

# Optimal processtemperatur vid mesofil samrötningsprocess



Henrik Nilsson

---

Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik  
Institutionen för kemiteknik, LTH  
Examensarbete 2016

# Optimal processtemperatur vid mesofil samrötningsprocess

av

**Henrik Nilsson**

Examensarbete nummer: 2016-03

Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik  
Institutionen för kemiteknik  
Lunds Universitet

Juni 2016

Handledare: **Åsa Davidsson**  
Biträdande handledare: **Irene Bohn**  
Examinator: **Ola Wallberg**

---

**Postadress**

Box 124  
221 00 Lund, Sweden

**Webadress**

[www.vateknik.lth.se](http://www.vateknik.lth.se)

**Besöksadress**

Naturvetarvägen 16

**Telefon**

+46 46-222 82 85

+46 46-222 00 00

**Fax**

+46 46-222 45 26



# Förord

Detta examensarbete har utförts hos OX2 Bio Produktion AB i samarbete med Miljöbron och VA-teknik på Institutionen för Kemiteknik, LTH under vinter, vår och början till sommarväder år 2016 (januari-maj).

Samarbetet som Miljöbron möjliggjorde, genom att föra student och företaget samman, har varit mycket utvecklande och givande. OX2 Bio Produktion och dess anställda har med sin kunskap utformat examensarbetet på bästa sätt och alltid varit tillgängliga för frågor och problem. Speciellt stort tack ska riktas till Irene Bohn som med sin expertis alltid kan svara på diverse frågor inom biogas och alltid är engagerad både vad gäller forskning men även problemlösning. Även handledare Åsa Davidsson ska ges ett stort tack för sin ständigt öppna dörr och möjlighet till dialog. Ett tredje stort tack ska riktas till Gertrud Persson som genomfört analyser av specifika fria fettsyror och möjliggjort fina resultat. Gertruds kontor förvandlades snabbt till en möteslokal för studenter när helst tillfälle gavs. Helena Ensegård är den fjärde personen som ska ha ett stort tack dels för förmedlingen av examensarbete men även för viktig hjälp med korrekturläsning. Som femte och sista person ska även Lars Nilsson, min pappa, ha ett stort tack som med sitt långt gående kunnande hjälpt till att kritiskt granska såväl resultat som rapport.

I och med detta examensarbete avslutas härmed mina studier vid Lunds Tekniska Högskola och jag passar på att även skänka en tanke åt alla vänner som jag lärt känna och sprungit förbi på vägen.



# Abstract

The purpose of this master thesis has been to investigate how a change in process temperature can affect the stability and production of biogas.

The plant which is operated and administrated by OX2 Bio Produktion AB located in Helsingborg produces biogas from primarily household food waste and waste from food industry. An ideal temperature to produce biogas at the plant is 37 °C but there is a fluctuation throughout the year depending on season. During summer the process temperature within the anaerobic digesters can rise close to 42 °C. How this can affect the production of biogas and process stability was investigated and evaluated in this master thesis.

Main focus throughout the work has been to investigate the different temperatures 37 °C, 39 °C, 44 °C and 49 °C in terms of amount produced biogas, concentration of free fatty acids, concentration of ammonium, pH, temperature, dry matter content and the gas composition. Initially four reactors of 4.5 liters each were operated for 103 days. A start-up period during day 1-34 and a temperature change period during day 35-49 led up to the intended temperatures. At intended temperatures the reactors were operated during day 50-103. To evaluate if it was viable to raise the temperature from an energy perspective calculations were made for this purpose. These calculations were made to investigate if more energy in form of methane could be produced than needed to heat the process to a higher temperature.

During start-up it was shown that the reactors produced equivalent amount of biogas during equivalent conditions. After the temperature change the microorganisms in reactors with a larger temperature change were most affected. This resulted in reduced amount of produced biogas. The concentrations of free fatty acids also increased in those reactors with a major temperature change. At intended temperatures only three of the initial four reactors were used because one reactor which was intended to have a temperature of 49 °C cracked at day 52. As the microorganisms customized to the new condition it was shown that a higher amount of biogas was produced at 44 °C compared to lower temperatures. Concentrations of free fatty acids were initially increased but decreased as the microorganisms had adapted. Concentration of free fatty acids remained higher in the reactor with higher temperature throughout the experiment. Concentration of ammonium was slightly higher for a higher temperature. The fact that the microorganisms produced higher amounts of biogas at higher temperature indicates that the concentrations of ammonium did not cause inhibition. pH was stable throughout the entire experiment for all reactors. pH-values was slightly higher at higher temperatures.

Energy calculations showed that more energy was produced in the form of methane at higher temperature than needed to raise the temperature to the higher temperature. This means that it is energetically beneficial to produce biogas at a higher temperature.

A variation in temperature is not favorable for the microorganisms since it contributes to instability. It furthermore leads to lower amount of produced biogas and higher concentrations of free fatty acids since the microorganisms is not effective enough during the transition phase to decompose all substrate that is added to the reactor. At 44 °C the seasonal variations in reactor temperature would be eliminated. Taken together results from this master thesis show that it would be favorable to produce biogas at 44 °C compared to 37 °C.



# Sammanfattning

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka hur en förändring av processtemperatur kan påverka processtabilitet och produktion av biogas hos OX2.

Anläggningen som drivs och förvaltas av OX2 Bio Produktion AB i Helsingborg producerar biogas från främst matavfall från hushåll och från livsmedelsindustrin. Idealt produceras biogas i anläggningen vid 37 °C men under året finns en variation i temperatur till följd av årstiderna. Under sommaren stiger temperaturen i rötkamrarna och kan då närma sig 42 °C. Hur detta påverkar biogasproduktionen och dess stabilitet har undersökts i detta examensarbete.

Fokus låg på att undersöka rötning vid de olika temperaturerna 37 °C, 39 °C, 44 °C och 49 °C med avseende på mängd producerad biogas, koncentrationen fria fettsyror, koncentrationen ammonium, pH, temperatur, torrsubstanshalt samt gasens sammansättning. Reaktorerna var initialt fyra stycken om 4,5 liter vardera som totalt drevs under 103 dagar. En uppstartsperiod under dag 1-34 och en temperaturförändringsperiod under dag 35-49 ledde till de avsedda temperaturerna. Vid avsedda temperaturer drevs sedan tre reaktorer under dag 50-103. För att utvärdera om det var lönsamt att höja temperaturen rent energimässigt gjordes energiberäkningar för att visa om mer energi fås ut i form av metangas än vad som krävs för att värma till högre temperatur.

Under uppstarten visades att reaktorerna vid likvärdiga förhållanden producerade likvärdigt med biogas. Vid temperaturförändring påverkades mikroorganismerna mest i de reaktorer där temperaturförändringen var störst. Detta ledde främst till minskad mängd producerad biogas och även att koncentrationen fria fettsyror ökade. Vid avsedda temperaturer användes endast tre av de fyra reaktorerna eftersom reaktorn vid 49 °C sprack under dag 52. Allt eftersom mikroorganismerna anpassade sig till sin nya förutsättning visades att det producerades mer biogas vid 44 °C jämfört med de lägre temperaturerna. Initialt ökade koncentrationen av fettsyror för reaktor vid 44 °C men avtog sedan allt eftersom mikroorganismerna anpassade sig. Koncentrationen fria fettsyror förblev högre under hela försöket för den högre temperaturen. Koncentrationen ammonium var något högre för den högre temperaturen. Att mikroorganismerna producerade mer biogas vid högre temperatur visar på att ammoniumkoncentrationen inte var sådan att den var inhiberande för mikroorganismerna. pH var stabilt under hela försöket för alla reaktorer.

