



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Processintern metananrikning – energikartläggning och efterbehandling av svepgas

In-situ methane enrichment
– energy mapping and off-gas post-treatment

Ulf Hävermark

BioGas2020 

Interreg 
Öresund-Kattegat-Skagerrak
European Regional Development Fund EUROPEAN UNION

Processintern metananrikning – energikartläggning och efterbehandling av svepgas

In-situ methane enrichment – energy mapping and off-gas post-treatment

Ulf Hävermark

Handledare: Henrik Olsson, JTI
Ämnesgranskare: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Serina Ahlgren, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A2E, teknik

Kurstitel: Examensarbete i energisystem

Kurskod: EX0724

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2016

Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)

Delnummer i serien: 2016:04

ISSN: 1654-9392

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: biogas, småskalig, uppgradering, kväve, energibalans, ammoniak

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

Small scale biogas plants (max digester volume 1000 m³) in Sweden produced in average 1.26 GWh per plant in 2014. Most of the biogas was used for combined heat and power production. The relatively cheap electricity in Sweden makes this a low profit business. If the biogas is upgraded to vehicle fuel its value will increase. However, upgrading biogas with conventional methods is costly, and for small scale biogas plants this cost cannot be justified. Development of alternative upgrading methods is an option to decrease the cost of upgrading and making small scale vehicle fuel production a reality.

In this master thesis the upgrading method known as *in-situ* methane enrichment was investigated. This method involves desorption of carbon dioxide in the sludge using a desorption chamber separated from the digester. Air is blown through the sludge for desorption of carbon dioxide. Subsequently, the sludge is pumped back to the digester. The aim was to perform an energy mapping on the enrichment facility installed at the biogas plant (260 m³) at Sötåsens naturbruksgymnasium. In addition, the possibility to absorb ammonium-nitrogen in the off-gas from the process using a scrubber was also investigated in laboratory-scale.

The results showed that the upgrading facility lost large quantities of heat during operation. During the coldest circumstances using an air flow of 260 m³/h through the sludge, the heat loss was 495 kWh/day. The corresponding efficiency of carbon dioxide removal was 7.6 kWh/m³ removed carbon dioxide. With proper insulation and heat recovery, the facility has the potential to decrease the heat demand to ca 139 kWh/day, giving an efficiency of 2.3 kWh/m³ removed carbon dioxide. The electric efficiency was 1 kWh/m³ removed carbon dioxide.

The laboratory test of ammonium-nitrogen absorption indicated that the plant has a potential to absorb 59 – 275 kg nitrogen/year by installing a scrubber with a volume of 122 l. The economic benefits are small, but other values such as reduced ammonia pollution or heat recovery solutions using a scrubber should be considered.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Biogas består vanligtvis av ca 60 % metan. Ungefär hälften av all biogas som produceras i Sverige uppgraderas till fordonsgas med 95 % metan. Uppgraderingen sker i stort sett endast på större anläggningar då kostnaderna för uppgradering ökar ju lägre gasflöde anläggningen producerar. Småskaliga biogasanläggningar använder därför oftast sin biogas till att producera kraftvärme. Detta ger inte någon större ekonomisk vinst då elpriserna är relativt låga. Om biogasen kunde uppgraderas till fordonsgas med en billigare metod än de idag etablerade skulle den mer värdefulla fordonsgasen kunna säljas istället. Som fordonsgas skulle biogasen ersätta fossila fordonbränslen och minska växthusgasemissioner mer än vad den gör vid kraftvärmeproduktion.

En metod för småskalig uppgradering av biogas under utveckling kallas processintern metananrikning. Principen går ut på att kontinuerligt avlägsna koldioxid från rötslammet under biogasprocessens gång. Detta resulterar i en producerad biogas med lägre koldioxidkoncentration och således högre metankoncentration. Detta uppnås genom att rötslam pumpas från röt-kammaren in i en desorptionsbehållare. I denna behållare luftas rötslammet av en blåsmaskin som blåser luft (kallad svepgas) genom botten av behållaren. Denna luft desorberar koldioxiden från rötslammet och gaserna lämnar behållaren genom ett utlopp i toppen. Svepgasen innehåller nu även desorberad ammoniak. Det koldioxidfattiga rötslammet pumpas tillbaka till röt-kammaren och processen upprepas. Styrparametrarna för metoden är slamflödet, svepgasflödet samt dimensioneringen av desorptionsbehållaren.

Tidigare försök har visat att metankoncentrationer av 87 % kan uppnås. Samtidigt som koldioxid drivs bort följer även en viss mängd metan med (så kallat metanslip). Då metan är en mer potent växthusgas än koldioxid måste dessa metanförluster minimeras. Detta uppnås genom att optimera förhållandena mellan styrparametrarna. För att bedriva försök med det målet byggdes en anläggning för processintern metananrikning på Sötåsens naturbruksgymnasium. Syftet med detta examensarbete var att utvärdera anläggningen vad gäller energiförbrukning och ammoniakabsorption av svepgasen. Under arbetets gång övervakades även hur biogasprocessen påverkades under driften.

Energikartläggningen utfördes genom att mäta temperaturerna på in- och utgående rötslam i desorptionsbehållaren. Dessa mätningar utfördes under perioder med olika svepgasflöden (0, 180, 220 och 260 m³/h) samt varierande utomhustemperatur. Dessa data användes tillsammans med slamflödet för att beräkna värmeförlusterna då slammet passerade desorptionsbehållaren. Processen krävde mycket värme, ca 495 kWh/dygn under de kallaste förutsättningarna. Dessa värmeförluster bestod av den värme som följer med svepgasen ut ur desorptionsbehållaren och av värmeledning genom väggarna på behållaren. Effektiviteten hos processen beräknades till 7,6 kWh_{th}/m³ avdriven koldioxid. Efter åtgärder med isolering och värmeåtervinning på svepgasen väntas kolonnen sänka sin värmeförbrukning under de kallaste förhållandena till 139 kWh/dygn med en effektivitet av 2,3 kWh_{th}/m³ avdriven koldioxid. Den elektriska effektiviteten beräknades till 1 kWh/m³ avdriven koldioxid.

Anläggningen beräknades ha en potential för absorption av 59 – 275 kg kväve per år om en ammoniakskrubber med en storlek av 122 l konstrueras. Värdet av att sälja denna växtnäring förmodades vara 2750 kr, vilket inte motiverar att bygga skrubbern ur ett ekonomiskt perspektiv. Dock bör andra värden med en skrubber såsom reducerade ammoniakutsläpp samt möjlig värmeåtervinning tas i beaktande. Skrubberförsöken utfördes i laboratorieskala och var endast orienterande, djupare studier kan visa på förbättringspotential.

Försöken genomfördes inte under tillräckligt lång tid för att ge indikationer på hur biogasprocessen påverkades av processintern metananrikning. Den viktigaste slutsatsen som drogs var att värmeförbrukningen var för hög och att åtgärder såsom förbättrad isolering samt återvinning av svepgasvärmens behöver vidtas.

Exekutiv sammanfattning

Ungefär hälften av all producerad biogas uppgraderas till fordonsgas. De flesta småskaliga biogasanläggningar använder dock sin biogas till att producera kraftvärme. Ur ekonomisk samt miljömässig synvinkel vore uppgradering värdefullare. De etablerade uppgraderingsteknikerna är dock för dyra för de låga biogasflöden som små gårdsanläggningar producerar.

I följande examensarbete undersöktes en alternativ uppgraderingsmetod kallad processintern metananrikning. Genom aktiv luftning av rötslammet desorberas koldioxid kontinuerligt i en behållare separerad från rötchammaren. Detta leder till att den producerade biogasens metankoncentration ökar. Tidigare försök låg till grund för den metananrikningsanläggning som konstruerats på Sötåsens naturbruksgymnasiums biogasanläggning. Efter utvärdering av anläggningen konstaterades det att värmeförbrukningen är för stor i dagsläget. Åtgärder för att minska dessa bör vidtas såsom bättre isolering samt värmeåtervinning. Det visade sig även finnas potential att absorbera kväve som restprodukt från processen och sälja som växtnäring. Detta har dock inte någon ekonomisk motivering.

När värmeförlusterna har åtgärdats bör nya försök utföras på anläggningen. Dessa bör pågå under längre tid och med fler variationer på styrparametrarna för att ge en bild av hur processintern metananrikning kan optimeras samt hur den påverkar en biogasprocess.

Förord

Följande examensarbete genomfördes inom Civilingenjörsprogrammet i energisystem på UU och SLU. Det färdigställdes på JTI inom ett demonstrationsprojekt för småskalig biogasuppgradering vid Sötåsens naturbruksgymnasium som är ett led av Biogas2020. Projektet är ett samarbete mellan SLU och Hushållningssällskapet och finansieras av SLF, Västra götalandetsregionen (VGR) och Interreg ÖKS.

Författaren vill rikta tack till handledaren Henrik Olsson (JTI) för alla tips, synpunkter och den tid som han bidrog med under arbetets gång. Ämnesgranskaren Åke Nordberg tackas för all hjälp och utförlig feedback. Vidare tackas alla på JTI som ställt upp med sin kunskap och tid när saker har varit oklara.

Uppsala, juni 2016

Ulf Hävermark

Ordlista:

TS-halt: Total Solids är ett mått på hur mycket material som kvarstår efter att ett material torkats i 105 °C. Anges vanligtvis som procent av våtvikten.

VS-halt: Volatile Solids är andelen organiskt material i substratet. Mäts genom att det torra materialet hettas upp tills endast aska återstår och är differensen mellan TS-halten och askhalten för materialet.

COD: Chemical Oxygen Demand är ett mått på hur mycket syre som krävs för att bryta ned den organiska substansen i ett substrat.

C/N-kvot: Kol/kväve-kvoten är förhållandet mellan kväveinnehållet och kolmängden i ett substrat.

HRT: Hydraulic Retention Time är ett mått på den genomsnittliga tid som substratet befinner sig i röt-kammaren.

OLR: Organic Loading Rate beskriver den belastning röt-kammaren utsätts för i form av nytt substrat.

INNEHÅLL

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund till projektet	1
1.2	Syfte och mål	2
1.2.1	Syfte	2
1.2.2	Mål	2
1.3	Genomförande och avgränsningar	2
2	Biogasprocessen	2
2.1	Grundläggande mikrobiologi	2
2.2	Miljövariabler	3
2.2.1	Alkalinitet och pH	3
2.2.2	Ammonium/ammoniak	4
3	Etablerade uppgraderingsmetoder	5
3.1	Absorption	5
3.2	Pressure Swing Adsorption (PSA)	5
3.3	Membran	5
4	Processintern metananrikning	5
4.1	Styrparametrar	6
4.2	Tidigare försök och utmaningar med processintern metananrikning	6
4.2.1	Avdrivning av metan	6
4.2.2	Avdrivning av ammoniak	7
4.2.3	Kväve, ammoniak och pH	8
4.2.4	Processenergibehov	8
5	Metod	9
5.1	Sötåsens biogasanläggning	9
5.2	Försöksuppställning	9
5.3	Uppföljning av processen	11
5.3.1	Provtagning och analys	11
5.4	Fullskaleförsök vid Sötåsen och energikartläggning	12
5.4.1	El	12
5.4.2	Värme	13
5.4.3	Kartläggning av förluster med värmekamera	15
5.5	Försök ammoniakabsorption	15
5.5.1	Dimensionering	15
5.5.2	Tvättvätska	16

5.5.3	Skrubberförsök.....	16
5.5.4	Analyser.....	17
6	Resultat	17
6.1	Energikartläggning.....	17
6.1.1	Elförbrukning.....	17
6.1.2	Processvärme	18
6.1.3	Bilder från värmekamera	19
6.2	Uppföljning av anrikningsprocessen.....	19
6.3	Ammoniakabsorption	21
7	Analys och diskussion.....	22
7.1	Energikartläggning.....	22
7.2	Uppföljning av anrikningsprocessen.....	23
7.3	Ammoniakabsorption	24
8	Slutsatser.....	25
9	Referenser	27
10	Bilagor	29

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND TILL PROJEKTET

Biogas (metan och koldioxid) producerad från gödsel kan ersätta fossila bränslen och minska emissionen av växthusgaser. För närvarande används biogas producerad på gårdsanläggningar huvudsakligen till kraftvärmeproduktion. Uppgradering till fordonskvalitet kan ge ett ökat värde på gasen, antingen för avsalu eller för användning som drivmedel på gården. Uppgraderad biogas ersätter dessutom fossila energikällor i större utsträckning än vad kraftvärmeproduktion gör. Detta ger uppgradering av biogas en större potential att minska koldioxidutsläppen. Vid gasflöden motsvarande de som erhålls vid gårdsanläggningar är dock kostnaderna för höga för att uppgradering med konventionell teknik ska kunna motiveras ekonomiskt. För att reducera denna kostnad behövs innovativa tekniska lösningar med förutsättning att tillämpas i relativt enkla och billiga system.

Småskalig biogasproduktion omfattar i detta arbete anläggningar vars röt-kammarvolym är mindre än 1000 m³. 2014 producerade dessa anläggningar i snitt ca 1,26 GWh per anläggning. Denna typ av relativt sett små gårdsanläggningar stod 2014 för 3 % av den totala biogasproduktionen i Sverige. Dessa anläggningar producerar i dagsläget i huvudsak värme eller kraftvärme. För den totala biogasproduktionen 2014 på 1 784 GWh för samtliga biogasproducenter gick 57 % till uppgradering. Uppgraderingen skedde på de större anläggningarna vars röt-kammare hade en medelstorlek av ca 3000 m³ (Harrysson 2015).

Processintern metananrikning är en anrikningsteknik under utveckling som innebär att röt-kammarinnehållet pumpas till en behållare där koldioxid desorberas genom aktiv luftning för att därefter pumpas tillbaka till röt-kammaren. Detta innebär att metanhalt i biogasen som lämnar röt-kammaren ökar (Hayes m.fl. 1990). Styrparametrarna för processen utgörs av slamflödet, luftflödet samt dimensionering av desorptions-behållaren (även kallad kolonnen). Tekniken har varit mer eller mindre aktuell sedan tidigt 90-tal (Hayes m.fl. 1990). Sedan dess har den testats och utvärderats i satsvisa laborieförsök såväl som i pilotskaleanläggningar. Den har ännu inte implementerats permanent på någon fullskalig gårdsanläggning.

Metanför-lust från kolonnen (metanslip) sker via den gas (svepgas) som passerar röt-slammet. I pilotskala har en metanhalt av 87 % i biogasen uppnåtts med metanslip av 8 % (Nordberg m.fl. 2012). För att minska metanslipet har förhållandet mellan slamflödet och luftflödet ändrats vilket gav en metanhalt av 81 % med metanslip av 1,8 % (Andersson m.fl. 2014). Med ett högre luftflöde antas el-behovet för processen stiga. Värme-behovet är en viktig parameter för många biogasanläggningars totalekonomi. I dagsläget saknas underlag för att bedöma vilken effekt processintern metananrikning har på värme-balansen på en biogasanläggning och tekniska lösningar för att minska värme-förluster.

Ammoniak har vid tidigare försök visat sig lämna processen via svepgasen. Ammonium/ammoniak är ett viktigt växtnäringsämne inom lantbruket speciellt inom ekologiskt lantbruk. Utsläpp av ammoniak med svepgasen kan förutom att ammoniumhalten i rötresten minskar även leda till lokala hälsorisker och ökad övergödning (Naturvårdsverket 2016; Salomon m.fl. 2013). Därför är det viktigt att identifiera lämplig teknik för att fånga in ammoniak från svepgasen.

JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik och Sötåsens Naturbruksgymnasium bygger en småskalig uppgraderingsanläggning baserad på processintern metananrikning. Demonstrationsprojektet sker i samarbete med SLU och Hushållningssällskapet Skaraborg och finansieras av SLF, Västra götaland-regionen (VGR) och Interreg ÖKS. Konceptet har utvecklats av JTI och SLU under längre tid och är speciellt anpassat för småskaliga biogasanläggningar. Anläggningen som byggs är en första prototyp-anläggning i fullskala. Denna anläggning kommer ge värdefull information inför konstruktion av nästa generations anläggningar och behöver därför

utvärderas och modifieras för att nästkommande anläggning skall ha högsta möjliga tekniska mognadsgrad. Vidare finns det en mindre pilotanläggning på JTI där försök med processintern metananrikning har pågått under tiden som examensarbetet utfördes.

1.2 SYFTE OCH MÅL

1.2.1 SYFTE

Syftet med detta examensarbete är att utvärdera driften av processintern metananrikning vid Sötåsen avseende el- och värmebehovet för processen. En lämplig metod för uppfångning av ammoniak i svepgasen identifieras. Under försöken övervakas biogas- och anrikningsprocessen med provtagningar avseende gashalter, pH samt alkalinitet.

