys

Tre parametrar har studerats i en känslighetsanalys; investeringskostnaden, gasproduktionen samt kostnaden för drift, underhåll och service. Värdet på respektive parameter i basfallet har justerats upp och ner med 30 respektive 50 % och för varje parametervärde har nya beräkningar gjorts för att få fram uppgraderingskostnaden. De olika parametrarna har studerats var för sig, vilket till exempel innebär att när investeringskostnaden justeras antar värdena för de övriga två parametrarna samma värden som de hade i basfallet.

Investeringskostnaden för anläggningen har en väsentlig effekt på uppgraderingskostnaden (Tabell 7). Om uppgraderingsanläggningen uppförs med hjälp av ett investeringsstöd på 30 % innebär det att kostnaden minskar med fyra öre per kWh jämfört med basfallet. Kostnaden för drift, underhåll och service är den av de studerade parametrarna som påverkar uppgraderingskostnaden minst. Om föreslagen anläggning skulle kunna fungera vid högre gasflöden, dvs om anläggningen kan hantera 1,5 GWh biogas istället för 1 GWh per år sjunker kostnaden till 0,16 kr/kWh.

Tabell 7. Känslighetsanalys. Utifrån basfallet har tre parametrar justerats upp och ner 30 respektive 50 %. Vid beräkningarna har en parameter i taget justerats.

| Förändring | -50 % | -30 % | Basfall | 30 % | 50 % |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Investering (kr) | 750 000 | 1 050 000 | 1 500 000 | 1 950 000 | 2 250 000 |
| Uppgraderingskostnad (kr/kWh) | 0,17 | 0,20 | 0,24 | 0,28 | 0,30 |
| Drift, underhåll och service (kr/år) | 37 500 | 52 500 | 75 000 | 97 500 | 112 500 |
| Uppgraderingskostnad (kr/kWh) | 0,20 | 0,21 | 0,24 | 0,26 | 0,27 |
| Gasproduktion (GWh/år) | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,3 | 1,5 |
| Uppgraderingskostnad (kr/kWh) | 0,47 | 0,34 | 0,24 | 0,18 | 0,16 |

Diskussion

Laboratorieförsöken visar att framförallt pelletsaska effektivt tar bort koldioxid från biogas medan ENA-askan uppvisar sämre prestanda. Det högsta upptaget var 0,24 g CO₂/g torr aska med pelletsaska som behandlats i tre omgångar. Vid en jämförelse med liknande studier är upptaget i storleksordningen 20-40 gånger lägre än de bästa resultaten i detta projekt, bortsett från ett försök där aska använts för att regenerera en alkalilösning där koldioxidupptag skett (Tabell 8). Den bedömda kostnaden för ett föreslaget uppgraderingssystem uppgår till 0,24 kr/kWh. Detta står sig väl vid jämförelse med småskaliga kommersiella uppgraderingstekniker (vattenskrubber, PSA och membranteknik), vilket enligt Blom m.fl. [3] uppgår till ca 0,50 kr/kWh. Mot bakgrund av de lovande resultaten finns en rad frågeställningar att diskutera samt att identifiera förslag på framtida studier för att klarlägga förutsättningar inför pilotförsök.

Tabell 8. Sammanställning av resultat avseende accelererad karbonatisering av aska redovisade i litteraturen