Energiberäkningarna visade att det produceras mer energi i form av metangas vid högre temperatur än vad som behövs för att värma till en högre temperatur. Detta innebar att det är energimässigt gynnsamt att producera biogas vid en högre temperatur.

En variation i temperatur är inte gynnsamt för mikroorganismerna eftersom det bidrar till instabilitet. Det leder till mindre mängd biogas och större andel fria fettsyror som följd av att mikroorganismerna under anpassningsfasen inte är tillräckligt effektiva för att bryta ner allt substrat som tillförs. Genom att använda sig av 44 °C i rötkamrarna skulle problemet med variation i temperatur under året inte vara något problem. Sammantaget kan de konkluderas, baserat på resultaten från detta examensarbete, att det skulle vara mer lönsamt att producera biogas vid 44 °C jämfört med 37 °C.





# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte.....	1
1.2	Genomförande.....	2
2	Litteraturstudie.....	3
2.1	Biogasframställning.....	3
2.2	Anaerob nedbrytning av organiskt material.....	4
2.3	Processparametrar.....	7
3	Material och metod.....	13
3.1	Uppstart.....	13
3.2	Kontinuerligt försök.....	15
3.3	Substrat.....	15
3.4	VFA-analys.....	17
3.5	Ammoniumanalys.....	17
3.6	pH.....	18
3.7	Temperatur.....	18
3.8	Mätning av biogasens sammansättning.....	18
4	Resultat och diskussion.....	19
4.1	Uppstart, dag 1-14.....	19
4.2	Pumpning av substrat, dag 15-29.....	20
4.3	Manuell matning, dag 30-34.....	22
4.4	Temperaturändring, dag 35-49.....	22
4.5	Försök vid avsedda temperaturer, dag 50-103.....	24
5	Slutsatser.....	37
6	Förslag på förbättringar och vidare forskning.....	39
7	Litteraturförteckning.....	41
8	Appendix.....	43
8.1	Appendix A.....	43
9	Populärvetenskaplig sammanfattning.....	49



# 1 Inledning

Biogas bildas då organiskt material bryts ner med hjälp av mikroorganismer utan att de har tillgång till syre, så kallad anaerob nedbrytning också kallad anaerob rötning. Denna process är komplex och kräver samarbete mellan flera olika mikroorganismer då den involverar nedbrytning av substratet i flera steg. Biogas bildas vid rötning av organiskt material i en röt-kammare där temperaturen traditionellt sett är antingen 35-40°C (mesofilt) eller 50-55°C (termofilt). Huvudbeståndsdelarna i biogas är metan (normalt 60-70 %) och koldioxid samt små mängder av svavelväte och vattenånga. Gasens sammansättning kan variera beroende på processparametrar och val av substrat. I Sverige finns ungefär 277 olika anläggningar som producerar biogas (Harrysson, 2015). Av de 277 biogasanläggningarna som Energimyndigheten identifierat år 2014 använde sig 191 anläggningar av mesofil temperatur vid rötning, 23 anläggningar termofil temperatur och på 63 anläggningar var detta inte tillämpligt eftersom de producerar biogas på annat sätt än genom rötning av organiskt material. Efter det att biogasen bildats kan den antingen användas direkt eller gå vidare till en uppgraderingsanläggning där gasen renas och metanhalten kan höjas till 98 % eller högre och därmed användas som fordonsbränsle. Huvudanvändningsområdena för biogas är idag värme, el, fordonsbränsle och industriell användning (Harrysson, 2015).

Biogasanläggningen i Helsingborg ägs av NSR (Nordvästra Skånes Renhållnings AB) och drivs av OX2 AB. Företaget utvecklar, bygger, finansierar och förvaltar anläggningar för förnybar energi främst i norra Europa och har varit verksamma inom bioenergi sedan år 2012. Anläggningen har en kapacitet att producera omkring 80 GWh rågas samt 120 000 ton biogödsel per år. Anläggningens årsproduktion av biogas motsvarar omkring 8 miljoner liter bensin. Anläggningen byggdes i mitten av 1990-talet av NSR och sågs då som en investering för att vara med och bidra till en bättre miljö. Anläggningen har sedan dess byggts ut och uppgraderats. Den senaste stora utbyggnaden skedde år 2014 då anläggningens kapacitet fördubblades.

Under produktionen av biogas finns det under året en variation av temperatur i röt-kamrarna som företaget inte har undersökt vad de har för specifik effekt på biogasproduktionen. Röt-kamrarna har idag inget kylsystem för att sänka temperaturen vilket innebär att temperaturen kan öka till över de önskvärda 37 °C under sommaren. Att få tillgång till denna information kan bidra till att optimera biogasproduktionen vid anläggningen (OX2, 2016). Temperaturen i processen påverkar hur väl mikroorganismerna kan bryta ner och omvandla substratet som tillförs till biogas. Mikroorganismerna är i processen hos OX2 vana att arbeta vid 37 °C och därför skulle det kunna vara ett problem om temperaturen höjs. En höjning av temperaturen skulle kunna innebära att mikroorganismerna bli ineffektiva och i värsta fall dör ut.

## 1.1 Syfte

Examensarbetet syftar till att undersöka hur förändringar i processtemperatur i röt-kammaren kan påverka processtabilitet och produktion av biogas hos OX2 i Helsingborg. Som del av företagets forskning och utveckling kommer under detta examensarbete olika processtemperaturer att studeras i laboratorieskala för att undersöka om en temperaturökning har någon effekt på biogasproduktionen och därmed möjliggöra en eventuell optimering av processen. Genom att studera processtabilitet, metanproduktion, energiförbrukning och utvärdera de olika aspekterna kan en optimal temperatur fastställas.

## 1.2 Genomförande

För att undersöka olika temperaturer vid rötning användes fyra reaktorer (4,5 liter) som kördes vid de fyra olika temperaturerna 37°C, 39°C, 44°C och 49°C. Här studerades löpande parametrarna temperatur, pH, fria fettsyror (VFA), ammonium (NH<sub>4</sub>-N), torrsustanshalt (TS) och gasens sammansättning.

En litteraturstudie gjordes för att ta del av tidigare forskning som gjorts med hänsyn till processtemperaturer. Litteraturstudien fokuserade på hur olika parametrar kan påverka biogasproduktionen samt hur nedbrytningen av organiskt material går till. Sökord som användes för att genomföra litteraturstudien var främst *biogas production*, *temperature*, *anaerobic digestion temperature*. Mycket material var även tillhandahållet av handledarna för examensarbetet i form av kurslitteratur och artiklar.

För att beräkna om det är gynnsamt att hålla en högre temperatur än vad som idag görs i röt-kamrarna hos OX2 beräknades hur mycket energi som skulle behöva tillsättas dels befintlig process och dels idealt jämfört med teoretiska 37°C.

## 2 Litteraturstudie

I företagets rötchkammare är temperaturen idealt 37°C men under sommarmånaderna finns inte kapacitet till att kyla rötchkamrarna tillräckligt utan temperaturen kan närma sig 42°C. Som del i företagets forskning och utveckling kommer under detta examensarbete olika processtemperaturer att undersökas för att se om denna temperaturökning har någon effekt på biogasproduktionen och därmed ge uppslag till optimering av processen genom att studera processtabilitet, metanproduktion, energiförbrukning och utvärdera de olika aspekterna kan en optimal temperatur fastställas.

Rötchkamrarna på anläggningen har en uppehållstid på 25-30 dagar vilket innebär att massan i rötchkamrarna är helt utbytt efter 25-30 dagar. Substratet som används i anläggningen hade under år 2015 sammansättningen som visas i tabell 2.1 nedan.