1.2.2 MÅL

- Beräkna el- och värmebehov ($\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ avdriven koldioxid och $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ avdriven koldioxid).
- Ge förslag på energieffektiviseringsåtgärder.
- I laboratorieskala demonstrera en lämplig metod för uppfångning av ammoniak från svepgasen som avskiljer >80 % av den ursprungliga koncentrationen.
- Ge underlag för kommande försök.

1.3 GENOMFÖRANDE OCH AVGRÄNSNINGAR

I det inledande skedet genomfördes litteraturstudier om biogasprocessen och uppgraderingsmetoder med fokus på processintern metananrikning. Försöksplaner och mål med arbetet arbetades fram. Arbetet indelades i tre huvudområden: energikartläggning, processuppföljning (provtagningar och mätningar på anläggningen) och ammoniakabsorption. Den huvudsakliga fokusen låg på energikartläggningen. Anrikningsanläggningen på Sötåsens biogasanläggning färdigställdes under arbetets gång.

Metodik för energikartläggning och uppföljning av processen vid Sötåsen fastställdes. Dessutom arbetades en metod att absorbera kväve från ammoniak fram. Även studier på mät- och analystekniker genomfördes i detta skede. Dessa metoder tillämpades praktiskt på JTI:s mobila biogasanläggning i övnings syfte. Avgränsningar innefattade att energiförbrukningen endast studerades på desorptionsbehållaren och inte anläggningen i stort, samt att ammoniakabsorption testades i liten skala och inte på själva uppgraderingsanläggningen.

Vid upprepade besök till Sötåsen kalibrerades mätinstrument, och verifieringar på mätdata i form av temperaturer, flöden och effekt genomfördes vid behov för energikartläggningen. Vidare togs prover på gaser och slam. Driften av anläggningen övervakades under arbetets gång även via uppföljning över internet, loggfiler samt samtal med de som arbetar på Sötåsen.

Försök med ammoniakabsorption genomfördes i laboratorieskala i anslutning till JTI:s mobila biogasanläggning. Syftet var att ge indikationer på hur väl tekniken fungerar i liten skala. Dimensioneringen av ammoniakrenaren baserades på litteratur från försök på djurstallar.

Resultat från undersökningarna bearbetades och sammanställdes. Slutligen drogs slutsatser om energibesparingsåtgärder samt ammoniakabsorption.

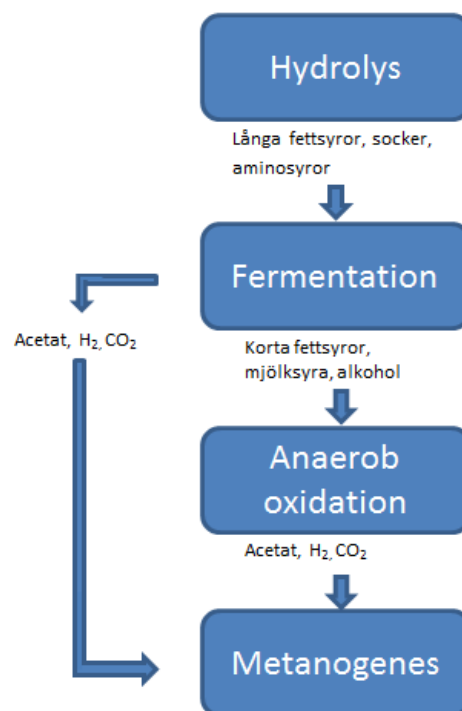
2 BIOGASPROCESSEN

2.1 GRUNDLÄGGANDE MIKROBIOLOGI

Biogas består främst av metan (CH_4) och koldioxid (CO_2) och bildas under anaeroba processer i en röt-kammare. Proportionerna är ungefär 50 – 75 % metan och 25 – 45 % koldioxid. Det finns även små mängder svavelväten,

syre, kväve, ammoniak och väte i biogasen. Gasens sammansättning beror bland annat av vilket substrat som rötas och miljön i röt-kammaren. Olika substrat innehåller olika proportioner av bl.a. kol, kväve och väte. Detta ger olika förutsättningar för de mikroorganismer som arbetar i processen. Parametrar som hydraulisk uppehållstid, organisk belastning (se ordlista) och processtemperatur kan påverka gassammansättningen och biogasutbytet. Generellt ökar omvandlingskinetiken till metan med ökad temperatur. Eftersom metanogenesen kan vara ett hastighetsbegränsande steg är detta av stor betydelse (Zhao 2011). Då röt-kammaren håller en temperatur kring 35 – 38 °C kallas processen mesofil. Detta är den vanligaste temperaturen för små gårdsanläggningar (Harrysson m.fl. 2015).

Biogasprocessen består av flera steg som tillsammans bidrar till gasproduktionen. För att erhålla en stabil process ska dessa steg gynnas så långt det är möjligt genom vissa styrparametrar som beskrivs senare. Figur 1 visar en översiktsskiss över stegen:



Figur 1: Principskiss över de olika processerna i en röt-kammare.

Hydrolysis kallas det inledande steg där enzymer utsöndras från mikroorganismer och påbörjar nedbrytningen av substratet. I detta steg angrips långa kolkedjor som fetter, proteiner och kolhydrater som blir till fettsyror, aminosyror och socker. Fermentation är det steg där bakterier bryter ned kolkedjor ytterligare till acetat, alkoholer, korta fettsyror, mjölksyra och koldioxid. Anaerob oxidation bryter ned restprodukter från fermenteringen så att det sista metanbildande steget kan ta vid. Detta sker simultant med fermenteringen som även den i viss utsträckning ger restprodukter direkt till sista steget. Metanogenes är det sista steget där arkéer omvandlar ättiksyra, väte och koldioxid till metan. Dessa organismer är känsligare än de andra för förändringar i systemet. Dessutom är deras tillväxttid den långsammaste. Sammantaget är metanogenesen, och hydrolysen om det rör sig om mycket komplexa föreningar, de begränsande stegen för biogasproduktionen (Carlsson m.fl. 2009).

2.2 MILJÖVARIABLER

2.2.1 ALKALINITET OCH PH

Många system i naturen är känsliga för pH-förändringar. pH är ett mått på hur stor koncentration oxoniumjoner (H_3O^+) en vätska innehåller enligt $pH = -\log_{10} [H_3O^+]$. Oxoniumjoner bildas av att en syra agerar

som en "protongivare" när den löses i vatten. På motsvarande sätt fungerar en bas som en "protontagare" och bildar hydroxidjoner (OH^-) i vattenlösningar.

Olika mikroorganismer föredrar särskilda surhetsintervaller. Detta leder till att pH-reglering är viktig för biogasproduktion. Därför bör alkaliniteten, även kallad buffertkapaciteten, vara tillräckligt hög för att skydda de olika processerna mot stora pH-svängningar. I röt-kammaren bidrar en mängd svaga syror och baser i olika utsträckningar till alkaliniteten. Exempel på vanliga buffertsystem är de som utgörs av ammonium (NH_4^+), och kolsyra (H_2CO_3). Båda spelar roll i en röt-kammare. För kolsyra ser buffertsystemet ut som följer:

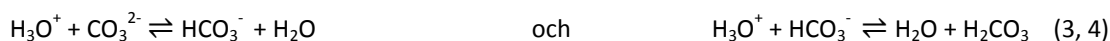
Kolsyra protolyseras till vätekarbonat och oxoniumjon:



Vätekarbonat kan i sin tur även den protolysera till karbonatjon och oxoniumjon:



Vattnet får en jämvikt av kolsyra och karbonatjoner som kan hålla pH stabilt då en syra eller en bas tillsätts. Hur mycket som kan buffras av systemet anges av alkaliniteten. Ju mer HCO_3^- -milliekvivalenter per liter desto större mängd oxoniumjon kan genomgå reaktion i systemet enligt:



Resultatet blir alltså att oxoniumjonerna ingår i en förening med den bas som finns tillgänglig i form av karbonater och blir till kolsyra. Så länge det finns baser tillgängliga kan systemet buffra syror. I en röt-kammare ligger alkaliniteten typiskt kring 2000 - 4000 mg CaCO_3 /l för reningsverksslam (Pohland m.fl. 1963) och över 10 000 mg CaCO_3 /L för kväverikare gödselslam (Carlsson m.fl. 2009). Alkaliniteten i en röt-kammare är dock komplex och består av en sammansättning syra/bas-par. De system av svaga syror och baser som vanligtvis finns i en röt-kammare är: karbonat (beskriven ovan), ammonium, fosfat, sulfid, ättiksyra och propionsyra (Pohland 1969).

Med $\text{pK}_a = 6,35$ för bikarbonatbuffertsystemet och $\text{pK}_b = 4,75$ (Lide 2003) för ammoniak/ammonium-systemet är det dessa två system som står för den största buffertverkan vid pH 6 - 7 respektive pH 8 - 9 (Yu m.fl. 2009). För en väl fungerande biogasprocess hamnar pH på ca 7-8. Därmed behövs det vanligtvis ingen aktiv justering av pH för att nå bra förhållanden för processen.

2.2.2 AMMONIUM/AMMONIAK

Kväverika substrat bidrar under fermenteringen till att ammonium bildas. Då ammonium är ett näringsämne bidrar det till förökning av mikroorganismerna. Ammonium existerar dock i jämvikt med ammoniak som kan vara hämmande för processer med höga halter (> 3 g ammonium-N/l). Det bör med andra ord råda en lagom balans mellan kväve- och kolmängderna. För att påverka ammoniakhalten kan exempelvis substraten bytas. Att samröta ett kvävefattigt substrat med ett kväverikt kan ge gynnsamma förutsättningar C/N någonstans mellan 15 - 30 brukar anses lagom (Carlsson m.fl. 2009). Jämvikten för ammonium/ammoniak ser ut enligt:



Den förskjuts till vänster ju högre pH samt temperatur som råder i röt-kammaren. Som ammoniak är den gasformig medan ammoniumjonerna är bundna i röt-slammet. Ett pH något över 7 är vanligt, men röt-kammaren bör inte utsättas för stora och häftiga pH-ökningar eftersom detta höjer ammoniakkoncentrationen vilket kan hämma rötningen.

En bra buffertkapacitet är också viktig, vilket innebär att alkaliniteten hos substratet måste vara tillräckligt stor. Därför analyseras pH och alkalinitet för att säkerställa att tillräckligt hög alkalinitet råder. En sjunkande

alkalinitet kan indikera problem med metanogenerna. Om de är hämmade kan fettsyror ackumuleras vilka i sin tur förbrukar alkaliniteten i röt-kammaren (Carlsson m.fl. 2009).

3 ETABLERADE UPPGRADERINGSMETODER

3.1 ABSORPTION

Det finns ett antal uppgraderingsmetoder som utnyttjar koldioxidens benägenhet att lösa sig i olika vätskor. I så kallade skrubbers möter den ingående biogasen ett motriktat flöde av en vätska som absorberar koldioxid i högre grad än metan. För att öka effektiviteten innehåller skrubberkolonnen ett bärmaterial vars yta underlättar processen. Vilket absorptionsmedel som används varierar, men gemensamt för dem är att metanet lämnar skrubbern i gasfas i avsevärt högre grad än koldioxiden.

I en vattenskrubber pumpas vatten med låg temperatur under högt tryck genom kolonnen. Vattnet förs sedan till en behållare med lågt tryck där det värms upp och på så vis släpper ifrån sig koldioxiden, därefter kan vattnet användas igen. Organiska lösningar kan användas på liknande vis istället för vatten. En annan metod är att låta aminosyror reagera med metanet. Denna högst selektiva reaktion ger en hög uppgraderingseffektivitet (Petersson m.fl. 2009). Skrubberteknik var 2014 den dominerande metoden att uppgradera biogas i Sverige med 41 vattenbaserade anläggningar och 12 kemiska (Harrysson 2015). I avsnittet om ammoniakrening av svepgasen i detta arbete nyttjas skrubberteknik och beskrivs i närmare detalj.

3.2 PRESSURE SWING ADSORPTION (PSA)

Denna teknik har fått sitt namn från de olika tryck den arbetar under. Genom adsorption fastnar koldioxid på en yta av ett adsorberande material. Det kan vara aktivt kol som under högt tryck binder koldioxiden och därmed separerar den från biogasen. Genom att därefter sänka trycket renas kolet från koldioxiden och kan därefter användas igen då trycket höjs. För att hålla en kontinuerlig anrikningsprocess används flera parallella kärl. Medan adsorptionsmaterialet hos ett kärl regenereras används ett annat kärl (Harrysson 2015).

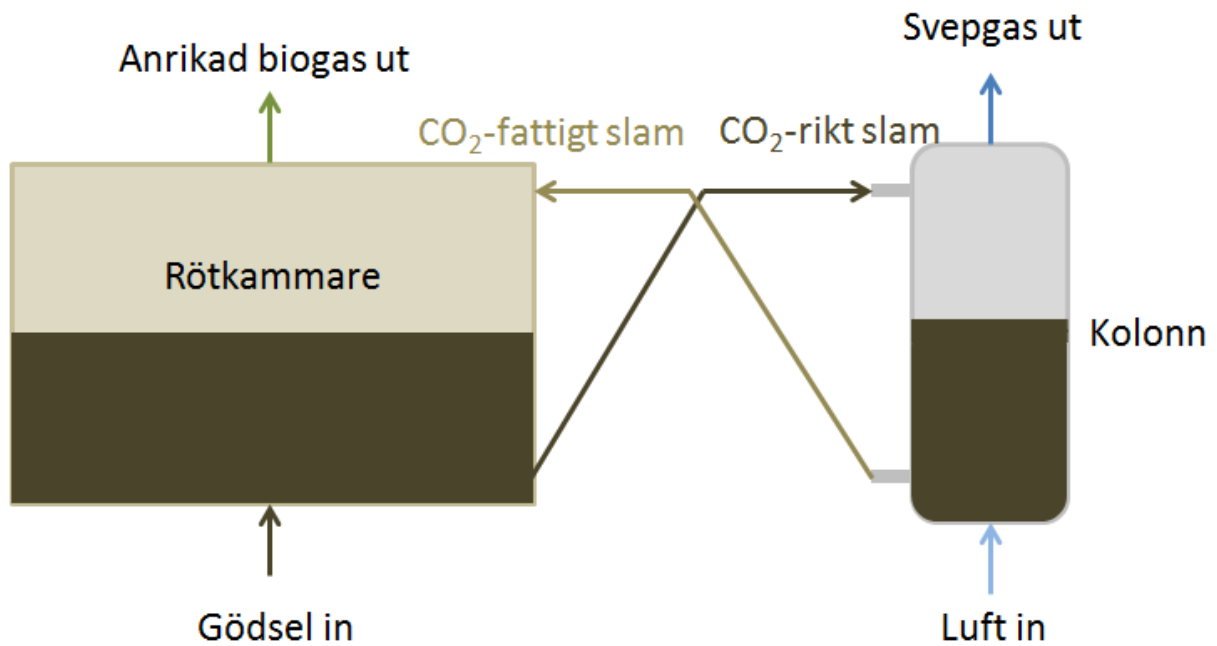
Genom att åter rena den gas som desorberas från materialet då trycket sänks uppnås en hög anrikningshalt. En viss mängd metan kan nämligen adsorberas tillsammans med koldioxiden i de tidiga stegen. Vatten och svavelväten försämrar anrikningen och måste således tvättas bort från gasen i tidigare steg (Petersson m.fl. 2009). År 2014 var 6 anläggningar i drift i Sverige (Harrysson 2015).

3.3 MEMBRAN

En tredje metod för uppgradering utnyttjar membran som separerar främst metan och kväve medan koldioxid och de resterande gaserna passerar membranen och kasseras. Denna metod genomförs oftast i två steg och var vanlig för uppgradering av deponigas under 1970-talet. Den tidiga tekniken medförde högt metanslip men metoden har förbättrats under senare år (Petersson m.fl. 2009).

4 PROCESSINTERN METANANRIKNING

Denna teknik är fortfarande i utvecklingsstadiet och drivs för tillfället inte kommersiellt. Principen bakom är att utnyttja den stora skillnaden för löslighet i vatten mellan koldioxid och metan. Lösligheten beror på temperatur, pH och tryck. I en mesofil röt-kammare löser sig koldioxid ca 40 gånger bättre i vatten än metan. Detta innebär att rötslammet i kammaren innehåller en större andel koldioxid än metan. Genom att kontinuerligt pumpa ut rötslam till en extern behållare där koldioxid desorberas och sedan återföra det koldioxidfattiga slammet till röt-kammaren minskar röt-kammarslammets och slutligen biogasens koldioxidkoncentration (Hayes m.fl. 1990). Schematiskt kan processen beskrivas enligt figur 2:



Figur 2: Schematisk översiktsbild över anrikningsprocessen.