| Bränsle | Aska | Försöks- skala* | Typ av försök | CaO | CO ₂ -upptag | pH | | Fukt- kvot | Temp | Tryck | Ref- erens |
|------------|---------------|--------------------|------------------|--------|---------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|
| | | | | | | före | efter | | | | |
| | | | | Vikt-% | g CO ₂ /g aska | | | L/S | | bar | |
| avfall | flygaska+kalk | L | dynamiskt | 33** | 0,35 | 14 | | lösning | 25-55 | 1 | 5 |
| rapskaka | bottenaska | L | stationärt | 24 | 0,01 | 10,6 | 9,9 | | | 2 | 6 |
| trädränsle | bottenaska | L | stationärt | 46 | 0,075 | 13,4 | 11 | | | 2 | 6 |
| avfall | flygaska | L | stationärt | 16 | 0,06 | 11,1 | 8,4 | | | 2 | 6 |
| avfall | bottenaska | L | stationärt | 15 | 0,05 | 12,4 | 9,1 | | | 2 | 6 |
| avfall | flygaska | L (5 g) | stationärt | 36 | 0,07 | 12 | 7,5 | 0,2-0,3 | | 3 | 7 |
| avfall | bottenaska | P (80 kg) | dynamiskt | | 0,04*** | 12-13 | 8-11 | 0,25 | 20-60 | 1 | 4 |
| avfall | bottenaska | L (100 g) | stationärt | 16 | 0,03 | 11,8 | 8,2 | 0,18 | | 1-20 | 8 |
| avfall | bottenaska | P (1 ton) | dynamiskt | | 0,02*** | 12,2 | 11 | | | 1 | 9 |

* L = laboratorieförsök, P = pilotförsök. Studerad mängd aska inom parantes.

** Avser fri CaO

*** Anger upptaget av koldioxid som g/g fuktig aska istället för g CO₂/g torr aska

Den totala askproduktionen i Sverige var 1,5 miljoner ton år 2010 och närmare hälften av mängden genererades vid förbränning av avfall [10]. Aska med ursprung från förbränning av rena biobränslen uppgick till 150 000 ton. Till detta kan adderas 70 000 ton aska från förbränning av biobränslen inklusive fiberslam från pappers- och massaindustrin. I föreliggande studie har endast tre askor studerats och det vore värdefullt att undersöka CO₂ upptag på den finare fraktionen med högt kalciuminnehåll efter separation av grovkornig aska

Upptaget i den studerade flisaskan var som högst 0,14 g CO₂/g torr aska, vilket kan förklaras med att askan var fuktig vid inhämtning och att karbonatiseringen därför redan påbörjats. För framtida studier är det intressant att undersöka färsk flisaska, som inte kommit i kontakt med vatten under lagring.

De högsta upptagen av koldioxid åstadkoms för pelletsaska när fuktkvoten (L/S) var 0,42. Den lägsta fuktkvoten som förekom under försöken var 0,12 och visade sig vara för lågt för att ge effektiv karbonatisering. Fuktkvoten 0,25 för ett av pelletsförsöken visade vid utvägning att askan i behållarens ytterzon var extra fuktig jämfört med askan i mitten av behållaren. Uttorkningen i mitten av askbädden indikerar högre värmeutveckling (karbonatisering är en exoterm process), vilket orsakat att askan torkat ut. Det är möjligt att 0,25 är en effektiv fuktkvot om problem med skiftande fuktkvot i askbädden undvikas. Därför bör fler försök göras för att optimera fuktkvot för effektiv karbonatisering.

Känslighetsanalysen visar att årsproduktionen (gasflödet) är den parameter som påverkar produktionskostnaden mest. Skulle den föreslagna anläggningen klara ett 50 % högre gasflöde innebär det att produktionskostnaden sjunker till 0,16 kr/kWh. För flis- och pelletsaskan gjordes försök där det ingående gasflödet fördubblades och det hade ingen negativ påverkan på askbäddens prestanda. Det är därför viktigt att undersöka hur högt gasflödet kan vara för att minska behållarens storlek och kostnad i förhållande till gasflödet.

Under karbonatiseringen bildas kalciumkarbonat som successivt fyller ut porvolymen i askan. Minskad porvolym kan medföra ett ökat mottryck i askbädden alternativt att gasen inte kommer i kontakt med hela bäddvolymen. De genomförda försöken hade endast en höjd på ca 20 cm, vilket i tillämpad skala kommer att vara mycket högre. Det är därför viktigt att undersöka tryckbehovet för den inkommande biogasen i studier med högre höjd på askpelaren för framtida dimensionering.

I föreliggande försök bestod gasen av enbart CH₄ och CO₂. Det finns behov att undersöka hur t.ex. H₂S kan avskiljas samt om reaktioner i askbädden ger upphov till spårgaser, t.ex. siloxaner, som är skadliga för motorer.