Tabell 2.1 Tabell över andelen av olika råvaror som substrat till OX2s rötchkamrar. Data är givet för tidsperioden januari - december år 2015.

Ingående råvaror	Andel i vikt-% Jan-Dec 2015
Livsmedelsindustrins processlam	9
Potatisskal + övriga rotfrukter (skalade)	14
Livsmedelsindustrin, restprodukter	21
Matavfall från hushåll, grönsaker, pressat från matförpackning	35
Gödsel	9
Slaktavfall	11
Fett från fettavskiljare (restaurang, livsmedelsindustrin)	1

Till substratet som pumpas in i anläggningen tillsätts ett processhjälpmedel som innehåller väteklorid (HCl 1,5–2,5 %), järn(III)klorid (FeCl<sub>3</sub> 15–20 %), järn(II)klorid (FeCl<sub>2</sub> 6–7,5 %) samt låga koncentrationer av spårämnen (kobolt, nickel, volfram och selen).

### 2.1 Biogasframställning

Biogas bildas när mikroorganismer bryter ner organiskt material i en syrefri miljö, så kallad anaerob miljö. I en biogasprocess deltar flera olika mikroorganismer vilket gör processen till en invecklad och komplex process som leder till att föreningar såsom fetter, protein och kolhydrater bryts ner och bildar framförallt gasformig koldioxid och metan. Denna nedbrytning sker i naturen i anaeroba miljöer så som sumpmarker och risfält (Jarvis & Schnürer, 2009). Beskrivningen som följer nedan av biogasframställningens olika fysiska steg är en sammanfattning av främst boken *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar* skriven av Åsa Jarvis och Anna Schnürer.

### **2.1.1 Förbehandling**

Normalt börjar biogasprocessen med en förbehandling av det organiska material som ska användas som substrat. Det finns åtskilliga anledningar till förbehandling men de främsta är att hygienisera materialet, ta bort material som inte kan brytas ner av mikroorganismer så som plastpåsar samt att fördela till exempel matavfall till önskad storlek för att senare i processen kunna underlätta nedbrytningen. Under förbehandlingen kan substratet förtjockas genom att antingen tillsätta förtjockningsmedel eller ta bort vatten från substratet. Det kan även tillsättas olika ämnen som stabiliserar processen i form av till exempel små mängder av olika metaller (Jarvis & Schnürer, 2009).

Hygienisering utförs för att avdöda mikroorganismer som kan sprida olika typer av sjukdomar och ej önskvärda bakterier. Hygienisering utförs eftersom det finns lagkrav som ställer krav på att hygienisering utförs för att befattning av animaliska biprodukter ska få förekomma (Jordbruksverket, 2015). Genom att göra detta undviks smittspridning i samband med hantering och användning av substrat och rötresten i biogasprocessen. Den vanligaste metoden för detta är att värma upp substratet till 70 °C under en timme (Jarvis & Schnürer, 2009).

Förtjockning av substratet kan ske på olika sätt. Ett av de vanligare sätten är att ta bort vatten med hjälp av en press eller skruv. Det är viktigt att komma ihåg att en del av substratet kan vara löst i vattnet som tas bort och därmed förloras (Jarvis & Schnürer, 2009).

Att minska partikelstorleken genom att till exempel fördela substratet med hjälp av en kvarn, mixer eller roterande knivar ökar lösligheten och gör det lättare för mikroorganismer att tillgodogöra sig substratet och därmed bryta ner det lättare och effektivare. Sönderdelning måste inte ske på mekanisk väg utan kan även ske på termisk, kemisk eller biologisk väg. För att mikroorganismerna ska utföra en bra nedbrytning bör inte partikelstorleken vara över 12 millimeter (Jarvis & Schnürer, 2009).

### **2.1.2 Rötning**

Efter det att substratet genomgått önskad förbehandling tillsätts substratet till rötammaren. I rötammaren arbetar mikroorganismer med att bryta ner materialet och bilda biogas i form av främst koldioxid och metangas. Rötningen sker vid anaeroba förhållanden det vill säga utan tillgång till syre. De vanligaste temperaturerna som rötningen utförs vid är antingen 30-35 °C eller 50-55 °C. En mer detaljerad beskrivning av den anaeroba nedbrytningen är sammanfattad nedan under *2.2 Anaerob nedbrytning av organiskt material*.

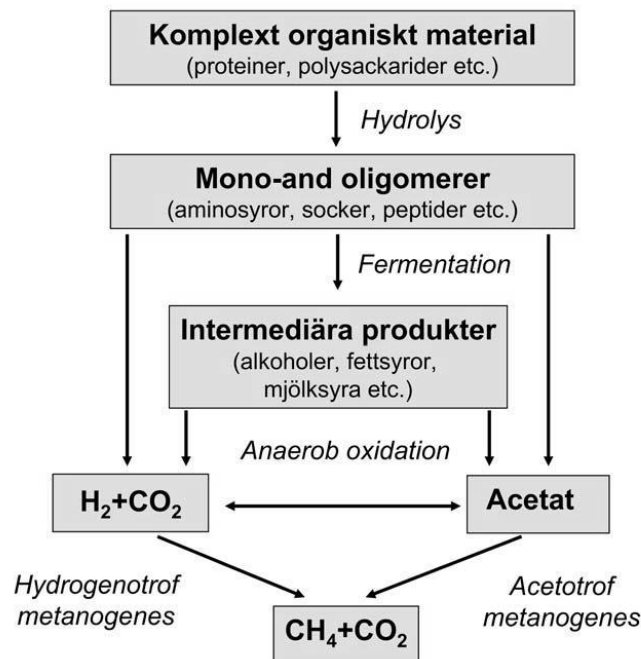
### **2.1.3 Uppgradering**

För att höja andelen metangas i den biogas som bildas behöver gasen uppgraderas. Gasen behöver uppgraderas för att kunna användas som fordonsbränsle och behöver då ett högre energiinnehåll för att vara effektivt i fordon. Den vanligaste tekniken för detta är att använda sig av en vattenskrubber som innebär att koldioxid löser sig lättare i vatten än metangas och därmed kan man separera bort koldioxid. En annan typ av teknik är ”pressure swing adsorption” som utnyttjar att metangas och koldioxid adsorberas olika lätt på zeoliter eller aktivt kol (Energigas Sverige, 2015).

## **2.2 Anaerob nedbrytning av organiskt material**

I en biogasprocess bryts organiska ämnen succesivt ner till metan och koldioxid genom de fyra stegen hydrolys, fermentation, anaerob oxidation och metanbildning. För att biogasprocessen ska fungera väl krävs att de olika mikroorganismerna samarbetar sinsemellan och att

de får sina villkor uppfylla för att trivas i processen. För att mikroorganismerna ska trivas ställs bland annat krav på miljön i form av olika parametrar som temperatur och pH men även att tillräckligt med näring tillförs i form av substrat till processen. Nedan följer en förklaring av de olika stegen vid nedbrytning av organiskt material vid tillverkning av biogas. Figur 2.1 visar de olika stegen inom anaerob nedbrytning av organiskt material. Informationen nedan är en sammanfattning av de olika stegen inom anaerob nedbrytning som Åsa Jarvis och Anna Schnürer har sammanställt i *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar* (Jarvis & Schnürer, 2009). Sammanfattningen som följer nedan om den anaeroba nedbrytningen innefattar även information från kurskompendiet *Environmental biotechnology* sammanfattad av Maria Jonstrup et al. (Jonstrup, et al., 2010) och information sammanställd av Joan Mata-Alvarez (Mata-Alvarez, 2003) i boken *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*.