I kolonnen genomgår koldioxiden en fasändring. Från att vara löst i slammet följer den som gas med den inströmmande luften ut i toppen av kolonnen. Att desorbera ett ämne på detta vis kallas "air stripping" och används inom flera industriella områden.

4.1 STYRPARAMETRAR

Styrningen utgörs av följande parametrar (Andersson m.fl. 2014):

- Slamflödena in i och ut ur kolonnen i kombination med kolonnens volym med vilka uppehållstiden avgörs.
- Slamhöjden i kolonnen (vilken avgör mottrycket för kompressorn som luftar slammet).
- Svepgasflöde genom kolonnen (påverkar mängden luft som passerar slammet).

4.2 TIDIGARE FÖRSÖK OCH UTMANINGAR MED PROCESSINTERN METANANRIKING

4.2.1 AVDRIVNING AV METAN

Även om koldioxid i högre grad följer med slammet till kolonnen för avdrivning än metan, desorberas även den mängd metan som ändå löst sig i slammet i rökammaren. Denna metan följer svepgasen ut till atmosfären. Tidigare försök har visat att det metan som löst sig i slammet desorberas fortare än koldioxiden. Efter 15-20 min har i stort sett all metan avdrivits från den mängd slam som befinner sig i kolonnen. Däremot tar det betydligt längre tid för koldioxiden att lämna slammet (Nordberg m.fl. 2005). En konsekvens av detta blir att uppehållstiden för slammet i kolonnen bör vara relativt lång alternativt att luftflödet är högt. En för lång uppehållstid gör dock omsättningen av slammet i kolonnen låg och leder till en dålig effektivitet i processen (Nordberg m.fl. 2005). Ett högt svepgasflöde leder i sin tur till ökad elförbrukning.

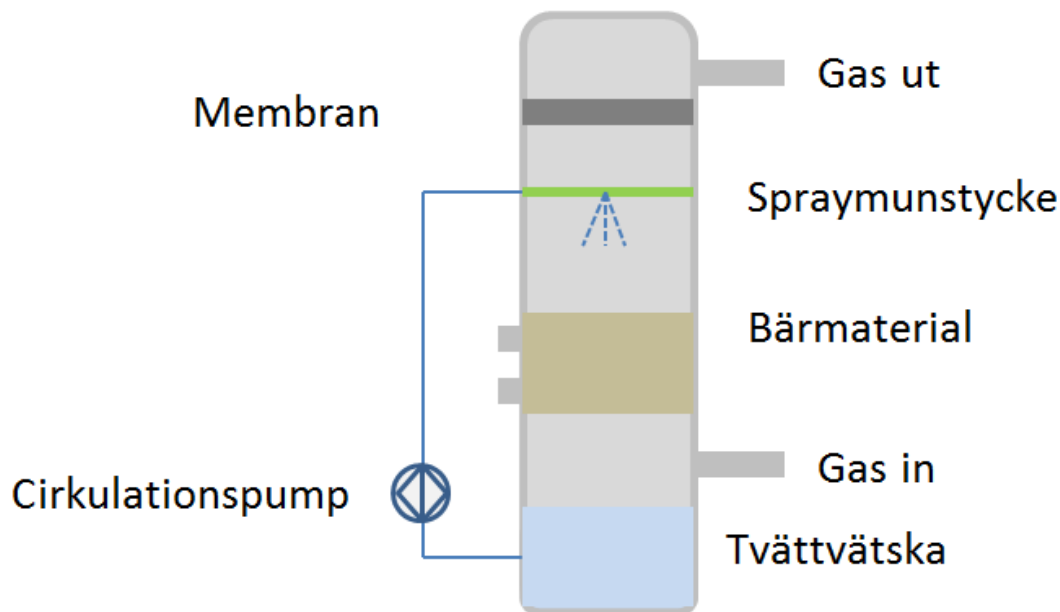
Redan tidiga försök antydde att det fanns en stor potential för tekniken. Den uppskattades kunna uppnå en anrikningsgrad av 95 % metan och mindre än 2 % metanslip (Hayes m.fl. 1990). En så hög nivå har dock inte uppnåtts hittills utan att metanhalten i svepgasen blir för hög.

4.2.2 AVDRIVNING AV AMMONIAK

I ett tidigare försök drevs ammoniumkväve bort från slammet med svepgasen (Andersson m.fl. 2014). Den slutliga rötresten innehöll 11 – 22 % mindre ammoniumkväve än innan processen. Denna bieffekt av anrikningen kan leda till att tillgängligt kväve förloras från rötresten om det inte omhändertas. Ammoniakutsläpp leder dessutom till övergödning och försurning (Andersson m. fl. 2014; Petersson 2006).

4.2.2.1 PRINCIPEN BAKOM SKRUBBERTEKNIK

En vanlig metod att rena gaser från oönskade ämnen är att använda "skrubbers". Principen bygger på att skapa en miljö som främjar lösligheten av ämnet i en tvättvätska. Vätskan sprayas över gasens passage genom skrubbern och absorberar till en viss grad ämnet. Därefter rinner vätskan till en ackumulator för att sedan åter cirkuleras. Vätskan kan bytas ut kontinuerligt eller satsvis (COLASIT Scandinavia AB). I figur 3 ges en överblick av processen:

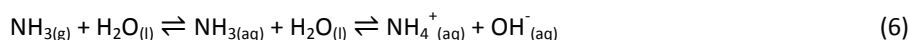


Figur 3: Principskiss över hur skrubberteknologi fungerar.

Gasen förs in genom den nedre ingången. När den stiger passerar den ett lager med bärmaterial. Här pumpas tvättvätskan in. Bärmaterialets syfte är att ge en stor yta på vilken vätskan och gasen kan samverka. Vätskan som har det oönskade ämnet löst i sig rinner ned mot brunnen längst ned i skrubbern. Den dimma som är för fin för att rinna ned direkt stoppas av ett membran i toppen av skrubbern som slår ihop de mikroskopiska dropparna tills de kan rinna ned till brunnen.

4.2.2.2 TVÄTTVÄTSKA

För ammoniakabsorption i vatten ser jämvikten ut enligt:



För en sur tvättvätska förskjuts jämvikten åt höger vilket ökar effektiviteten hos skrubbern. Med ett pH under 4 är en effektivitet på 90 % inte ovanlig. Vanligtvis används svavelsyra i detta syfte vilket bildar ammoniumsulfat i vätskan. När tvättvätskan hålls sur ökar den totala lösligheten av ammoniak, dock brukar vätskan bytas ut i en takt som håller ammoniumsulfatkoncentrationen under 40 % av vätskans totala löslighet, vilket innebär ca 150 g/l (Melse m.fl. 2005). Jämvikten i (6) förskjuts ytterligare åt höger ju lägre temperatur tvättvätskan håller. Då svepgasen värmer upp vätskan när den passerar skrubbern kan det vara problematiskt att hålla temperaturen under 20 °C. Vid temperaturer högre än så försämras lösligheten avsevärt vilket kan ge fog för aktiv kylning av

vätskan (Moore m.fl. 2013). Mängden avdriven ammoniak påverkas dessutom av temperaturintervallet i rötkammaren då detta förskuter jämvikten på samma vis. En mesofil rötkammare på 37 °C har en större andel ammonium än en termofil på 57 °C (Zhao 2011).

För rening av andra ämnen passar andra tvättvätskor. Svaveldioxid, fluorväten, saltsyra, klor, svavelväten och ättiksyra är exempel på föroreningar som oftast löses upp med vatten och lut (COLASIT Scandinavia AB).

4.2.2.3 DIMENSIONERING

Effektiviteten hos processen beror till stor del på hur skrubbern är dimensionerad. En längre uppehållstid för gasen leder till en större mängd löst ämne i tvättvätskan. Upphållstiden beror på gasflödet in i skrubbern och volymen. Vid konstruktionen tas därför hänsyn till det aktuella gasflödet, vilket ämne som ska lösas och vilken uppehållstid det behöver. Upphållstiden kallas EBRT (Empty Bed Air Residence Time) och ges av reaktorvolymen (m^3) dividerat med gasflödet (m^3/h).

Bärmaterial klassificeras utefter dess area per volymsenhet (m^2/m^3). Större yta och förmåga att hålla bärmaterial blött ökar kapaciteten hos skrubbern (Melse m.fl. 2005).

Ett exempel från ett grisstall i Nederländerna där ammoniak renades från den utgående ventilationsluften ser ut enligt tabell 1:

Tabell 1: driftparametrar och dimensionering av en ammoniakskrubber (Melse m.fl. 2005).

Gasflöde (medel):	2 200 m^3/h (8,2 ppm NH_3)
Gasflöde (maximalt):	4 000 m^3/h
Volym:	1 m^3
Medel. EBRT:	1,6 s
Min. EBRT:	0,9 s
Syra och pH:	Svavelsyra pH 1,4 till 4,4
Yta bärmaterial:	100 m^2/m^3

4.2.3 KVÄVE, AMMONIAK OCH PH

Det faktum att kolonnen introducerar luft i rötslammet har setts som ett potentiellt problem. Rötningen är som bekant en anaerob process. Det har därför föreslagits att en separat avluftningstank där slammet uppehåller sig en tid innan det returneras till rötkammaren ska placeras mellan kolonnen och rötkammaren (Hayes m.fl. 1990). Vidare försök indikerar dock att den kortvariga kontakten med syre inte behöver påverka metanproduktionen negativt. En ökad halt av atmosfäriskt kväve är istället ett större problem då denna följer med biogasen och sänker metankoncentrationen (Nordberg m.fl. 2005).

Ett problem av stor vikt är en sorts "inbyggd motsättning" som råder mellan bortdrivningen av koldioxid och att fortsätta hålla avdrivningsprocessen effektiv. Detta fenomen fungerar enligt följande: Luftningen av slammet driver bort koldioxid med svepgasen → Då kolsyrakoncentrationen sjunker minskar alkaliniteten → pH höjs → koldioxiden desorberas inte lika lätt från bikarbonater och således sätts en begränsande faktor på uppgraderingen (Yu m.fl. 2009).

4.2.4 PROCESSENERGIBEHOV

En viktig aspekt av processintern metananrikning att beakta är dess energibehov. Eftersom rötslammet cirkulerar till en extern behållare är det oundvikligt att värme avgår till omgivningen. Det krävs även elektrisk energi för att uppehålla processens pumpar och blåsmaskiner. Energibehov är dock något allmänt för alla uppgraderingstekniker. Att direkt förbränna den icke uppgraderade biogasen i en värmepanna för att leverera värme alternativt alstra elektricitet i en generator medför således de minsta förlusterna. Att ändå uppgradera gasen har dock andra fördelar. Värden av olika energiformer beror på flera aspekter, bl.a. tillgång och

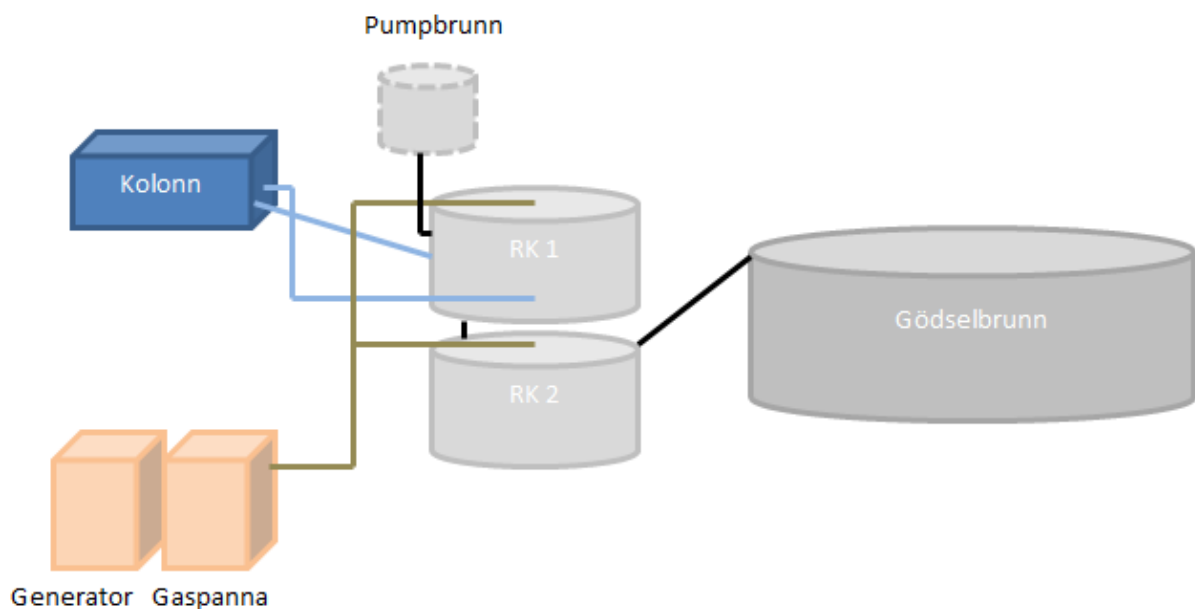
efterfrågan samt miljömässiga fördelar. Därför kan uppgraderad biogas som används för att driva fordon värderas högre än om samma gas hade levererat värme till ett lokalt fjärrvärmenät (Andersson 2011). Detta trots att fordonsgasen kostade mer energi att framställa.

Värmeförluster har även inverkan på biogasprocessen i sig. Om mikroorganismerna utsätts för stora temperatursvängningar kan biogasproduktionen hämmas. Energiförluster kan anges med olika nyckeltal. Tidigare värmebalanser utförda på flera gårdsanläggningar visade att det i medel krävdes 0,24 enheter värme per producerad enhet värme samt 0,07 enheter el per producerad enhet el (Hårsmar 2014). En annan studie utförd på Uppsala vattens avfallsbiogasanläggning vid Kungsängen visade på ett värmebehov av 208 kWh/ton substrat och ett elbehov av 152 kWh behov/kWh producerad (Andersson 2011). En studie för medeltalen av total energi producerad/total använd energi hos samrötningsanläggningar för utsorterat matavfall visade på energikvoter mellan 2 – 4 (Yngvesson m.fl. 2013).

5 METOD

5.1 SÖTÅSENS BIOGASANLÄGGNING

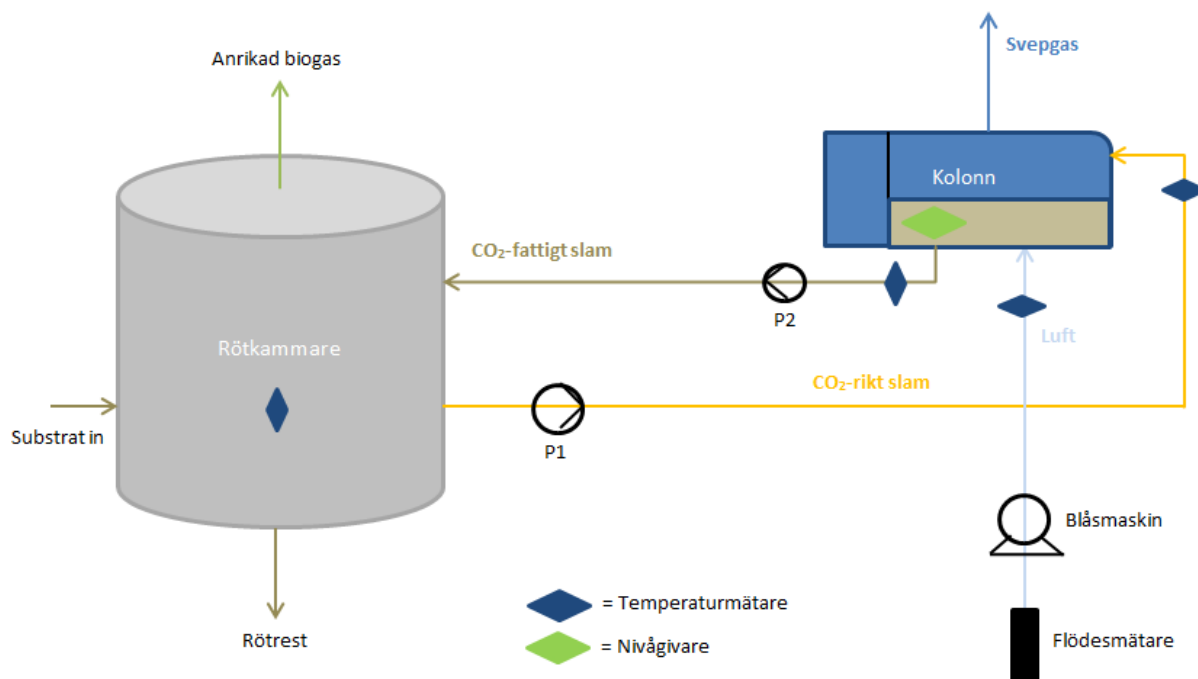
Gårdsanläggningen för biogas vid Sötåsens naturbruksgymnasium ser ut på följande vis: En pumpbrunn innehållandes huvudsakligen nötgödsel förser rötchammare 1 (RK 1) med 6 – 10 ton flytgödsel/dygn som röts i två steg. RK 1 är huvudrötchammaren, RK 2 används för efterrötning och nedkylning av rötresten från RK 1 (båda dessa rötchammare har aktiva volymer av 260 m³). Omrörare i rötchammarna ser till att slammet blandas. Biogasen leds i sin tur till en gasdriven generator som förser skolan med ca 16 kW_{el}, alternativt en gaspanna som levererar ca 85 kW_{th}. Rågasproduktionen ligger vanligtvis kring 5 - 10 Nm³/h. Rötresten lagras i en gödselbrunn och används som gödsel av gården. Till detta projekt har nu huvudrötchammaren kopplats till en kolonn för processintern metananrikning i form av en modifierad sjöcontainer (se figur 4) vid vilken försöken för arbetet genomfördes i etapper.