Då askan blandas om mellan försöken uppvisar den högre upptag av koldioxid jämfört med aska som inte blandas om. Detta förklaras med att porvolymen ökas vid omblandning. Framtida studier bör undersöka saken vidare och ta reda på mer ingående vilken effekt omrörning har på askans prestanda.

Publikationer

Andersson, J. 2013. Uppgradering av biogas med aska från trädbränslen. Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i energisystem, 2013:01, Institutionen för energi och teknik, SLU. ISSN 1654-9392. http://stud.epsilon.slu.se/5224/1/andersson_j_130124.pdf Rapporten går även att nå via e-biblioteket på www.bioenergiportalen.se

Under första halvåret 2013 avses att skriva en vetenskaplig artikel med mål att publiceras i *Bioresource Technology* alternativt *Biomass and Bioenergy*.

Övrig resultatförmedling till näringen

Referensgruppen har bestått av Camilla Åhlund, ENA Energi AB; Anders Avelin, Sala Heby Energi AB och Andreas Grybäck, Lantbruksdriften SLUs egendomsförvaltning. Vid möte den 10/12 2012 diskuterades resultat samt aspekter på hantering av aska, logistik och systemutformning.

Projektet presenterades vid ett seminarium i samband med "sjösättningen" av SLUs biogasanläggning vid Lövsta forskningscentrum den 3/10 2012 med närvarande från branschen.

Artikel om forskningsverksamhet avseende småskalig uppgradering vid JTI och SLU (s 13) i magasinet DRIV nr 1 (JTI:s kundmagasin). Projektet presenteras även på ET:s webbplats: http://www.slu.se/sv/fakulteter/nl-fakulteten/om-fakulteten/institutioner/institutionen-for-energi-och-teknik/forskning/lantbrukets_teknik_system/projekt/bioenergiproducent/uppgradering-av-biogas-med-bottenaska-fran-tradbranslen/

Artikel i tidningen ENERGIGAS nr 1 2013 med anledning av Åke Nordbergs docentföreläsning.

Referenser

- [1] Lantz M, och Börjesson P. 2010. *Kostnader och potential för biogas i Sverige*. (Underlagsrapport till utredningen *Förslag till sektorsövergripande biogasstrategi*, rapport ER 2010). Lunds universitet.
- [2] Persson M. 2003. *Utvärdering av uppgraderingstekniker för biogas*. Rapport SGC 142. Svenskt Gastekniskt Centrum AB, Malmö.
- [3] Blom H, Mccann M och Westman J. 2012. *Småskalig uppgradering och förädling av biogas*. Pöyry SwedPower AB.
- [4] Mostbauer P, Lenz S och Lechner P. 2009. *MSWI bottom ash for upgrading of biogas and landfill gas*. Environmental Technology 29:7, p 757-764.
- [5] Baciocchi R, Costa G, Gavasci R, Lombardi L och Zingaretti D. 2012. *Regeneration of a spent alkaline solution from a biogas upgrading unit by carbonation of APC residues*. Chemical Engineering Journal 179, p 63-71.
- [6] Gunning P.J, Hills C.D, Carey P.J. 2010. *Accelerated carbonation treatment of industrial wastes*. Waste Management 30, p 1081-1090.
- [7] Li, X, Fernández Bertos M, Hills C.D, Carey P.J. och Simons S.J.R. 2007. *Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes*. Waste Management 27, 1200-1206.
- [8] Rendeck E, Ducom G och Germain P. 2005. *Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash*. Journal of Hazardous Materials B128, p 73-79.
- [9] Lombardi L, Baciocchi R, Carnevale E, Corti A, Costa G, Mostbauer P, Olivieri T, Paradisi A, Zanchi L. 2012. *Innovative processes for biogas upgrading: Results from pilot plant operation*. 20th European Biomass Conference and Exhibition, 18-22 June, Milan, Italy.
- [10] Svenska EnergiAskor. 2011. *Askor i Sverige 2010*. Uppdrag utfört av Tyréns. Boström D, Skoglund N, Grimm A, Boman C, Öhman M, Broström M och Backman R. 2012. *Ash transformation chemistry during combustion of biomass*. Energy Fuels 26, p 85-93.