Figur 2.1 Nedbrytning av organiskt material till biogas via olika steg. Bilden är tagen från *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar* skriven av Åsa Jarvis och Anna Schürner (Jarvis & Schnürer, 2009). Tillstånd har givits av Energiforsk för användning av bilden

### 2.2.1 Hydrolysis

Det första steget i den anaeroba nedbrytningen är hydrolysis. I detta steg bryts organiska polymerer som kolhydrater, fetter, lipider och proteiner ner till mindre monomera organiska ämnen som aminosyror, enkla sockerarter och enkla alkoholer (Mata-Alvarez, 2003). Detta första steg har till uppgift att bryta ner de stora organiska ämnena till mindre. Detta då de annars inte kan tas upp och användas direkt av mikroorganismer eftersom de är för stora för att tas in i mikroorganismernas celler. För att bryta ner ämnena till mindre utsöndrar vissa mikroorganismer enzymer, så kallade extracellulära enzymer, som har i uppgift att dela stora molekyler och bildar på så vis mindre molekyler. De mindre molekyler som bildas kan sedan tas upp av mikroorganismerna där de transporteras in i celler där de används som näringsskälla. Det finns olika typer av mikroorganismer som utsöndrar olika enzymer för att på så sätt kunna dela flera olika organiska föreningar. Vissa mikroorganismer kan även utsöndra



flera olika enzymer som därmed även delar flera olika organiska föreningar samtidigt som andra mikroorganismer har specialiserat sig på en typ av enzym för en viss organisk förening (Jarvis & Schnürer, 2009).

### **2.2.2 Fermentation**

Det andra steget, fermentation, är precis som hydrolys inte uppbyggt av ett enda steg utan består av flera olika sammanhängande steg. Vilka reaktioner som sker beror på vilka mikroorganismer som finns närvarande och varierar mellan olika biogasanläggningar eftersom varje biogasanläggning har sin egen uppsättning av mikroorganismer. Flera av mikroorganismerna som är verksamma under hydrolysen är även verksamma under fermentationen (Jarvis & Schnürer, 2009). Genom flera olika fermentationsreaktioner omvandlas produkterna som bildades i hydrolysen till huvudsakligen vätgas, formiat, koldioxid, organiska syror (så som ättiksyra, propionsyra, smörsyra, succinsyra, mjölksyra), alkoholer, ammoniak (från aminosyror), och ketoner (Mata-Alvarez, 2003). Beroende på vilka mikroorganismer som är närvarande bildas de olika ämnena i olika kvantiteter.

### **2.2.3 Anaerob oxidation**

Under detta tredje steg används produkterna som bildats under fermentationen och bryts vidare ner genom olika anaeroba oxidationsreaktioner. Detta är ett komplext steg som kräver samarbete mellan de mikroorganismerna som utför oxidationerna och de mikroorganismer som utför metanbildningen under det fjärde och sista steget. Anledningen till att de behöver samarbeta är komplext men fenomenet är kopplat till koncentrationen av vätgas. Under anaeroba oxidationer används protoner som elektronmottagare vilket leder till att vätgas bildas. På grund av termodynamiken kan denna vätgas bara bildas om vätgaskoncentrationen hålls på en låg nivå. Skulle vätgasen inte plockas bort kontinuerligt skulle de anaeroba oxidationerna avta på grund av att mikroorganismen då inte får tillräckligt med energi för tillväxt. För att konsumera vätgas kontinuerligt är därför metanbildarna viktiga även för detta tredje steg. De konsumerar vätgas och ser därigenom till att koncentrationen hålls på en låg nivå (Jarvis & Schnürer, 2009).

Vid anaerob oxidation bildas förutom vätgas som nämnt ovan även huvudsakligen acetat och koldioxid (Mata-Alvarez, 2003).

### **2.2.4 Metanbildning**

Det fjärde och sista steget är metanbildning. Det är här som metan och koldioxid (biogas) bildas av olika metanproducerande mikroorganismer, så kallade metanogener. De substraten som är viktigast för mikroorganismerna i detta steg är vätgas, koldioxid och acetat som bildas vid anaerob oxidation. Även andra ämnen som metylaminer, alkoholer och format har visat sig kunna användas för bildning av metan (Jarvis & Schnürer, 2009). Precis som de föregående stegen är det inte en typ av mikroorganism som deltar utan även metanbildningen utgörs av flera olika mikroorganismer. Den mest förekommande metanbildaren är acetotrofa metanogener som använder sig av acetat. De klyver acetat i två delar där det ena kolet används för bildning av metan och det andra för bildning av koldioxid (Jarvis & Schnürer, 2009; Mata-Alvarez, 2003). En annan viktig grupp för att producera biogas är hydrogenotroferna vars huvudsakliga substrat består av vätgas och koldioxid.

Metanbildarna växer långsammare än mikroorganismerna i de andra stegen och detta sista steg blir därför i normala fall det hastighetsbestämmande steget vid anaerob nedbrytning till biogas (Mata-Alvarez, 2003). Den tid det tar för mikroorganismerna att dela sig i två är i detta steg 1-12 dagar. Detta sätter gränsen för uppehållstiden i processen. Är uppehållstiden för kort

riskerar de metanbildande mikroorganismerna att sköljas ut ur processen eftersom de då inte hinner föröka sig i samma takt som materialet byts ut i röt-kammaren (Jarvis & Schnürer, 2009).

## 2.3 Processparametrar

För att styra biogasprocessen och se till att processen fungerar på ett önskvärt sätt finns olika processparametrar som kan kontrolleras. Nedan följer en beskrivning av de vanligaste parametrarna och hur de kan påverka biogasprocessen. De är sammanfattade från Jarvis & Schnürer, 2009.

### 2.3.1 Temperatur

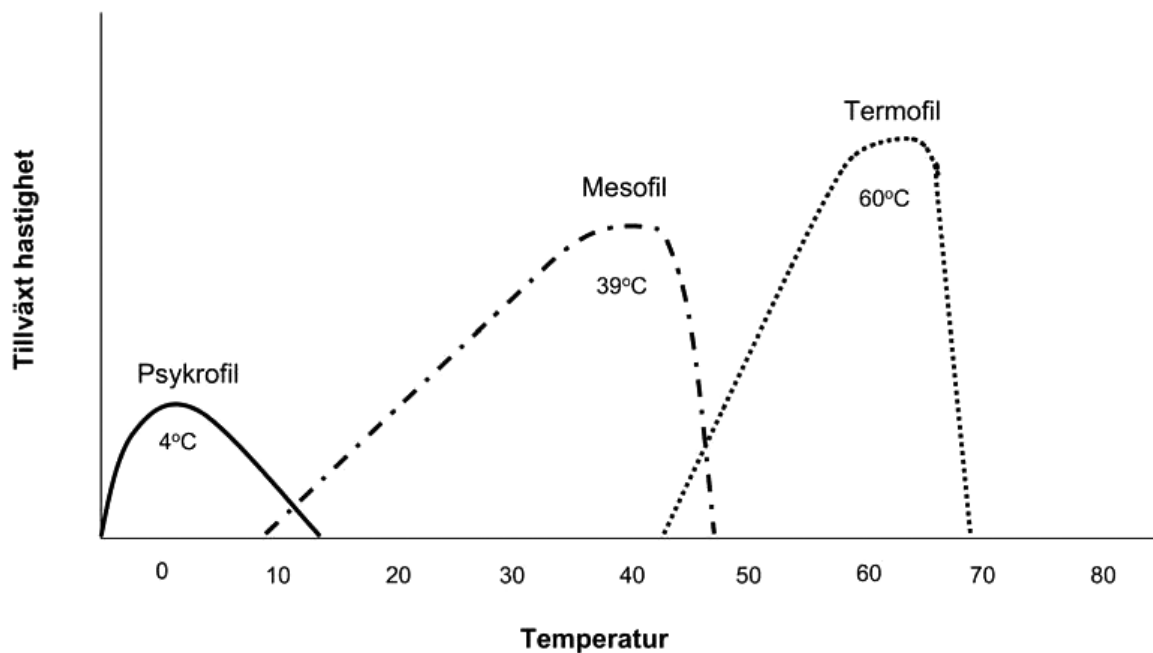
Traditionellt sett används två typer av temperaturer vid framställning av biogas, antingen mesofil (35-40°C) eller termofil (50-55°C). Den optimala temperaturen för mikroorganismer varierar mellan olika typer av mikroorganismer. Mikroorganismer brukar delas in i olika grupper beroende på vilken temperatur de trivs bäst vid och är optimerade att verka vid. De olika typerna är presenterade i tabell 2.2 nedan (Jarvis & Schnürer, 2009; Mata-Alvarez, 2003; Jonstrup, et al., 2010).