Figur 4: Biogasanläggningen vid Sötåsen. Pumpbrunnen ligger under marken

5.2 FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING

En översikt av processen ges i figur 5:



Figur 5: Processintern metananrikning på Sötåsens biogasanläggning.

Styrningen av utrustningen för processintern metananrikning som listas i tabell 2 sker via en PLC. En frekvensomriktare (Emotron FDU 2.0) styr varvtalet på blåsmaskinen. En dator kopplas till frekvensomriktaren på plats för att välja varvtal. Parametrarna för metananrikningsprocessen ställs in via PLC:n över en internetsida och är:

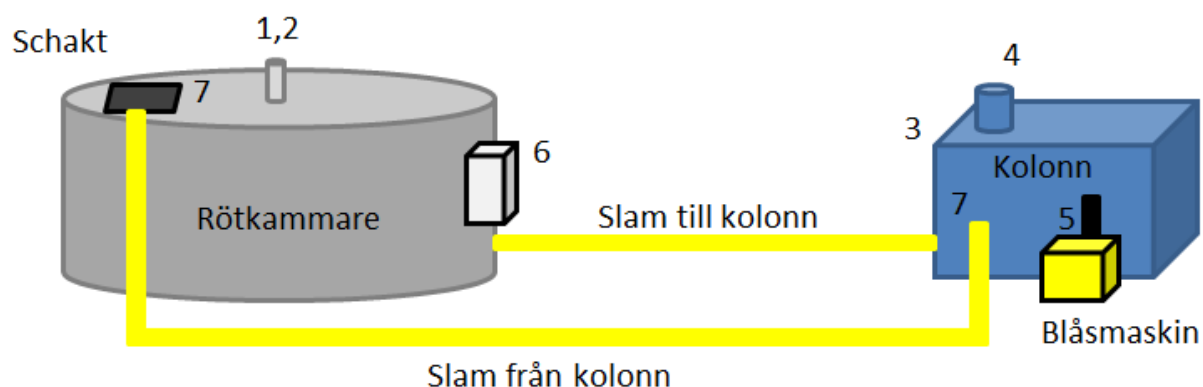
- Slamflödet in i och ut ur kolonnen (ges av gångtiden på P1)
- Slamhöjden i kolonnen (gångtiden på P2 styrs utifrån nivån i kolonnen genom att P2 startas när nivån är 1 cm högre än börvärdet och stoppas när den är 1 cm lägre än börvärdet)
- Svepgasflödet in i kolonnen

Tabell 2: presentation av de komponenter som ingår i processen.

Benämning	Typ	Funktion/egenskaper
P1	Centrifugalpump av märket FLYGT. Märkeffekt 3,1 kW.	Pumpar in slam i kolonnen med önskad gångtid (sek/min).
P2	Centrifugalpump av märket FLYGT. Märkeffekt 2,8 kW.	Pumpar ut slam ur kolonnen. Sker automatiskt för att behålla den angivna slamhöjden.
Kolonn	Sjöcontainer. Höjd: 2,33 m. Längd: 4,05 m. Bredd: 2,04 m. Isolering tak: 0,10 m cellplast. Isolering vägg och golv: 0,15 m cellplast.	Slamhöjden ges av en givare i containern.
Temperaturmätare	Logger (x4)	Registrerar mätvärden för temperaturer. Kopplade till PLC. Temperaturerna loggas i filer.
Blåsmaskin	Av märket KAESER. Märkeffekt 7,5 kW.	Varvtalsstyrd med hjälp av frekvensomriktaren, där effektbehovet kan erhållas.
Flödesmätare	Differentialtryckmätare	Monteras på blåsmaskinen vid provtillfället.
Rötkammare	Gödselrötkammare	Aktiv volym 260 m ³ . Isolerad.

5.3 UPPFÖLJNING AV PROCESSEN

Provtagningar avseende biogasprocessen samt anrikningen genomfördes i flera omgångar på biogasanläggningen under de mätserier som utgjorde grunden till energikartläggningen. Driften på anläggningen var med andra ord inte inställd för att maximera metanutbyte vilket är viktigt att notera. Vilka prover som togs var presenteras i figur 6 samt tabell 3:



Figur 6: Översikt av provtagningsplatserna.

Tabell 3: förteckning över provtagningsplatserna

Provtagningsplats	Prov	Analysmetod	Analys
1	Biogasprov	Kitagawarör via en kulventil.	Gassammansättning.
2	Biogasprov	Awite "AwiFLEX", analyserade metan, koldioxid och syrgas var fjärde timme och svavelväten två gånger per dygn.	Gassammansättning.
3	Svepgasprov	Kitagawarör (via en kulventil).	Gassammansättning.
4	Svepgasprov	Aspirationspsykrometer (via svepgasutsläppet).	Fukthalt och temperatur.
5	Svepgasflöde	Monterbar flödesmätare.	Gasflöde.
6	Biogasflöde	Flödesmätare från Fluid Inventor.	Kontinuerlig loggning och normalisering av gasflödet mot tryck och temperatur.
7	Slamprover	Från schakt i RK. Från kulventil på utgående slamflöde från kolonnen.	pH och alkalinitet.

5.3.1 PROVTAGNINGAR OCH ANALYSER

Slamprover från rötkammaren togs från ett schakt på rötkammartaket. Prover på utgående slam från kolonnen togs från en kulventil monterad på slangen som returnerar slam till rötkammaren. Båda platserna benämns 7 i figur 6. pH-mätningarna utfördes med en temperatur- och pH-meter. Alkaliniteten i slammet analyserades på plats med hjälp av titrering med 0,1 M saltsyrelösning. Titreringen genomfördes tills pH 4,5 uppnått och alkaliniteten angavs som mg CaCO₃/l.

Reagensrör från Kitagawa användes för att analysera biogas och svepgas på koldioxid (mätområdena 0 % – 5,2 %, 0 % – 40 %), svavelväten (0 – 2000 ppm) samt ammoniak (50 – 900 ppm). Gasanalyserna genomfördes vid provplats 1 och 3. Awiteanalyserna genomfördes och loggades automatiskt. Med en aspirationspsykrometer analyserades fukthalten och temperaturen på den utgående svepgasen vid provplats 4.

En luftflödesmätare monterades på blåsmaskinen vid provplats 5 för att mäta upp luftflödet som funktion av blåsmaskinens varvtal vid olika slamhöjder i kolonnen.

Biogasflödet från röt-kammaren registrerades med en flödesmätare av märket Fluid Inventor (GD-100 DN25 mätområde 0,35 - 35 m³/h). Flödesmätaren monterades på utsidan av röt-kammaren vid provplats 6. Mätaren har inbyggda tryck och temperaturgivare för normalisering av uppmätt flöde. Det ackumulerade flödet loggades via PLC:n som styr systemet för processintern metananrikning.

GC-analyserna sparades till senare för analys i laboratoriet (enligt: Gaskromatograf (PerkinElmer ARNEL, Clarus 500; kolonn: 7' HaysSep N 60/80, 1/8 " SF; FID detektor 250 °C; bärgas : helium, flöde 31 mL/min; injektortemperatur: 60 °C; injektion med hjälp av Headspace sampler Turbo Matrix 110).

5.4 FULLSKALEFÖRSÖK VID SÖTÅSEN OCH ENERGIKARTLÄGGNING

Utvärdering av fullskaleprocessen vid Sötåsen skedde under tre perioder. Första perioden (mitten av januari fram till slutet av mars) innefattade drifttagning av utrustningen då funktionstester och enklare ombyggnationer skedde. Andra perioden (29 mars till 20 april) innefattade en referensperiod utan drift av processen följt av ett orienterande försök med slamflödet 7,28 ton/h och luftflödet 180 m³/h vilket avslutades med 3 dygns drift av processen utan luftning. Efter att andra försöksperioden avslutats installerades en tank för avskiljning av kvävgas för slamflödet från kolonnen till röt-kammaren. Den tredje perioden (2-18 maj) utgjorde huvudförsöksperiod för energikartläggningen. Under denna period varierades svepgasflödet under olika drifttider för att verifiera dess inverkan på värmeförlusterna. I tabell 4 redovisas processinställningarna under de genomförda försöksleden.

Tabell 4: Försöksleden och respektive processinställningar.

Driftlängd	Slamflöde (ton/h)	Svepgasflöde (m ³ /h)
11/4 – 14/4	7,28	180
14/4 – 17/4	7,28	0
9/5 – 13/5	7,28	220
13/5 – 15/5	7,28	260

5.4.1 EL

Under driftperioder loggades driften för varje maskin i uppgraderingsprocessen. Effekten för maskinerna under de aktuella driftparametrarna undersöktes enligt tabell 5 och multiplicerades med drifttiden för att ge energianvändningen. Den sammanlagda elförbrukningen för anrikningsanläggningen avlästes från PLC:n.

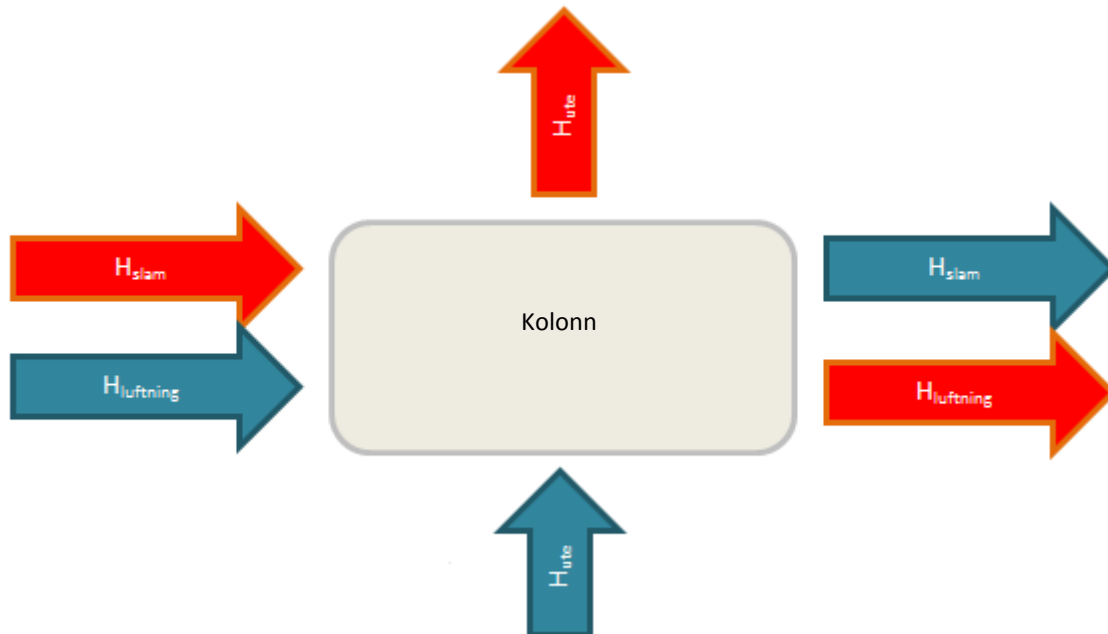
Tabell 5: mätmetoder för de elektriska komponenterna.

Komponent	Mätmetod	Loggning
P 1	Tångamperemeter	Effekten vid drift registrerades vid mätningen. Loggfiler på den totala drifttiden användes för att ta fram energiförbrukningen.
P 2	Tångamperemeter	Effekten vid drift registrerades vid mätningen. Loggfiler på den totala drifttiden användes för att ta fram energiförbrukningen.
Blåsmaskin	Oscilloskop i programvaran som styr blåsmaskinen	Effekten vid olika svepgasflöden registrerades för olika slamhöjder i kolonnen.
Total elförbrukning anrikningsanläggning	Automatisk loggning	PLC loggar elförbrukningen för anläggningen och lägger ut den på en hemsida.

Effekterna hos pumparna och blåsmaskinen undersöktes vid olika driftförutsättningar. Beroende av driftparametrarna på anläggningen togs sedan de relevanta loggfilerna fram och användes för att beräkna elförbrukningen

5.4.2 VÄRME

Systemet som studerades visas i figur 7:



Figur 7: Systemgränserna för värmekartläggningen.

Värmeförbrukningen ges av massflöden, temperaturer och specifika värmekapaciteter för slam och gaser. Skillnaden i värme mellan två flöden av olika temperatur ges av:

$$\Delta H = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (1)$$

Där ΔH är effekt (W), \dot{m} är massflöde (kg/s), C_p (kJ/kg*K) är specifik värmekapacitet för mediet (3,99 antaget för rötslam) och ΔT är temperaturskillnaden (K).

Värme avges även från ytor i systemet enligt:

$$P = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{x} \quad (2)$$

Där λ är en materialkonstant som anger värmeledningsförmågan (W/mK), A är arean (m^2), ΔT är temperaturskillnaden mellan insidan och utsidan på väggen (K) och x är väggens tjocklek (m) (Alvarez 2006).

Svepgasen ger värmeförluster enligt:

$$W_{ut} = H_{ut} - H_{in} \quad (3)$$

Där W_{ut} är effekten i kW, H_{ut} är värmeflödet ut i kW, och H_{in} är värmeflödet in i kW.

$$H_{ut} = h_{luft,ut} * \dot{m}_{tot,ut} \quad (4)$$

Där $h_{luft,ut}$ är den specifika entalpin för luften ut ur kolonnen i kJ/kg, $\dot{m}_{tot,ut}$ är massflödet ut ur kolonnen i kg/h och som i sin tur ges av:

$$\dot{m}_{tot,ut} = \dot{m}_{vatten} + \dot{m}_{luft,ut} = \dot{m}_{luft,in} * x_{ut} - \dot{m}_{luft,in} * x_{in} \quad (5)$$

Där \dot{m}_{vatten} är massflödet av vatten i kg/h, $\dot{m}_{luft,ut}$ är massflödet av luft ut ur kolonnen i kg/h, $\dot{m}_{luft,in}$ är massflödet av luft in i kolonnen i kg/h, x_{ut} är luftfuktigheten i luften ut ur kolonnen i kg/kg och x_{in} är luftfuktigheten in i kolonnen i kg/kg.

Slutligen är:

$$H_{in} = h_{luft,in} * \dot{m}_{luft,in} \quad (6)$$

Där $h_{luft,in}$ är den specifika entalpin för luften in i kolonnen.

De komponenter vars värmeförluster undersöktes presenteras i tabell 6. Där anges även hur mätningarna genomfördes.

Tabell 6: de komponenter som undersöktes för värmekartläggningen.

Komponent	Mätmetod
Total värmeförlust kolonn	Temperaturlogger
Värmeförluster av svepgas	Temperaturlogger, aspirationspsykrometer, termometer
Värmeförluster av ytor i kolonn	Temperaturlogger, värmekamera
Utomhustemperatur	Temperaturlogger

5.4.2.1 SLAMFLÖDEN

Slamflödena undersöktes för att ge underlag för hur mycket värme som cirkulerar genom kolonnen. P1 kördes med en bestämd gångtid under en viss tid. P2 var vid försöket avstängd. Slamhöjden mättes kontinuerligt under tiden och gav nivåökningen per tidsenhet. Volymen i kolonnen var känd sedan tidigare och gav ett värde för slamflödet som m³/h.

Slamflödet för P2 uppmättes genom att börvärdet för slamhöjden sänktes under den befintliga nivån. Med P1 avstängd pumpade P2 ut slam ur kolonnen för att nå den nya slamhöjden. Gångtiden för P2 samt nivå-sänkningen i kolonnen registrerades och användes för att beräkna slamflödet för P2.