Tabell 2.2 Olika grupper av mikroorganismer indelade efter olika temperaturer där de verkar och trivs som bäst (Jarvis & Schnürer, 2009; Mata-Alvarez, 2003; Jonstrup, et al., 2010).

Grupp	Temperatur
Psykrofil	10 °C
Mesofil	35-40 °C
Termofil	50-55 °C
Extrem termofil	65 °C
Hyper termofil	Över 85 °C

Lägre temperatur innebär att de extracellulära enzymerna arbetar långsammare under hydrolyssteg. En mikroorganismens temperatur är kopplad till vilken typ av miljö den plockats in från. En mikroorganism som därför normalt sätt trivs i ett kallt klimat har då lättare att anpassa sig till en lägre temperatur samtidigt som en mikroorganism som normalt sätt trivs vid en högre temperatur har lättare att anpassa sig till en högre temperatur. Temperaturen påverkar mer än bara mikroorganismer. Parameterar som viskositet och ytspänning påverkas och ändras med förändrad temperatur (Jonstrup, et al., 2010).

I tillväxtintervall för olika mikroorganismer ligger ofta den optimala temperaturen för anaerob nedbrytning väldigt nära den temperatur som leder till att celler börjar inaktiveras och vidare leder till celdöd. Som visas i figur 2.2 nedan avtar tillväxthastigheten nära över den optimala temperaturen och avtar sedan snabbt vid främst mesofil och termofil temperatur (Jarvis & Schnürer, 2009).



Figur 2.2 Tillväxthastighet för mikroorganismer anpassade till olika temperaturer. Bilden är tagen från *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar* skriven av Åsa Jarvis och Anna Schürner (Jarvis & Schnürer, 2009). Tillstånd har givits av Energiforsk för användning av bilden.

Vanligtvis följer de flesta mikroorganismer kurvorna ovan i figur 2.2 och processerna drivs ofta i temperaturintervall om 30-40°C eller 50-60°C. Biogasproduktion vid lägre temperatur vid till exempel psykrofil temperatur är möjlig men ger ofta lägre metanproduktionshastighet. Vid högre temperaturer finns exempel på organismer som klarar upp till 110°C, men stabila processer går oftast inte över 70°C (Mata-Alvarez, 2003). Då temperaturen går över 60°C minskar aktiviteten för metanbildarna snabbare än för de syrabildande organismerna vilket leder till att koncentrationen av fettsyror ökar (Mata-Alvarez, 2003) och påverkar processen negativt.

Det finns mikroorganismer som inte följer kurvorna till full utsträckning utan kan trots att de är optimala för ett mesofilt intervall (30-40°C) överleva upp till 60°C. De mikroorganismerna kallas termotoleranta på grund av sin förmåga att klara av högre temperaturer än de är anpassade för. Det finns även mikroorganismer som rakt motsatt är optimala att leva vid en högre temperatur men kan klara sig bra vid en lägre temperatur. Forskning har visat att ungefär 10 % av mikroorganismerna i en mesofil process egentligen är termofila. Detta faktum gör att biogasproduktion vid en mellantemperatur såsom 45 °C är möjlig (Jarvis & Schnürer, 2009). För att processen ska hållas stabil bör inte temperaturen variera mer än  $\pm 0,5$  °C (Jarvis & Schnürer, 2009). Enligt Jonstrup et al. (2009) har det visats att biogasproduktion vid en termofil temperatur kan vara mer instabil än vid biogasproduktion vid en mesofil temperatur.

Forskning gjord av Moestedt et al. (2014) har visat att en temperatur på 44 °C vid anaerob nedbrytning gav upp till 22 % högre metanutbyte jämfört med en temperatur på 38 °C. De studerade skillnad mellan reaktorerna då den organiska belastningen (organic loading rate, OLR) ökades successivt från 3,2 till 6,0 gVS L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> samtidigt som de minskade uppehållstiden från 45 till 24 dagar. Organisk belastning beskrivs mer under stycket 2.3.3 *Belastning*

nedan. Det har även gjorts försök vid en temperatur på 42 °C jämfört med en temperatur på 38 °C. Studien gick ut på att jämföra hur spårämnen av olika metaller påverkar processen vid olika temperaturer (Westerholm, et al., 2015). Undersökningen gjord av Westerholm et al. visade inte på någon märkbar skillnad av metanhalt mellan de olika temperaturerna. Deras studier visade även att metanproduktionen var högre vid 42 °C än 37 °C efter en tid då mikroorganismerna hunnit anpassa sig. Nedbrytningsgraden var initialt högre för den lägre temperaturen men svängde efter en tid så att nedbrytningsgraden var högre för den högre temperaturen (Westerholm, et al., 2015). En studie utförd av Jung et al. studerade temperaturer mellan 30 °C till 55 °C med avseende på metanhalt och mängd biogas (Jung, et al., 2006). Jung et al. visade att i sina försök producerade de mest biogas vid 50 °C och en uppehållstid på 10 dagar och att högst metanhalt erhöles vid 50 °C och en uppehållstid på 12 dagar. Studien innefattade en jämförelse mellan temperaturerna 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C och 55 °C.

Att bryta ner organiskt material går generellt sett snabbare vid en högre temperatur. Mikroorganismers arbetskapacitet ökar med en ökande temperatur, förutsatt att de har potential att trivas vid denna högre temperatur. Eftersom mikroorganismerna jobbar snabbare vid en högre temperatur och därmed bryter ner mer organiskt material på samma tid skulle detta kunna innebära att röt-kammarvolymen inte behöver vara lika stor. Det finns även fördelar med att ha högre temperatur vad gäller omrörning eftersom viskositeten minskar med högre temperatur (Jarvis & Schnürer, 2009). Nackdelar med högre temperatur är att det krävs mer energi för att värma substratet. Många anläggningar hygieniserar substrat vid 70 °C vilket gör att uppvärmning av substratet skett. Efter det värmeväxlas det hygieniserade substratet mot ingående substrat för att kyla ner substratet igen till önskad temperatur innan rötning (Jarvis & Schnürer, 2009).

En ändrad temperatur påverkar givetvis mikroorganismerna. Varje biogasprocess har en särskild uppsättning av mikroorganismer som anpassat sig till de specifika förhållandena. Att låta mikroorganismerna anpassa sig till förutsättningarna i biogasprocessen tar tid vid en förändring (Jarvis & Schnürer, 2009). En höjning av temperaturen om en grad per dag kan vara en riktlinje för att anpassa processen till en högre temperatur (Jarvis & Schnürer, 2009). Det finns även exempel där temperaturen höjts momentant i ett steg istället för successivt vilket även det fungerat. Det viktiga är att utgå från en redan stabil och väl fungerande process (Jarvis & Schnürer, 2009). Det kan vara mer problematiskt att ändra från en termofil temperatur till en mesofil temperatur än tvärtom med bibehållen biogasproduktion. I den termofila processen finns det ofta mycket få mesofila mikroorganismer närvarande eftersom de slagits ut av den höga temperaturen (Jarvis & Schnürer, 2009).

### **2.3.2 pH**

Varje mikroorganism som är närvarande i anaerob nedbrytning har ett specifikt pH intervall där de har optimal tillväxthastighet. För acidogener ligger dess optimala pH omkring 6 samtidigt som optimalt pH för metanogener är omkring 7. För metanogener faller snabbt tillväxthastigheten då pH minskar till 6,6 eller lägre. pH i anaerob nedbrytning brukar därför hållas omkring neutralt eftersom det ofta är metanogenerna som är de hastighetsbegränsande (Jonstrup, et al., 2010). Att tillgodose de hastighetsbegränsande mikroorganismernas behov bidrar till att kunna bryta ner substrat fortare. Även om de flesta mikroorganismer trivs bäst kring ett neutralt pH finns det exempel på metanproducerande mikroorganismer som klarar pH ända ner till 4,7 och andra som klarar upp till 10 (Jarvis & Schnürer, 2009). De flesta biogasanläggningar i Sverige drivs vid ett pH omkring 8 (Jarvis & Schnürer, 2009).

I anaerob nedbrytning av organiskt material finns även ämnen som har en buffrande förmåga. Ämnen som vanligtvis förekommer inom biogasproduktion för detta ändamål är vätekarbonat, vätesulfid, divätefosfat och ammoniak. De ämnena hjälper till att hålla pH på en stabil nivå. Om de fria fettsyrorerna ökar i en rötningsprocess innebär det att pH kan minska eftersom de fria fettsyrorerna sänker pH på grund av att de har ett lägre pH än normalt i röttningskammaren. Om det produceras tillräckligt mycket fria fettsyror klarar inte systemet av att balansera pH varvid pH sjunker. När pH sjunker drastiskt på grund av detta är den vanligaste åtgärden att minska belastningen av substrat till reaktorn. Detta görs eftersom ökning av fria fettsyror beror på att mikroorganismerna inte hinner bryta ner allt substrat som tillförs och därmed stannar vid fria fettsyror istället för att omvandlas till biogas (Jarvis & Schnürer, 2009).

### 2.3.3 Belastning

I biogasprocesser pågår ständigt nedbrytning av organiskt material och om inget nytt material tillförs kan processen komma att avta. Med ordet belastning menas hur mycket nytt material som tillförs processen per tidsenhet. Den mer korrekta termen för detta är organisk belastning eller engelskans organic loading rate (OLR). För att kunna ge processen rätt belastning är det viktigt att känna till substratets torrsubstanshalt (TS) och dess organiska substans (VS). Torrsubstansen är det som blir kvar då allt vatten torkas bort och VS anger den organiska andelen av torrsubstansen (Jarvis & Schnürer, 2009).

Belastningen i en nystartad biogasprocess anpassas successivt efter uppstart och ökas långsamt för att mikroorganismerna ska hinna anpassa sig och klara av att bryta ner allt. En vanlig belastning vid uppstart kan vara 0,5 kg organisk substans per m<sup>3</sup> röttningskammare. Denna mängd kan sedan successivt ökas efterhand som mikroorganismerna växer till (Jarvis & Schnürer, 2009).

Det kan ta lång tid innan rätt belastning uppnås i en nystartad biogasprocess. Detta beror på att vissa mikroorganismer har fördubblingstid på upp till flera dygn som nämnts tidigare (Jarvis & Schnürer, 2009). Om det tillförs för mycket substrat till mikroorganismerna i den utsträckningen att de inte klarar av att bryta ner allt bildas ett överskott av icke nedbrutet material. I detta icke nedbrutna material finns flera olika fettsyror som då ansamlas i processen vilket på sikt kan sänka pH och därmed skapa obalans i nedbrytningsprocessen (Jarvis & Schnürer, 2009).

Hur snabbt belastningen kan ökas i en process kan bero på vilket typ av substrat som används. Ett substrat bestående av material som är lättnedbrutet som till exempel processvatten innehållandes mycket socker och stärkelse är lätt för mikroorganismerna att hantera. Om substratet däremot innehåller mycket fiberrikt växtmaterial som är svårare att bryta ner krävs en längre tid av anpassning till förhöjd belastning (Jarvis & Schnürer, 2009). Viktigt att ha i åtanke är att mycket lättnedbrutet material som substrat från livsmedelindustrin kan orsaka ansamling av fettsyror på grund av mycket snabb nedbrytning samtidigt som metanogenerna inte hinner med att omvandla det till biogas. Substrat som innehåller mycket kväve som till exempel substrat från slaktindustrin kan behöva tillföras i mindre mängder för att undvika ansamling av ammoniak och svavelväte. För att kunna öka belastningen snabbt och för att mikroorganismerna ska kunna anpassa sig snabbare är det viktigt att använda sig av ett substrat som inte innehåller ämnen som är giftiga för mikroorganismerna. Exempel på giftiga ämnen kan vara tungmetaller och organiska föroreningar (Jarvis & Schnürer, 2009).

En biogasprocess som fungerar väl och har anpassat sig kan vid termofil temperatur köras med en belastning om 4-5 kg VS per m<sup>3</sup> röttningskammare och för mesofil temperatur 2-3 kg VS

per m<sup>3</sup> rötkammare (Jarvis & Schnürer, 2009). När väl önskad belastning har uppnåtts är det viktigt att tillföra substrat enligt samma schema och mönster samt att inte avvika för mycket från den önskade belastningen.

#### **2.3.4 Uppehållstid**

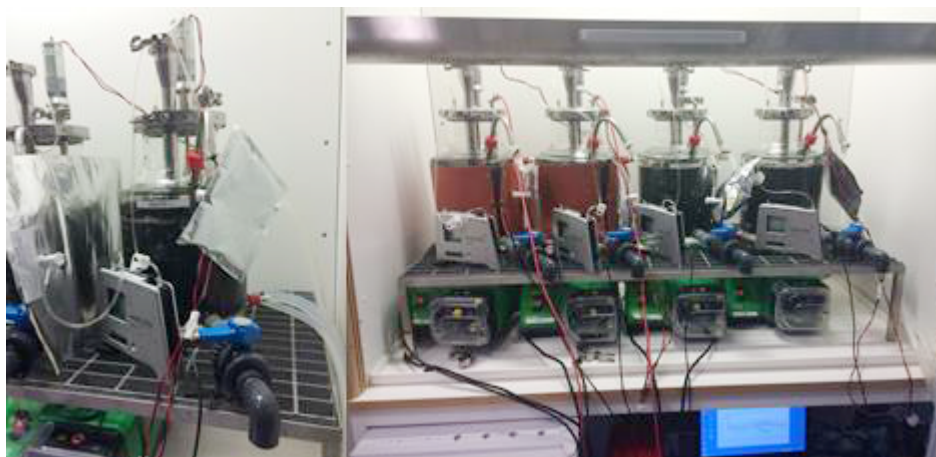
Termen uppehållstid är den tid substratet som ska behandlas befinner sig i rötkammaren. I processen omvandlas kolväten från organiskt material till främst gasformigt metan och koldioxid. Detta innebär att mängden fast material hela tiden minskar något. Ofta är därför volymen av ingående material något större än den volym som plockas ut (Jarvis & Schnürer, 2009). Viktigt att komma ihåg är att i utgående volym ingår även en del mikroorganismer. En för kort uppehållstid kan innebära att det plockas ut mer mikroorganismer än vad som hinner växa till och därmed dör processen ut genom att antalet mikroorganismer ständigt minskar i det fallet.