5.4.2.2 VERIFIERINGAR

Temperaturgivarna i systemet som presenterades i figur 5 verifierades för att säkerställa deras noggrannhet. Dessa verifieringar skedde under besök på anläggningen då nya förutsättningar för driften var i bruk. Givarna verifierades genom att slamprover från provplats 7 i figur 6 togs i en 10 L-hink och testades med en termometer. Värmen jämfördes sedan med de värden som den aktuella loggern visade på styrsystemet.

Fukthalten i den utgående svepgasen samt dess temperatur mättes från punkt 4 i figur 6 och gav data till de beräkningar som låg till grunden för undersökningen av svepgasförlusterna.

5.4.2.3 TOTAL VÄRMEFÖRLUST I KOLONNEN

Den sammanlagda värmen som avgår när slammet passerar kolonnen beräknades med hjälp av data om slamflödet samt temperaturerna enligt ekvation 1. Loggfiler för temperaturerna in i och ut ur kolonnen importerades till Excel. Värmeflödet som avgick i kolonnen under tidsperioder med kontinuerlig drift registrerades. Samtidigt loggades utomhustemperaturen och användes för att ge sambandet mellan utomhustemperatur och avgiven energi i kolonnen.

5.4.2.4 VÄRMEFÖRLUSTER AV SVEPGAS OCH YTOR I KOLONNEN

En del av värmeförlusten i kolonnen var en följd av svepgasflödet. Den förhållandevis kalla och torra luften som bubblades igenom kolonnen värmdes upp och blev fuktig innan den avgick. Varm och fuktig luft innehåller mer energi än kall och torr. Storleken på denna värmeförlust undersöktes genom att jämföra den totala värmeförlusten för kolonnen med blåsmaskinen både avstängd och påslagen. Efter att stabil drift uppnåtts med luftning stängdes blåsmaskinen av. Därefter kördes slammet igenom kolonnen utan luftning tills värmejämvikt hade uppnåtts. Temperaturloggfilerna gav därefter total värmeförlust då luftningen var igång såväl som värmeförlust genom ytorna i kolonnen. Svepgasförlusterna erhöles som differensen mellan dessa två. Försöken med de respektive gasflödena genomfördes enligt tabell 4.

5.4.3 KARTLÄGGNING AV FÖRLUSTER MED VÄRMEKAMERA

Med en värmekamera av märket FLIR undersöktes ytor som misstänktes avge förhållandevis mycket värme. Ytor som nyligen utsatts för stark sol fotograferades inte då de resultaten inte är representativa. Punkter som var av intresse var slangarna till och från röt-kammaren, väggarna i kolonnen, samt schaktet i taket på röt-kammaren.

5.5 FÖRSÖK AMMONIAKABSORPTION

På JTI drivs en mindre biogasanläggning med processintern metananrikning med möjligheter att utföra försök i liten skala. Den fungerar enligt samma principer som Sötåsens anläggning men i mindre skala. Piloten drivs med svepgasflöden från 1 - 6 m³/h vilket kan jämföras med de 200 - 300 m³/h som körs vid Sötåsen

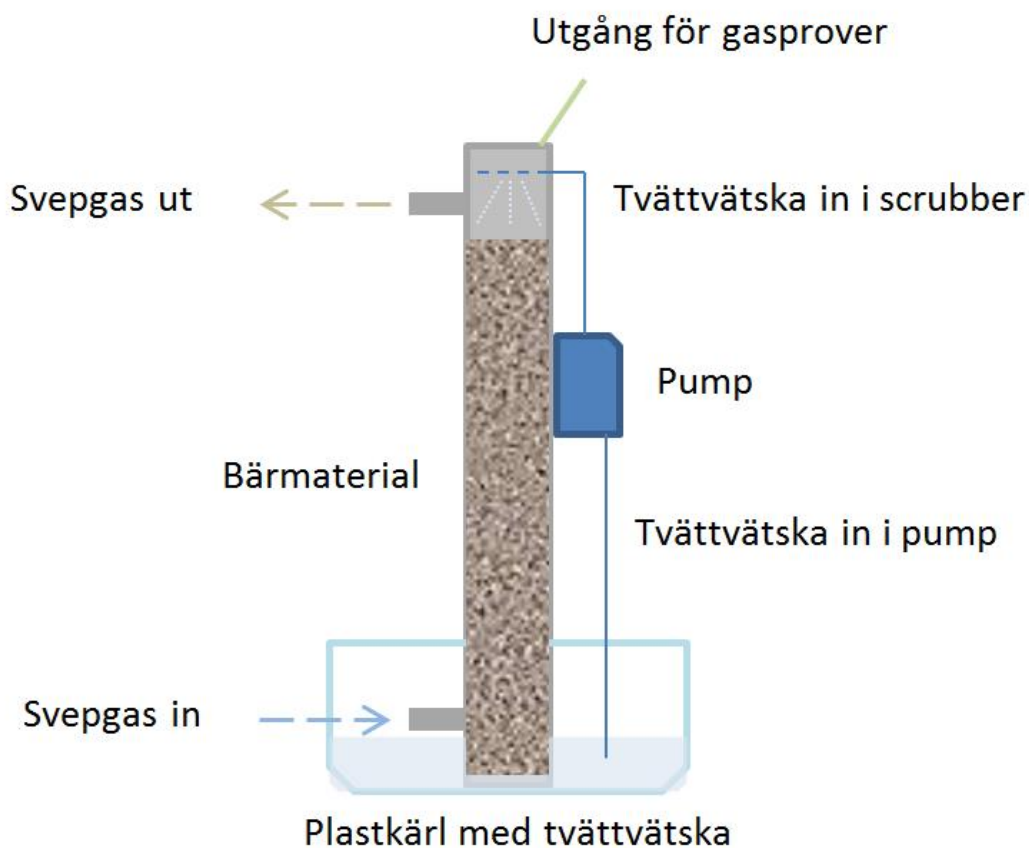
5.5.1 DIMENSIONERING

Förberedande försök för att utreda ammoniakabsorption på Sötåsen genomfördes genom att konstruera en skrubberprototyp. Principen var densamme som beskrivs i avsnitt 4.4. Melse m.fl. (2005) har sammanställt olika skrubberkonstruktioner och dess parametrar för olika flöden, tvättvätskor och ammoniakhalter. Utifrån förutsättningarna på JTI:s pilotanläggning dimensionerades en tänkbar skrubber med de storskaliga som förebilder. Tabell 7 redovisar designparametrarna för skrubbern.

Tabell 7: Designkraven för skrubbern på JTI:s pilotanläggning och de slutliga designparametrarna.

Designkrav	Värde
Höjd	> 1 m
EBRT	> 1 s
Tänkt gasflöde	1 - 6 m ³ /h
pH	4 - 7
Bärmaterial	Lecakulor
Slutlig konstruktion	Värde
Höjd	1,02 m
Radie	0,0762 m
Total volym	4,7 l
Aktiv volym	3,5 l
Maximal EBRT (för 1 m ³ /h gasflöde)	12,6 s
Minimal EBRT (för 6 m ³ /h gasflöde)	2,1 s

Ett järnrör av passande storlek valdes som grundkonstruktion för skrubbern. Den fylldes med lecakulor. En pump monterades på sidan av röret och en slang leddes in i toppen av röret där slangens skårades och tvinnades till en ögla. In- och utlopp för svepgasen svetsades på toppen respektive botten av röret. Toppen av röret tätades provisoriskt för att tillåta modifiering under försökets gång. Ett litet förslutningsbart rör monterades på för provtagningar. Botten av röret täcktes med ett finmaskigt nät som lät gas och vätska passera men höll lecakulorna på plats. Konstruktionen presenteras i figur 8:



Figur 8: Översiktlig skiss över skrubbern.

Pumpen som användes var ställbar från 0 - 100 % av det maximala varvtalet vilket gjorde att flödet gick att variera från 0 - 150 ml/minut.

5.5.2 TVÄTTVÄTSKA

Den vanligaste syran för ammoniakabsorption är svavelsyra. Då försöket var tänkt som en mindre version av en möjlig framtida skrubber på Sötåsen valdes istället *Promyr XR 680*. Det är en syrablandning bestående av myrsyra, propionsyra och natriumformiat med pH 2,4. Motiveringen bakom detta val var att denna syrablandning redan används av gården för ensilering och således köps med jämna mellanrum. Den är dessutom inte korrosiv för metall, lättare att hantera än svavelsyra och godkänd för ekologiska gårdar (Perstorp).

5.5.3 SKRUBBERFÖRSÖK

De två första försöken genomfördes med neutralt vatten som tvättvätska. De två nästkommande försöken genomfördes med syra tillsatt. Dessa fyra försök gav en uppfattning om dynamiken hos systemet beroende på tvättvätskans pH. Förutsättningarna för de tre första försöken kan läsas i bilaga 1. Det sista försöket genomfördes med lärdomar från försök 1 -3. Följande ingångsvärden valdes:

- Tvättvätska - 400 ml Promyr XR 680-lösning
- pH - 5
- Svepgasflöde 4 m³/h
- Pumpflöde - 140 ml/min

Under försökets gång tillsattes upprepade gånger syra för att återfå effektiviteten hos absorptionen. Den tillsatta mängden noterades. Dessutom minskades pumpflödet till 84 ml/min under en tvättcykel för att

därefter höjas till 110 ml/min. Efter samtliga försök togs prover på tvättvätskan som förvarades i ett kylskåp. Provet från försök 1 och försök 4 analyserades för ammonium.

5.5.4 ANALYSER

Analyserna som genomfördes under ammoniakabsorptionsförsöken presenteras i tabell 8.

Tabell 8: Lista över de mätningar och analysmetoder som ingick vid försöken.

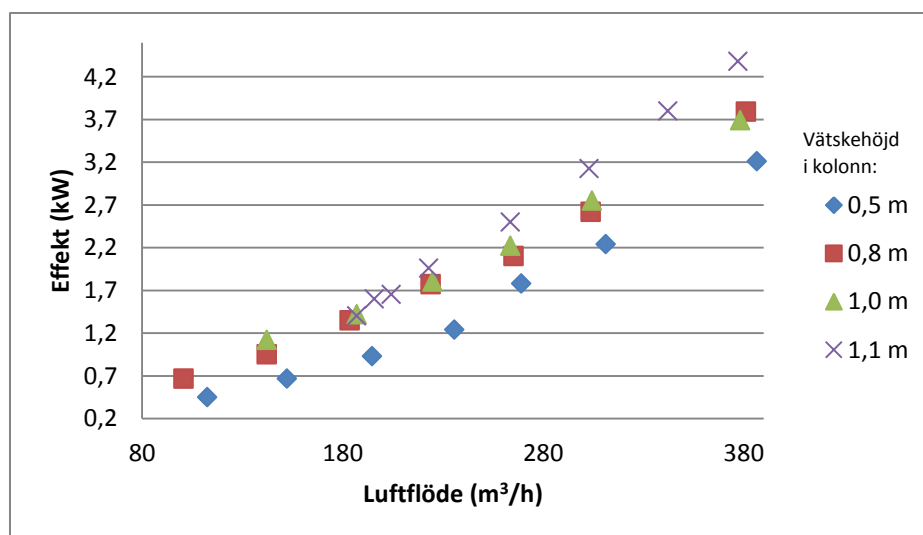
Metod	Analys	Notering
pH-meter med temperatursensor	pH och temperatur på tvättvätska.	Kalibrerades med standardvätskor av pH 4 och 7.
Reagensrör från Kitagawa	Ammoniakkoncentration i svepgas.	Mätområden: 0 – 100 ppm och 50 – 900 ppm.
Svensk Standard SIS 02 813 4. Bestämning av ammoniumnitrogen-koncentration hos vatten	Ammoniumkvävekoncentration i tvättvätskan.	

6 RESULTAT

6.1 ENERGIKARTLÄGGNING

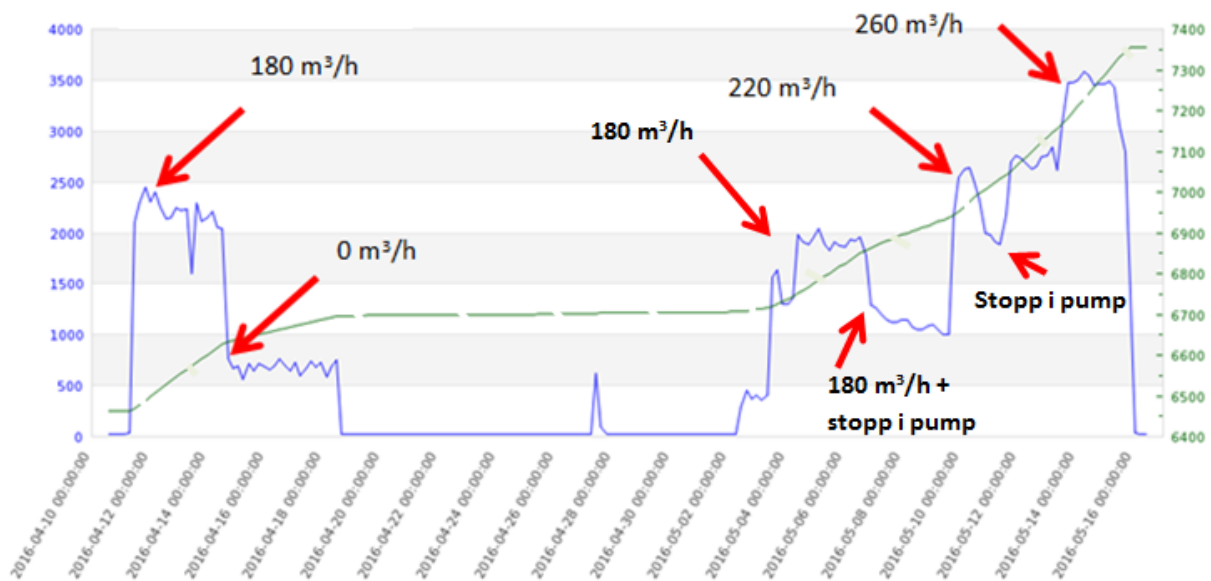
6.1.1 ELFÖRBRUKNING

Tidigare projekt (Andersson m.fl. 2014) har visat att luftningen är den avgörande komponenten för hur stort elbehovet blir för processintern metanrikning. Därför mättes blåsmaskinens elförbrukning upp för olika luftflöden och slamhöjder i kolonnen. Resultatet redovisas i figur 9:



Figur 9: Förhållandena mellan effekt och gasflöde för blåsmaskinen vid olika vätskehöjder i kolonnen.

Elförbrukningen under mätseriernas gång baserades på loggdata från anläggningen och presenteras i figur 10. Dalarna i elförbrukningen förklaras av driftstörningarna där pumpningen stannade eller blåsmaskinen stängdes av som illustreras i figur 12 i avsnitt 6.2. På grund av en icke fungerande nivågivare i kolonnen ökade vätskehöjden mot de senare mätserierna för svepgasflödena 220 och 260 m³/h. Börvärdet för vätskehöjden var dock satt till 1 m och höll 0,8 m under de två första mätserierna.



Figur 10: Effekt (kW, heldragen linje) och kumulativ elförbrukning (kWh, streckad linje) för anläggningen med markeringar för de olika mätserierna. Inhämtad från www.el.sotasen.se.

För samma tidsperioder beräknades medeleffekten för respektive komponent. Den baserades på den uppmätta drifteffekten och loggfilerna från pumparna och presenteras i tabell 9. Effekten från blåsmaskinen togs från de manuella mätningarna i figur 9. Med enbart slampumpning överensstämde de loggade totalvärdena från systemet bra med de uppmätta. När luftning var igång indikerade den automatiska loggningen en något högre effekt än den uppmätta, vilket visas i tabell 10. Detta indikerar att effekten på blåsmaskinen är mer oförutsägbart än pumpningen. Detta kan möjligtvis till viss del förklaras av att slanhöjden i kolonnen varierade under försökens gång.

Tabell 9: Uppmätt effekt med tångamperemeter för slampumparna samt den beräknade medeleffekten under mätperioderna.