Uppehållstiden kan antingen anges som hydraulisk uppehållstid (HRT, hydraulic retention time) eller som uppehållstiden för det partikulära materialet (SRT, solids retention time). HRT är ofta 10 till 25 dagar men kan även vara längre (Jarvis & Schnürer, 2009). I de flesta fall är HRT och SRT lika långa men det finns fall där en del av rötresterna återförs till processen och i de fallen blir SRT längre än HRT.



### 3 Material och metod

Arbetet som utförts innehåller en laborativ del som utförts på plats i Helsingborg hos OX2 i samarbete med deras forsknings- och utvecklingsavdelning. På plats användes fyra stycken reaktorer med en volym om 4,5 liter vardera. I toppen av varje reaktor fanns en kontinuerlig omrörare. Till reaktorn kopplades en gaspåse som användes som buffert då substrat plockades in och ut ur reaktorn. Buffertpåsen innehöll biogas och öppnades då substrat tillsattes eller plockades ut för att undvika att tillföra syre till den anaeroba miljön. Genom att använda sig av gaspåsar innehållande biogas togs istället biogas därifrån då rötresten plockades ut ur reaktorerna samt tillsattes till gaspåsar då substrat tillsattes reaktorerna. Det var kopplat en gasmätare av märket uFlow tillverkade av Bioprocess Control till varje reaktor för att mäta hur mycket gas som producerades i reaktorerna. De fyra gasmätarna var kopplade till en dator för att kunna avläsa och lagra mätvärden kontinuerligt angående hur mycket biogas som bildas i varje reaktor. De data angående producerad mängd biogas plockades sedan ut i form av hur mycket biogas varje reaktor producerat för varje timme. För att hålla rätt och jämna temperaturer i reaktorerna användes dels två stycken vattenbad och dels två värmemantlar. I figur 3.1 nedan visas uppställning av reaktorer under försöken.



*Figur 3.1 Till vänster visas reaktor 4 i uppställningen och till höger visas uppställningen i sin helhet under försök vid avsedda temperaturer.*

Under uppstartsdelen användes pumpar från Watson Marlow för att använda kontinuerlig matning. Pumparna var av modell 520S med pumphuvud 520R och slangar av typen Marprene med inner diameter på 9,6 mm och tjocklek på 2,4 mm. De styrdes med hjälp av timer och matade var tredje timme under olika lång tid beroende på belastning. Pumparna användes endast under en kortare period under uppstart varefter manuell matning användes resterande tid.

#### 3.1 Uppstart

Dag 1 hämtades rötresten från företagets röt-kammare för att sedan fylla labbreaktorerna med detta för att kunna börja producera biogas och låta mikroorganismerna anpassa sig till sin nya miljö. Målet under uppstarten var att visa att reaktorerna producerade lika mycket biogas vid samma temperatur i reaktorerna samt visa att gasmätarna mäter lika oavsett vilken reaktor de var kopplade till. Under uppstarten (dag 1-14) hölls OLR på en nivå mellan 2,5-3 kg VS/m<sup>3</sup> reaktor beroende på vilket substrat som användes från dag till dag. Reaktorerna fick nytt sub-



strat en gång per dag samtidigt som det plockades ut rötrest från reaktorerna motsvarande 90 % av den volym som tillsattes i form av substrat. Anledningen till att 90 % plockas ut var att mikroorganismerna omvandlar en del av substratet till biogas. 90 % har använts vid tidigare forskning inom företaget och används därför. Kontinuerligt under uppstarten mättes även VFA, NH<sub>4</sub>-N, pH och temperatur för att se att processen var stabil. Under uppstarten hölls temperaturen på 37 °C i reaktorerna med hjälp av vattenbad.

Under uppstarten var vattenbadet kopplade till två reaktorer var eftersom reaktorerna då höll samma temperatur. De var kopplade i serie så vatten från vattenbadet först gick till den första reaktorns mantel i ordning från vattenbadet och därefter vidare till den andra reaktorn i ordningens mantel.

Efter uppstart under dag 1-14 kopplades under dag 15 pumparna från Watson Marlow in för att kontinuerligt mata reaktorerna. Kontinuerlig matning skedde under dag 15-29 varefter metoden för matning ändrades eftersom pumpning inte var pålitligt. Anledningen till att pumpning inte var pålitligt var att slangarna sattes igen av substratet och därmed fick reaktorerna inte samma belastning och likvärdiga förhållanden. Efter att pumpning förkastats återtog manuell matning. Mellan dag 1-34 utfördes analyser enligt schemat i tabell 3.1 nedan.

*Tabell 3.1 Analysschema för dag 1-34. Schemat visar genom markering vilka tester som utfördes på vilken dag i veckan.*

	TS/VS	NH <sub>4</sub> -N	totVFA	Temp	pH	Gas sammansättning
måndag						
tisdag						
onsdag						
torsdag						
fredag						

Under dag 30-34 användes åter manuell matning och så även i försöken framåt från dag 30-103. Efter att det visats att reaktorerna producerade likvärdigt med biogas vid likvärdiga förutsättningar påbörjades en temperaturökning till de avsedda temperaturerna för varje reaktor under dagarna 35-49. Temperaturerna ändrades i reaktorerna så att reaktorerna R1-R4 fick temperaturerna 49 °C, 44 °C, 39 °C och 37 °C respektive. Under temperaturökningen var värmemantlar påkopplade på två av reaktorerna och två av reaktorerna var kopplade till varsitt vattenbad. De reaktorer som inte värmdes med vattenbad tillfördes vatten i dess mantlar för att ha ett värmande medium likt det som är i de med vattenbad som pumpar kontinuerligt vatten genom dess mantlar.

Från dag 35 och framåt i försöket ändrades analysschemat till schemat nedan för att få bättre analyser främst vad gäller VFA. Problemet var att reaktorerna inte fick något substrat under helgen samt att de fick något mer substrat på måndagen för att kompensera att de inte fått substrat under helgen. Genom att låta mikroorganismerna arbeta igenom substrat under måndag och tisdag gav det resultat som mer liknar kontinuerlig matning om analyserna genomfördes

onsdag och fredag. Schemat presenterat nedan i tabell 3.2 användes sedan genom hela försöket från dag 35 till dag 103.

*Tabell 3.2 Schema över vilka dagar som olika tester utfördes under dag 35-103.*

	TS/VS	NH <sub>4</sub> -N	totVFA	Temp	pH	Gassammansättning
måndag						
tisdag						
onsdag						
torsdag						
fredag						

De fyra gasmätarna roterades för att se att de mätte lika oavsett vilken reaktor de var kopplade till. De roterades enligt förutbestämt schema som visas nedan i tabell 3.3. Tabellen visar vilken gasmätare som flyttas till vilken reaktor på given dag.