	P1	P2
Uppmätt effekt med tångamperemeter (kW)	2,65	1,48
Drifttid (min/h)	4	19,3
Medeleffekt (kW)	0,18	0,47

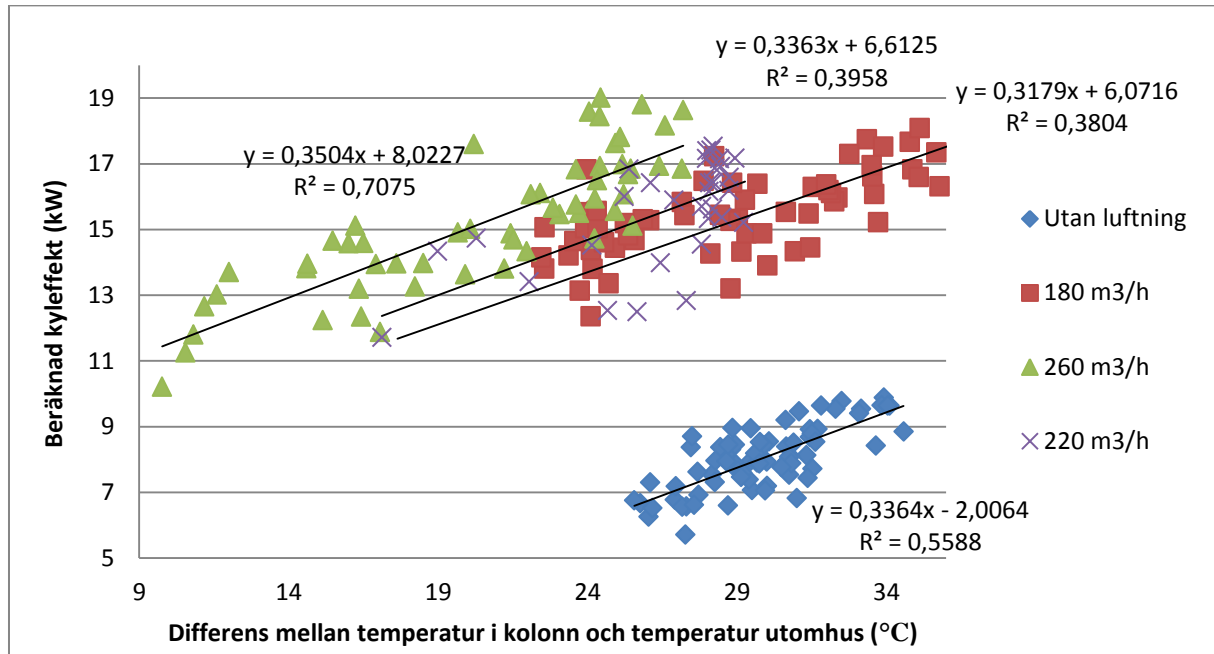
Tabell 10: Den totala effekten som beräknades och den totala effekten som erhöles ur loggfilerna.

Svepgasflöde	0 m ³ /h	180 m ³ /h	220 m ³ /h	260 m ³ /h
Blåsmaskin (kW)	0	1,35	1,96	2,5
Total beräknad effekt pumpar + blåsmaskin (kW)	0,65 (effekt slampumpning)	2,0	2,6	3,2
Total loggad effekt (kW)	0,6 (effekt slampumpning)	2,1	2,6	3,4

6.1.2 PROCESSVÄRME

Perioderna för de fyra mätserierna med olika svepgasflöden visas i bilaga 2. Generellt kylde rötkammaren av anrikningsprocessen. Kyleffekten av processintern metananrikning påverkades av hur stort luftflödet var genom kolonnen. Under de fyra mätserierna med olika svepgasflöden övervakades värmeförlusterna och

resultaten redovisas i figur 11. Dessa data baserades på loggade temperaturer som finnes i bilaga 2, multiplicerat med flödet och Cp för rötslam enligt ekvation 1. Minst värme avgick när pumpningen kördes utan luftning, därefter ökade värmeförlusterna i takt med luftningen. Figur 11 illustrerar hur stor del av värmeåtgången som var en följd av enbart slamflödet utan luftning, dvs. väggförluster och hur de totala förlusterna ökade ju mer svepgas som passerar kolonnen. Det bör noteras att trendlinjen för väggförlusterna inte skär origo vilket diskuteras i analysdelen.



Figur 11: Den avgivna värmen som funktion av temperaturskillnaden utomhus och i kolonnen.

6.1.3 BILDER FRÅN VÄRMEKAMERA

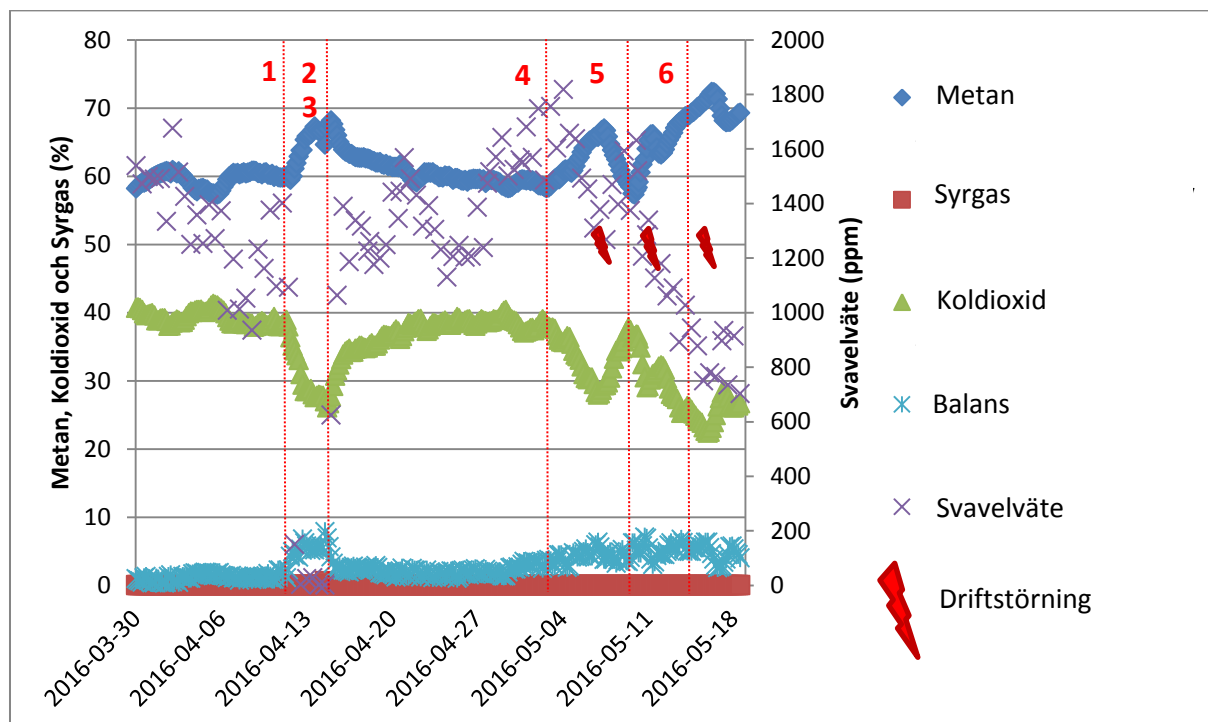
Värmekameran visade ytor som avgav förhållandevis mycket värme. Några rymde inte inom systemgränserna för detta projekt (taket på röt-kammaren, slangarna till och från röt-kammaren och P1). De två viktigaste var gaveln på kolonnen samt utloppet för svepgas. En tredje köldbrygga av intresse var ett område på kolonnväggen vars insida var fastsvetsad med gaveln (se bilaga 3).

6.2 UPPFÖLJNING AV ANRIKNINGSPROCESSEN

I figur 12 redovisas mätdata för metan, koldioxid, syrgas och svavelväte för mätserierna som genomfördes i period 2 och 3 (under tiden 29 mars till 15 maj). Vidare redovisas även en term som kallas balans vilken utgör det som saknas från att uppmätta gaser skall summera till hundra procent. Denna restterm antas främst bestå av kvävgas som kommer in i processen under luftningen (Andersson m.fl. 2014). Driftsproblemen under mätserierna utgjordes av igensättning av pumpar. Dessa visas även i bilaga 2 för processvärmen. I tabell 11 beskrivs driften för de olika mätserierna.

Tabell 11: Beskrivning av de numrerade linjerna och deras respektive åtgärder i figur 12.

Åtgärd	Händelse	Resultat
1 (2016-04-11)	180 m ³ /h luftning påslagen	Metankoncentrationen ökade. Svavelvätekoncentrationen minskade.
2 och 3 (2016-04-13)	Luftning avslagen. Kvävgasavskiljningstank installerad	Koldioxidkoncentrationen minskade. Metankoncentrationen ökade initialt något samtidigt som balansen minskade. Därefter minskade metankoncentrationen. Svavelvätekoncentrationen ökade. Kvävgaskoncentrationen minskade troligtvis som följd av den avslagna luftningen.
4 (2016-05-02)	180 m ³ /h luftning påslagen, därefter ökad till 220 m ³ /h	Metankoncentrationen ökade. Svavelvätekoncentrationen minskade. En pump satte igen, processen avslutades.
5 (2016-05-09)	Pumpning igång	Metankoncentrationen ökade. Svavelvätekoncentrationen minskade. Pump 1 satte igen och försöket avbröts.
6 (2016-05-13)	260 m ³ /h luftning påslagen	Metankoncentrationen ökade. Svavelvätekoncentrationen minskade. Vid en metankoncentration av 71 % avslutades försöket som en följd av värmesänkningen i rötchammaren.



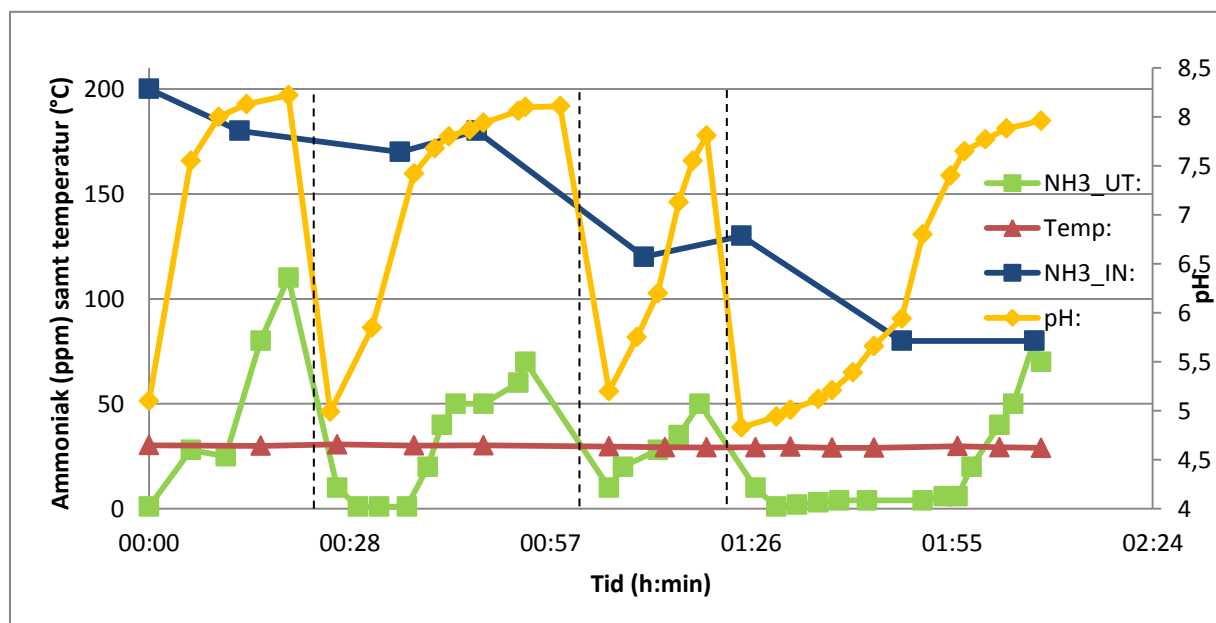
Figur 12: Halterna av metan, syre, koldioxid och svavelväten samt driftstörningar under mätperioderna.

Förutom automatiskt loggad gasdata genomfördes även kontrollmätningar med andra instrument. För svavelväte och metan överensstämde dessa bra. För koldioxid indikerades dock att de loggade värdena var något låga, ca 2 % - enheter för mätningen utförd den 13 maj och 1 % - enhet den 18 maj (se bilaga 4). Detta betyder att balansen troligtvis är lägre än vad som indikeras i figur 12. I bilaga 4 presenteras de manuella mätningarna som utfördes på svepgasen och analyserna av pH och alkalinitet. Sammanfattat tycks pH öka något under luftningen som en följd av den bortdrivna koldioxiden. Alkaliniteten verkar i stort sett förbli oförändrad, även om en nedgång möjligtvis kan anas efter luftningen. Under försökens gång sjönk rötkammarens temperatur, dels på grund av tekniska problem vid biogasanläggningen och dels som en trolig följd av kolonnens värmeförluster. Svepgasen innehöll svavelväten och ammoniak för de olika drifterna enligt bilaga 4.

Den maximala metanhalten som uppnåddes var ca 71 %, efter den längsta kontinuerliga driften under försöksperioden på en knapp vecka. Metanhalten tycktes dock fortfarande följa en uppåtgående trend vid avbrottet. Det bör poängteras att försöken ej var designade för att uppnå högsta möjliga metanhalt utan det främsta syftet var att verka som underlag för energikartläggningen samt ge orienterande processresultat. Vidare bedöms stabilitet för processen före, under och efter luftningen inte ha uppnåtts

6.3 AMMONIAKABSORPTION

Under arbetets gång genomfördes fyra försök där parametrarna ändrades mellan omgångarna. Resultatet från det fjärde försöket visas i figur 13. Där illustreras hur lösligheten av ammoniak i tvättvätskan påverkades av pH. Värt att notera är att en svag syrablandning användes vilket innebär att förmågan att motstå en pH-ökning var avsevärt sämre än om en stark syra hade använts. När pH översteg ca 6 försämrades reningen av svepgasen markant och vid ca pH 8 var den på väg att försvinna. För pH under 6 renades gasen från ca 95 - 99 % av dess ursprungliga halt av ammoniak. Vid dessa nivåer var ammoniakhalten efter skrubbern ibland för låg för att kunna avläsas med vald mätmetod (1 ppm upplösning).



Figur 13: Grafen visar hur NH₃ in i och ut ur skrubbern samt pH och temperatur varierade med tiden. När en streckad linje korsar två mätpunkter betyder det att pH i tvättvätskan har justerats ned under tiden mellan de två mätpunkterna.

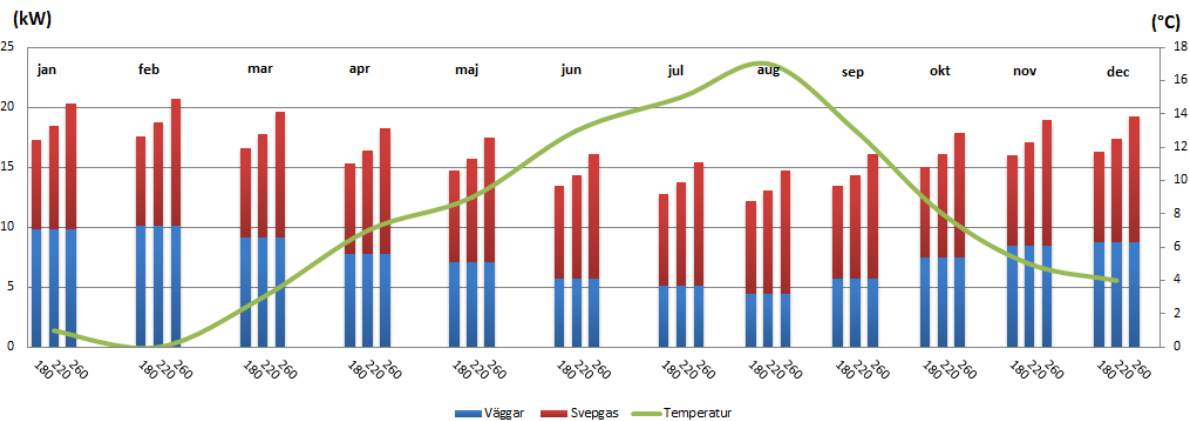
Sammanlagt 3 ml Promyr XR 680 tillsattes under försöket. En ammoniumanalys av tvättvätskan visade att den hade löst 2,95 g ammonium/l vätska. Vätskans volym på 400 ml gav en total mängd absorberad ammoniak av 1,18 g. Det hade således tillsatts 2,38 ml Promyr XR 680 för varje gram löst ammonium.

Efter försöken var skrubbern på vissa ställen fläckig av salter. Tvättvätskan blev varm vid försöken.

7 ANALYS OCH DISKUSSION

7.1 ENERGIKARTLÄGGNING

Processvärmen som krävs för att hålla anläggningen i drift under ett helt år togs fram med hjälp av resultaten för värmeförluster som funktion av $T_{kolonn} - T_{utomhus}$ och svepgasflöde som redovisades i figur 11. Trendlinjerna för de olika svepgasflödena extrapolerades och deras respektive ekvationer användes därefter tillsammans med medeltemperaturen för varje månad i Töreboda under 2015 för att ge värmeförlusterna månadsvis enligt figur 14.



Figur 14: För varje månad presenteras värmeförbrukningen för svepgasflödena 180, 220 och 260 m³/h i kW. Utomhustemperaturerna ges av kurvan i °C och baserades på SMHI:s data för Töreboda år 2015.

Av särskilt intresse är de minsta samt största möjliga förlusterna under året. För ett svepgasflöde av 180 m³/h i augusti avgår 12,1 kW, eller 254 kWh/dygn. I februari ger ett svepgasflöde av 260 m³/h upphov till värmeförluster av 20,6 kW, eller 495 kWh/dygn. Vidare bör det nämnas att väggförlusterna proportionellt ökar med kalla utomhustemperaturer. Idag har anläggningen möjlighet att leverera ca 400 kWh/dygn uppvärmning till rötchammaren. En siffra av intresse är att det krävs 258 kWh för att värma 8 ton flytgödsel från 8 till 37 °C (vilket motsvarar en typisk tillförsel av flytgödsel från brunnen till rötchammaren per dag).

För att verifiera resultaten ovan genomfördes beräkningar för svepgasförlusterna för varje gasflöde med sin respektive funktion (som visas i figur 11). Dessa beräkningar, som är resultat av empiriskt framtagna funktioner, jämfördes därefter med teoretiska svepgasförluster enligt ekvation 3 och presenteras i tabell 12. Förlusterna avvek som högst 7 %.

Tabell 12: Uppmätta samt teoretiska värmeförluster för en utomhustemperatur av 9 °C. För de teoretiska beräkningarna antogs en relativ luftfuktighet av 40 % utomhus.

	kW (uppmätt)	kW (teoretiskt uträknat)
Värmeförlust genom väggar	6,7	
Svepgasförlust 180 m ³ /h	7,6	7,1
Svepgasförlust 220 m ³ /h	8,6	8,7
Svepgasförlust 260 m ³ /h	10,4	10,3

Den värmebaserade anrikningseffektiviteten för drift i februari beräknades till $7,6 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ avdriven koldioxid (jämföres med den elektriska motsvarigheten av ca $1 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ avdriven koldioxid). Denna siffra leder tillsammans med det totala värmebehovet per dygn till att åtgärder måste vidtas för att minska förlusterna. Under vintern producerar anläggningen motsvarande ca $1200 \text{ kWh}/\text{dygn}$. Värmebehovet hos kolonnen på $495 \text{ kWh}/\text{dygn}$ adderat med värmeförlusterna i rötkammaren och uppvärmningen av flytgödseln leder till en för stor andel värmeförluster i förhållande till den producerade värmen.

Kolonnen är utformad med en icke isolerad gavel för att möjliggöra övervakning av slamhöjd, förenkla provtagningar samt ge möjlighet till om och tillbyggnation under projektet. Där avgår värme i stora mängder. Den varma svepgasen lämnar dessutom kolonnen utan någon sorts värmeåtervinning. Med februari månads medeltemperatur som utgångspunkt föreslogs i tabell 13 åtgärder för att minska nedkylningen av kolonnen.

Tabell 13: Värmeförlusterna för februari samt möjliga åtgärder för att minska dem.

	Väggförluster (kW)	Svepgasförluster (kW)
Nuvarande värde:	9,7	10,9
Åtgärd:	Isolering med 0,15 m cellplast för varje yta på kolonnen (inklusive den icke isolerade gaveln).	Värmeåtervinning genom värmväxling mot den inkommande flytgödseln. En värmepump som kyler tvättvätskan i skrubbern och avger värme till gödseln.
Potentiellt värde:	0,341 ($8,18 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{dygn}$)	5,45 (för 50 % verkningsgrad, $131 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{dygn}$)

Tänkvärt är att väggförlusterna vid de kallaste förhållandena är ungefär lika stora som svepgasförlusterna. Dessutom kräver värmeåtervinning på svepgasen troligtvis en större kapitalkostnad än förbättrad isolering. Beräkningarna indikerar att det efter åtgärder borde räcka med den nuvarande kapaciteten för uppvärmning av $400 \text{ kWh}/\text{dygn}$. Effektiviteten efter vidtagna åtgärder beräknades till $2,3 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ avdriven koldioxid.

Det faktum att trendlinjen för väggförlusterna inte utgick från origo kan bero på mätfel hos någon av temperaturgivarna. En möjlig konsekvens av detta är att dess förluster kan vara upp till 2 kW större än vad som angivits utifrån försöken då skärningen på y-axeln sker vid -2.

7.2 UPPFÖLJNING AV ANRIKNINGSPROCESSEN

Mätningarna visade att en viss mängd svavelväten avgick med svepgasen. Biogasanalyserna visade också en nedgång av svavelvätehalterna varje gång luftningen var i drift. Det går dock inte att utifrån detta dra slutsatser om allt motsvarande svavelväte drivits bort med svepgasen. Svavelvätena kan även ha oxiderat. En beräkning baserad på mätvärden kan ge en fingervisning om vilket som gäller:

Biogasproduktionen utan luftning antas vara $8 \text{ m}^3/\text{h}$ med en svavelvätehalt av 1500 ppm. Därefter sätts ett svepgasflöde på $220 \text{ m}^3/\text{h}$ igång som får en svavelvätehalt av 10 ppm. Biogasproduktionen blir då $7,2 \text{ m}^3/\text{h}$ som följd av den minskade mängden koldioxid, och innehåller nu 800 ppm svavelväten. Värdena i tabell 14 erhålls:

Tabell 14: Teoretisk kontroll av hur mycket svavelväten som drivs bort med svepgasen jämfört med den totala mängden som försvinner.

Försvunnen mängd svavelväten i biogasen:	Bortdriven mängd svavelväten med svepgasen:	Andel som luftas bort:
$0,006 \text{ m}^3/\text{h}$	$0,002 \text{ m}^3/\text{h}$	33 %

Processen kördes för kort tid för att ovanstående beräkningar ska kunna ligga till grund för säkra påståenden. De indikerar dock att den minskade mängden svavelväten i biogasen berodde mer av oxidering än att de drevs bort med svepgasen.

Sammantaget tycktes inte processen påverkas nämnvärt vad gäller pH och alkalinitet av anrikningen. Den faktor som begränsade biogasproduktionen verkade istället vara att värmen i rötammaren sjönk, med andra ord var värmebalansen den viktigaste frågan. Detta bör inte vara något som är specifikt för Sötåsens anrikningsanläggning. En värmeeffektiv anläggning är fördelaktig ur processmässig såväl som ekonomisk synpunkt. Den totala metanproduktionen minskade när luftningen sattes igång vilket antydde en instabil biogasprocess som stördes av anrikningen (se bilaga 5). Försöken var dock inte i drift länge nog för att dra generella slutsatser om hur anrikningen inverkar på biogasprocessen. Mätvärden från processuppföljningen användes dock för att beräkna hur effektivt koldioxid drevs bort (se resultaten för energikartläggningen). Dessa värden ska därför betraktas som riktvärden. Den maximala anrikningsgraden såväl som metanslipet går inte heller att avgöra utifrån dessa mätperioder. Mängden kvävgas var baserat på manuella mätningar av koldioxid mindre än den mängd som visades i figur 12.

7.3 AMMONIAKABSORPTION

Pilotförsöken indikerade att det går att rena svepgasen från ammoniak med hjälp av en skrubber vars tvättvätska innehåller Promyr XR 680. Då flödena på Sötåsen är betydligt större än de på pilotanläggningen måste en eventuell skrubber på Sötåsen byggas i större skala. Data för åtgången av syra från pilotförsöken användes tillsammans med dimensioner på storskaliga skrubberkonstruktioner (Melse m.fl. 2005) för att ge förslag på en framtida skrubber på Sötåsen. Flödena baserades på resultat från processuppföljningen och antaganden om driftparametrar. Höjden på skrubbern bestämdes till ca en meter då resultaten förväntas vara skalbara med pilotförsöken. I tabell 15 presenteras den potentiella skrubbern.

Tabell 15: Designparametrar för en tänkt skrubber på Sötåsen.

Parameter	Värde	Notering
Svepgasflöde	150 – 370 m ³ /h	370 m ³ /h är nära det maximala gasflödet för slamhöjder över 1 m.
Ammoniakhalt	100 – 200 ppm	200 ppm var den vanligast uppmätta halten under provtagningsfasen.
Minsta tillåtna EBRT	1 s	
Höjd	1,2 m	
Aktiv volym	0,100 m ³	Ger EBRT = 1 s för 370 m ³ /h svepgasflöde.
Diameter	0,36 m	
Höjd aktiv volym	1,0 m	Dessa dimensioner lämnar 0,2 m för in- och utlopp av svepgasen i skrubbern.
Total volym	0,122 m ³	
Bärmaterial	BIO-BLOK [®] 80 HD G Lecakulor	80 m ² /m ³ (http://www.expo-net.dk/English/Products/Wastewater%20Treatment/3-%20Aquaculture/3-2-1-%20Fishfarm%20Water.aspx) 300 m ² /m ³
Vätskeflöde	315 – 735 l/h	

Den teoretiska mängden ammoniak som kan absorberas under ett år på Sötåsen för olika flöden och ammoniak-koncentrationer beräknades såväl som den nödvändiga volymen Promyr XR 680. En skrubbereffektivitet på 80 % har antagits för fallen som presenteras i tabell 16.

Tabell 16: Teoretisk mängd ammoniak som drivs av med svepgasen på Sötåsens biogasanläggning.

Svepgasflöde:	150 m³/h	350 m³/h
Ammoniakkoncentration:	100 ppm	200 ppm
Avdriven ammoniak/år	94,6 kg	442 kg
Löst ammonium/år	76 kg	353 kg
Promyr XR 680/år	180 l	840 l
Absorberat kväve/år	59 kg	275 kg

Tabell 16 visar vad som antas vara extremfallen under ett år, den minsta möjliga ammoniakavdrivningen samt den största. Verkligheten är möjligtvis någonstans mittemellan. Resultaten indikerar att det räcker med en 1000 l-dunk vilket är den vanliga leveransformen av ensileringsmedlet.

Sötåsen köpte under 2016 in ca 53 ton ekogödsel för ca 2,25 kr/kg med viktprocent av ca 9 % kväve. Med andra ord köptes ca 4,77 ton rent kväve till ett pris av ca 10 700 kr. Som mest kan kvävebehovet tillgodoses till ca 6 % med hjälp av ammoniakskrubber för ett värde av ca 620 kr. Om det absorberade kvävet säljs kan det inbringa ca 2 750 kr (då ett säljpris på 10 kr/kg antagits). Enkom gödselvärdet motiverar inte en ammoniakskrubber. Däremot bör effekterna från utsläppen av ammoniak på övergödning och lokal miljö även vägas in.

En erfarenhet från pilotförsöken är att spridningen av vätskan över bärmaterialet inte var optimal med en skårad slangögla. För en skrubber på Sötåsen bör en dysa med god spridningsförmåga användas istället. Detta kan troligtvis sänka det nu föreslagna vätskeflödet. Dessutom behövs det fler försök för att designa en acceptabel skrubber i full skala, och det bör finnas potential att effektivisera den beroende på materialval, tvättvätska och storlek.

Tvättvätskan kommer även att värmas av svepgasen vilket gör att skrubberna kommer fungera som en värmeväxlare. Detta kan ge möjlighet till värmeåtervinning från svepgasen om skrubberna konstrueras för detta. Om vätskan tillåts värmas upp utan någon åtgärd försämras effektiviteten hos absorptionen.

8 SLUTSATSER

- Värmeförbrukningen är i nuläget den viktigaste frågan för anläggningen. Beräkningar baserade på energikartläggningen visar att processintern metananrikning använder 495 kWh/dygn under årets kallaste månad. Denna siffra kan jämföras med att anläggningen i uppvärmningssyfte kan leverera ca 400 kWh/dygn till processen idag, samt att det krävs ca 258 kWh/dygn för att värma det flytgödsel som matas in i rötammaren.
- Baserat på svepgasanalyserna samt energikartläggningen drivs anläggningen under de sämsta förhållandena med en värmemässig effektivitet av 7,6 kWh_{th}/m³ avdriven koldioxid och en elektrisk effektivitet av ca 1 kWh_{el}/m³ avdriven koldioxid. Med andra ord kan störst besparingsåtgärder göras på värmesidan. Effektiviteten efter bättre isolering och värmeåtervinning på svepgasen bedöms bli 2,3 kWh_{th}/m³ avdriven koldioxid.
- Värmeförlusterna kan vara större än vad försöken indikerade då trendlinjen för väggförlusterna inte går genom origo.
- Svavelvätehalten i biogasen minskade med ungefär hälften när anrikningsprocessen var igång, troligtvis till störst del som följd av oxidering.
- Processen var instabil och förlorade metanproduktion vid luftning. Körningarna var för korta för att kunna ge underlag för några slutsatser om anrikningens påverkan på biogasprocessen.
- En ammoniakskrubber med en volym av 122 l kan användas för att absorbera ca 59 – 275 kg kväve per år. Ur ett växtnäringssperspektiv är det knappast värt det för Sötåsen baserat på deras årliga näringsbehov. Det finns dock miljömässiga värden med skrubberna att ta i beaktande. En skrubber kan

dessutom utformas som en del i värmeåtervinning, där den exempelvis agerar värmesänka åt en värmepump som värmer slammet.

För fortsatta studier föreslås längre drifter för att utvärdera hur anrikningsprocessen påverkar biogasproduktionen. Värmeförlusterna bör åtgärdas innan driften startar igen, förslagsvis med mer isolering då det är den billigaste och enklaste åtgärden som bör ge en stor påverkan. Värdet av att installera en skrubber bör utvärderas utifrån det ekologiska värdet snarare än det ekonomiska. Dessutom bör utförligare tester genomföras för ammoniakabsorption vad gäller starka syror och andra bärmaterial.

9 REFERENSER

Alvarez, H. (2006). *Energiteknik*. Henrik Alvarez och Studentlitteratur.

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, M. (2011). *Energikartläggning vid biogasanläggningen, Kungsängens gård*. SLU, institutionen för energi och teknik, Uppsala.

Carlsson, M., Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Rapport SGC 200, Svenskt Gastekniskt Centrum AB

COLASIT Scandinavia AB. *Kort introduktion till skrubberteknologi Absorption av gaser ur luft med hjälp av tvättvätska*.

Harrysson, J., Bahr, H. (2015). *Produktion och användning av rötresten år 2014*. Energimyndigheten, Energigas Sverige.

Hayes, T.D., Isaacson, H.R., Pfeffer, J. T., Liu, Y. M. (1990). *In Situ Methane Enrichment in Anaerobic Digestion*. Gas Research Institute, 8600 W Bryn Mawr Ave., Chicago, Illinois 6063 1
University of Illinois, Department of Civil Engineering, Urbana, Illinois 61810

Hårsmar, D. (2014). *Energianvändning på gårdsbiogasanläggningar*. Hushållningssällskapets förbund.

Lide, D. (2003). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th Edition

Melse, R. W., Ogink, N. W. M. (2005). *Air Scrubbing Techniques for Ammonia and Odor Reduction at Livestock Operations: Review of On-Farm Research in the Netherlands*. Wageningen University and Research Centre

Moore, P., Maguire, R., Reiter, M., Ogejo, J., Burns, R., Li, H., Miles, D., Buser, M. (2013). *Development of an Acid Scrubber for Reducing Ammonia Emissions from Animal Rearing Facilities*. USDA/ARS, USDA/NRCS, National Wildlife Foundation.

Naturvårdsverket (2016). *Andra växthusgaser*. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Darfor-blir-det-varmare/Andra-vaxthusgaser/> (besökt 162004)

Nordberg, Å., Edström, M., Uusi-Pentillä, M., Rasmuson, Å. (2012). *Selective desorption of carbon dioxide from sewage sludge for in-situ methane enrichment: Enrichment experiments in pilot scale*. Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences. Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering (JTI). Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology (KTH). Department of Chemical and Environmental Sciences, Materials and Surface Science Institute, University of Limerick.

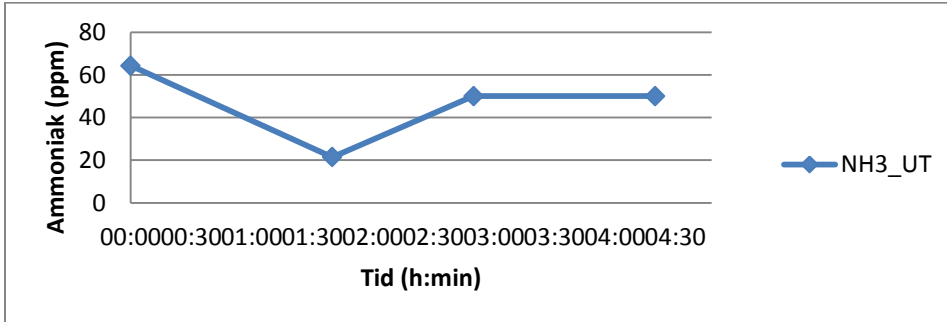
- Nordberg, Å., Edström, M., Uusi-Pentillä, M., Rasmuson, Å. (2005). *Processintern metananrikning*. Rapport 33, Kretslopp & Avfall. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala
- Olsson, H. (2015). *Beskrivning styrning processintern Sötåsen*. Internt dokument, Kretslopp & Avfall. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala
- Perstorp. XR 680. Produktblad ensileringsmedel.
- Pettersson, A., Wellinge, A. (2009). *Biogas upgrading technologies – developments and innovations*. IEA Bioenergy
- Pettersson, G. (2006). *Kemisk miljövetenskap*. 6:e upplagan.
- Pohland, F. G. (1969). *High-Rate Digestion Control II. Techniques for Evaluating Acid-Base Equilibrium*. Proc. 19th Inter. Waste. Conf., Purdue Univ, 353-365
- Pohland, F.G., Bloodgood, D.E. (1963). *Laboratory studies on mesophilic and thermophilic anaerobic sludge digestion*. J. Water Pollut. Control Fed. 35:11.
- Salomon, E., Wivstad, M. (2013). *Rötrest från biogasanläggningar - återföring av växtnäring i ekologisk produktion*. SLU, EPOK – Centrum för ekologisk produktion och konsumtion
- Yngvesson, J., Persson, E., Fransson, M., Olsson, O., Henriksson, G., Björkmalm, J. (2013). *Energi- och kostnadseffektiv biogasproduktion från avfall - kartläggning och jämförande av nyckeltal*. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
- Yu, Z., Rasmuson, Å., Brown, N., Ascue, J., Hansson, M., Nordberg, Å. (2009). *In-situ methane enrichment in anaerobic digestion of sewage sludge*. Department of Chemical Engineering and Technology - KTH, JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik
- Zhao, C. (2011). *Effect of Temperature on Biogas Production in Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater UASB System in Hammarby*. Sjöstadverket TRITA LWR Degree Project11:35

10 BILAGOR

BILAGA 1

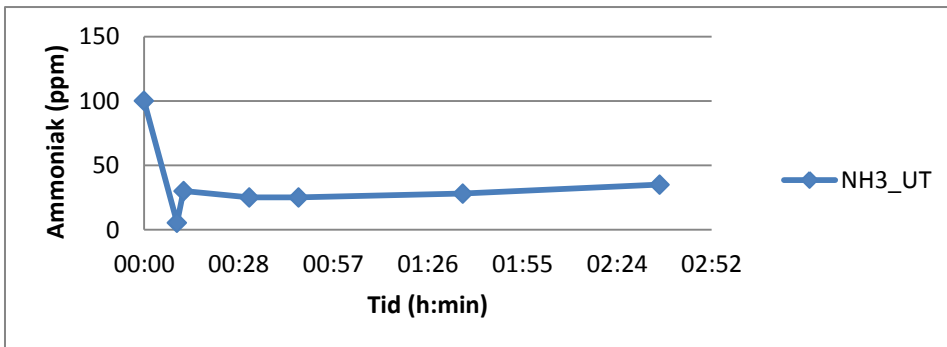
Skrubberförsök 1 - 3

Försök 1:



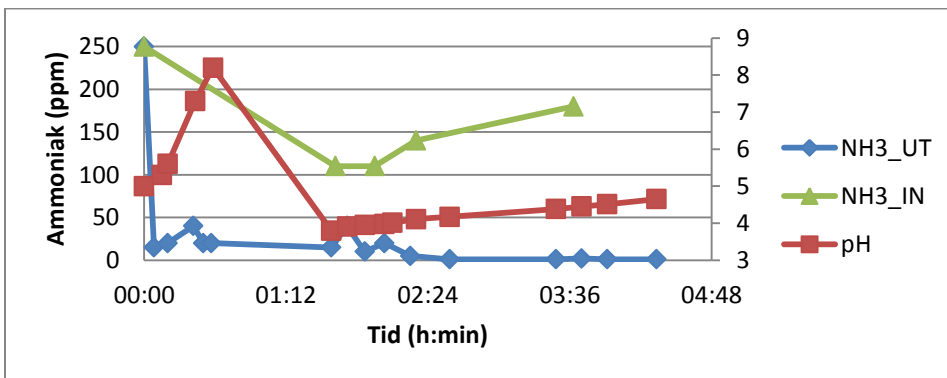
Det inledande försöket genomfördes med följande förutsättningar: tvättvätska - 0,5 l vatten, svepgasflöde - 1 m³/h, temp - 29,9 °C, pumpflöde - 27 ml/min.

Försök 2:



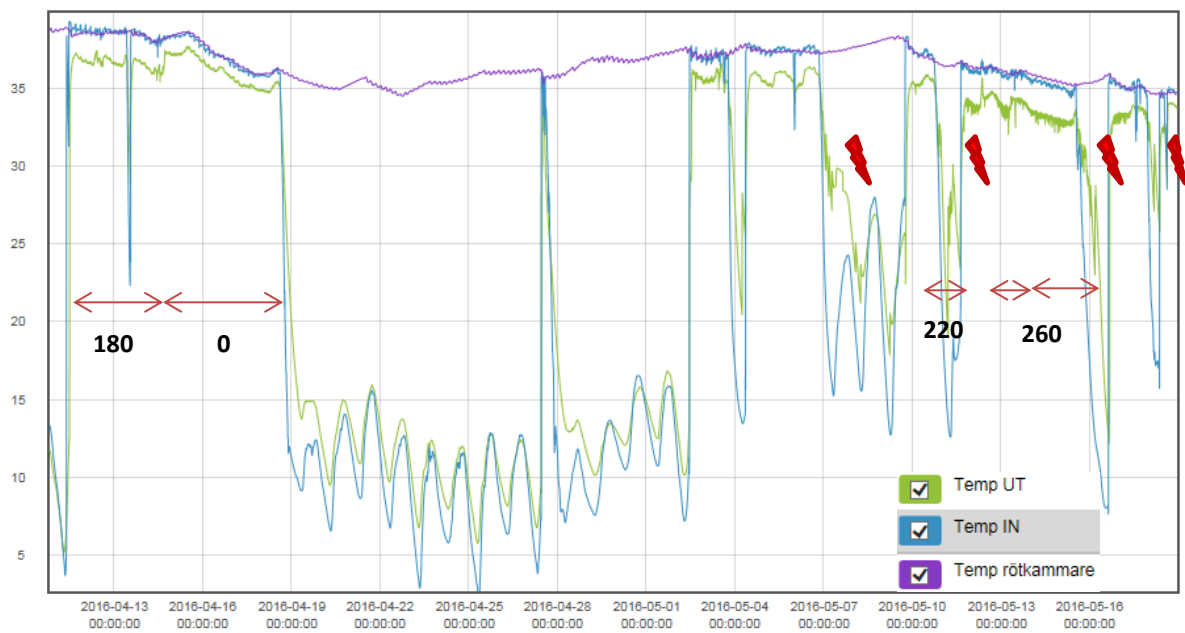
I det andra försöket ändrades parametrarna till: tvättvätska - 1 l vatten, svepgasflöde - 2m³/h, Temp - 28,3 °C, pumpflöde - 27 ml/min.

Försök 3:



Denna gång användes: tvättvätska - 370 ml myrsyralösning, pH - 5,1, svepgasflöde - 5 m³/h, pumpflöde - 100 ml/min.

BILAGA 2

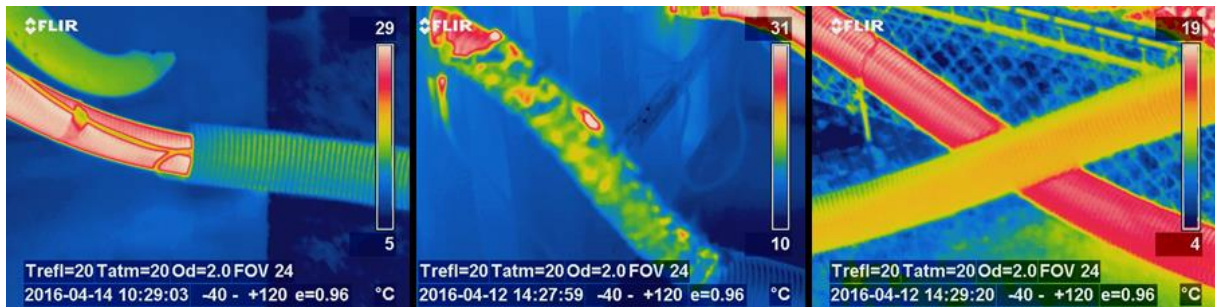


Temperaturen in, ut ur samt inne i rötchammaren under försöksperioden. De fyra driftinställningarna är utmarkerade såväl som driftstopp till följd av igensättning av pumparna (illustreras med röda blixtar). När luftningen sattes igång tappade rötchammaren värme. Skillnaden i värmeförluster när ingen luftning genomförs jämfört med 180 m³/h luftning syns tydligt som differensen mellan Temp IN och Temp UT under perioden 13 – 16 maj.

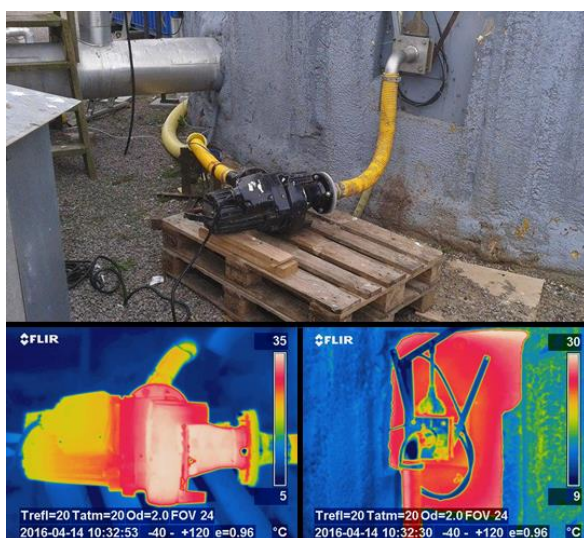
Bilaga 3



Bilden visar en köldbrygga som kommer av en svetsad balk på insidan. Balken är en del av gaveln i förmaket som används för övervakning av slamhöjd och provtagningar.



Tre bilder av slangarna som transporterar slammet. I den första syns skillnaden mellan den bara slangen och det yttre plasthöljet på den icke isolerade "IN-slangen". Nästa bild visar glasfiberisoleringen och dess övergång till det yttre plasthöljet på "UT-slangen". Den tredje bilden visar skillnaden i avgiven värme mellan de två slangarna.



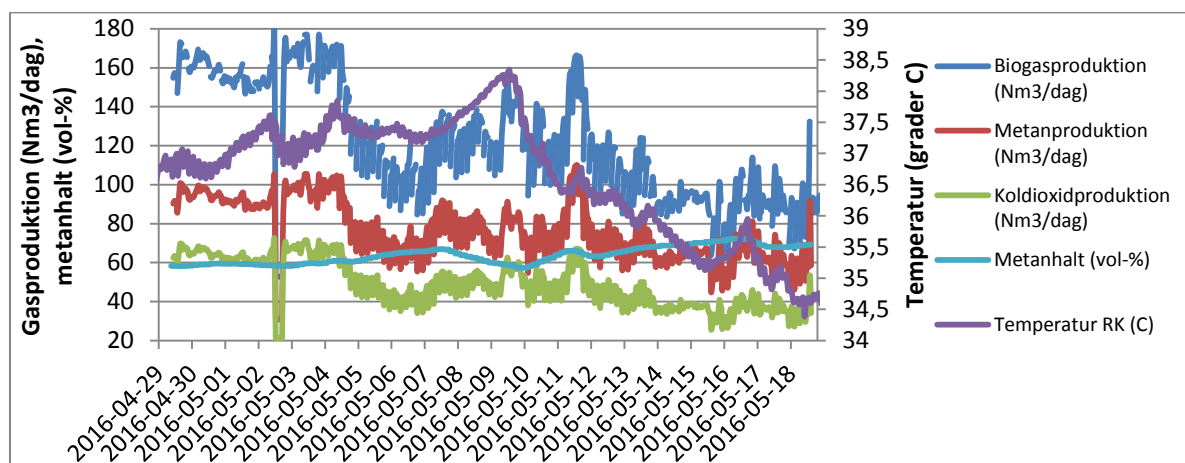
Utloppet från rökammaren till P1. Värme avges från den icke isolerade plåten som utloppet är monterat på.

BILAGA 4

Resultat från pH- och alkalinitetsanalyser samt gasanalyser genomförda med Kitagawarör, GC-analys eller Biogas 5000.

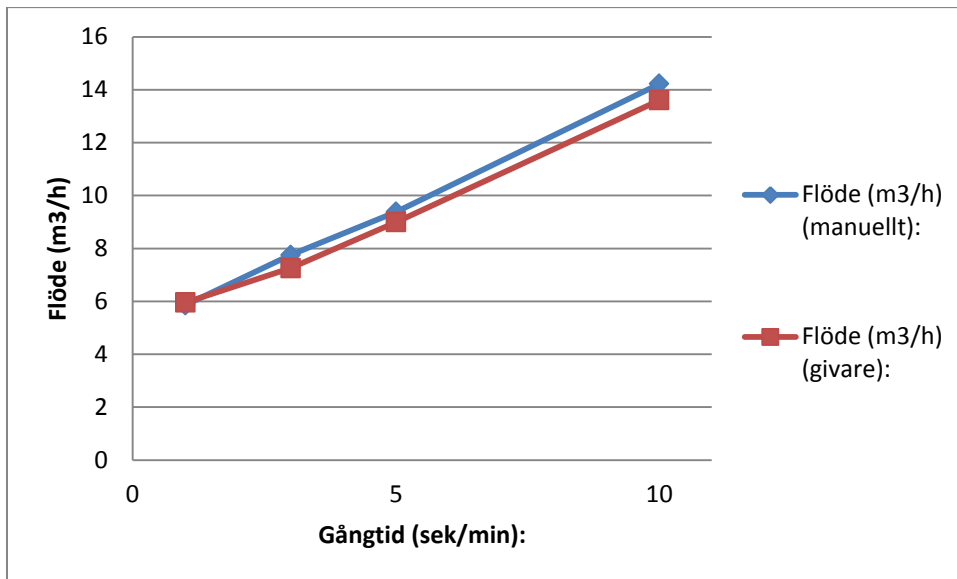
Tid:	Drift:	Resultat:
12/04/2016 16:04:59	180 m ³ /h luftning	CO ₂ svepgas: 1,25 % NH ₃ svepgas: 200 ppm H ₂ S svepgas: 20 ppm pH RK: 7,72 pH kolonn: 8,06
14/04/2016 14:46:50	Som ovan	CO ₂ svepgas: 1,15 % NH ₃ svepgas: 190 ppm H ₂ S svepgas: 15 ppm pH RK: 7,74
27/04/2016 15:47:16	Ingen luftning	pH RK: 7,63
03/05/2016 15:47:15	Ingen luftning	pH RK: 7,61 alkalinitet RK: 15527 CaCO ₃ /l
13/05/2016 14:57:28	220 m ³ /h luftning	CO ₂ svepgas: 1,05 % NH ₃ svepgas: 210 ppm H ₂ S svepgas: 10 ppm CH ₄ svepgas: 0,071 % (GC) CO ₂ biogas: 30 % pH RK: 7,82 alkalinitet RK: 15536 CaCO ₃ /l pH kolonn: 8,18 alkalinitet kolonn: 15130 CaCO ₃ /l
18/05/2016 13:26:09	260 m ³ /h luftning. Efter ett driftstopp.	CO ₂ svepgas: 1,10 % CH ₄ svepgas: 0,015 % (GC) NH ₃ svepgas: 220 ppm H ₂ S svepgas: 0 ppm CO ₂ biogas: 27,5 % (Biogas5000) pH RK: 7,72 alkalinitet RK: 15368 CaCO ₃ /l pH kolonn: 8,27 alkalinitet kolonn: 15345 CaCO ₃ /l

BILAGA 5



Gasproduktion och gassammansättning samt röttemperatur som funktion av tiden.

Bilaga 6



Pumpflödet uppmätt för de olika gångtidsinställningarna. Flödena togs fram genom att mäta volymökningen av slam i kolonnen då P1 gick med P2 avstängd. Den blå linjen baseras på uppmätta vätskehöjd med tumstock och den röda linjen baseras på loggad vätskehöjd från nivågivaren i kolonnen.

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