*Tabell 3.3 Schema för vilken gasmätare som roterades till vilken reaktor på given dag. Siffrorna i tabellen anger nummer på de olika gasmätarna.*

	Dag 1	Dag 7	Dag 14	Dag 16
Reaktor 1	1252	1257	1255	1253
Reaktor 2	1253	1252	1257	1255
Reaktor 3	1255	1253	1252	1257
Reaktor 4	1257	1255	1253	1252

### 3.2 Kontinuerligt försök

Under försöken var två reaktorer kopplade till varsitt vattenbad och två reaktorer var försedda med varsin värmemantel. Under dag 49 ändrades temperaturerna till de slutliga avsedda temperaturerna för försöken. Efter det kördes reaktorerna på avsedda temperaturer och prover analyserades kontinuerligt enligt tabell 3.2. Data samlades kontinuerligt in, analyserades och sammanställdes för att övervaka att processen i de olika reaktorerna fungerade på önskvärt sätt och att mikroorganismer trivdes. Under de kontinuerliga försöken söktes även skillnader mellan reaktorerna eftersom de kördes vid olika temperaturer.

### 3.3 Substrat

Substratet som användes plockades ut dag 13 från företagets befintliga process och frystes sedan ner i dunkar om 2,5 liter styck. Substratet plockades ut vid ett och samma tillfälle för att undvika variationer i substratkaraktär. Under försökets gång plockades sedan substrat fram

från fryn och användes allt eftersom försöket fortskred. När substratet plockades fram silades de genom en sil med maskvidd 8 millimeter. Sedan mättes torrsubstanshalten och ett prov filtrerades för att mäta den totala VFA-halten. Efter detta gjorts beräknades VS halten med ekvation (1) nedan. Anledningen till att VFA dividerades med 10 var för att få den i % under antagandet att substratets densitet var  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Anledningen till att TS multipliceras med 0,82 är att tidigare forskning vid företaget visat att VS är ungefär 82 % av TS.

$$VS \% = 0,82 \cdot TS \% + \frac{VFA}{10} \quad (1)$$

Efter att VS halten beräknats räknades det ut hur mycket glycerol som eventuellt behövs tillsättas för att uppnå en VS-halt på 8,8 %. Den mängd glycerol som behöver tillsättas beräknades med ekvation (2) nedan. VS % halten på glycerol analyserades och var 90,32 % vilket sedan användes genom hela studien. Glycerol tillsätts eftersom det har en högre VS halt och därmed kan öka VS halten i substratet om det tillsätts. VS % halt på 8,8 % användes under de kontinuerliga försöken då en belastning på  $4 \text{ kg VS per m}^3$  reaktor var önskvärd. Orsaken till belastningen  $4 \text{ kg VS per m}^3$  var att uppehållstiden var något lägre än i de verkliga rötreaktorerna. Som tidigare nämnt kan en belastning om 2-3  $\text{kg VS per m}^3$  reaktor vara ett bra riktmärke annars för en mesofil process.

$$\text{Mängd glycerol per liter färdigt substrat} = \frac{\frac{8,8\% \cdot 1000 - VS\% \text{ Glycerol} \cdot 1000}{100} \cdot 100}{\frac{VS\% \text{ substrat}}{100} \cdot \frac{VS\% \text{ glycerol}}{100}} \quad (2)$$

Mängden glycerol som beräknas med ekvation (2) ovan anger hur mycket glycerol som ska tillsättas per liter färdigblandat substrat. Substrat tillsätts sedan i önskad mängd till reaktorerna beroende på vilken belastning och uppehållstid som var önskvärd. TS/VS analys

TS/VS analyser gjordes av prover från reaktorerna en gång per vecka för att se hur mycket torrsubstans reaktorerna innehöll samt hur mycket organiskt substrat de innehöll. Förfarandet var som så att deglar i vilka rötrest hällades upp i vägdes före tillsats av rötrest ( $m_d$ ) och sedan efter det att rötrest tillsats ( $m_{ts}$ ). Sedan torkade de vid  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  i minst 24 timmar. Efter att de torkat i 24 timmar svalnade de i exsickator varefter de åter vägdes ( $m_{te}$ ). Efter att de svalnat och vägts brändes de i  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  i ugn. Då de bränts i  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  sattes proverna i exsickator där de fick svalna varefter de vägdes ( $m_{ge}$ ).

Mängden TS som % av totalvikt beräknades enligt ekvation (3) nedan.

$$TS \% \text{ av tot} = \frac{m_{te} - m_d}{m_{ts} - m_d} \quad (3)$$

Mängden VS som % av totalvikt beräknades enligt ekvation (4) nedan.

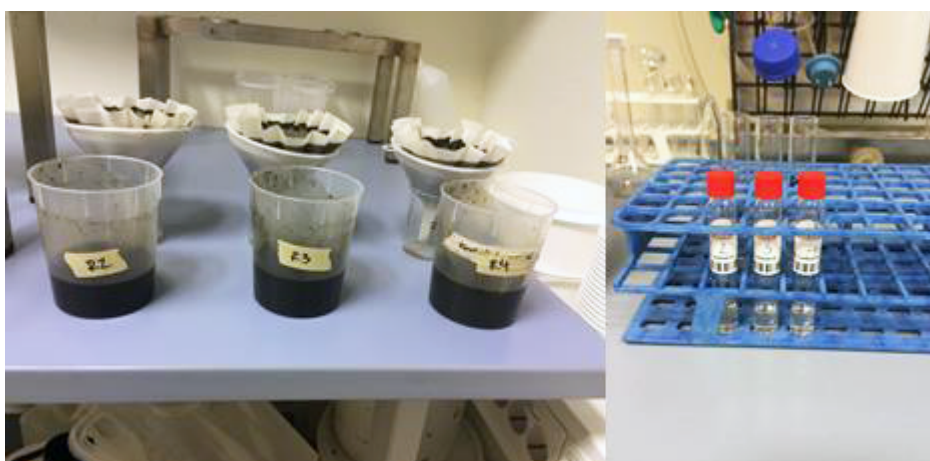
$$VS \% \text{ av tot} = \frac{m_{te} - m_{ge}}{m_{ts} - m_d} \quad (4)$$

Mängden VS som % av TS beräknades enligt ekvation (5) nedan.

$$VS \% \text{ av TS} = \frac{m_{te} - m_{ge}}{m_{te} - m_d} \quad (5)$$

### 3.4 VFA-analys

VFA-analyser utfördes två gånger per vecka för att övervaka fettsyror i reaktorerna. För att göra detta filtrerades först rötresterna med hjälp av filterpapper. Efter det att de filtrerats spädades de fyra gånger med destillerat vatten för att få rätt koncentrationsintervall som matchade Hach Lange kyvetternas koncentrationsintervall. Därefter tillsattes prov till Hach Lange kyvetter och analyserades enligt deras föreskrifter varpå den totala koncentrationen av fettsyror kunde avläsas. Skulle VFA öka finns risk att pH minskar vilket inte är gynnsamt för mikroorganismerna i reaktorerna. Provkitt som användes från Hach Lange var LCK365 för att mäta VFA. I figur 3.2 nedan visas bild på dels kyvetter som användes då VFA analyserades och dels bild på när substrat filtrerades med hjälp av filterpapper. Koncentrationen av VFA-analyserna angavs i gram acetat ekvivalenter per liter prov.



*Figur 3.2 Till vänster visas substrat som filtreras med hjälp av filterpapper. Till höger visas kyvetter som användes då VFA analyserades.*

Under försökets gång samlades prov i små burkar som sparades i frys för analys av specifik VFA på institutionen för Kemiteknik. 900  $\mu\text{l}$  prov togs från det filtrerade substratet och blandades med 100  $\mu\text{l}$  10 % fosforsyra. Proverna lämnades sedan till Kemiteknik som analyserade proverna med avseende på acetat, propionat, butansyra och pentansyra. De specifika fria fettsyrorna analyserades med hjälp av gaskromatograf utrustad med flamjoniseringsdetektor samt HP-FFAP kolonn och temperaturgränserna 60-240  $^{\circ}\text{C}$ .

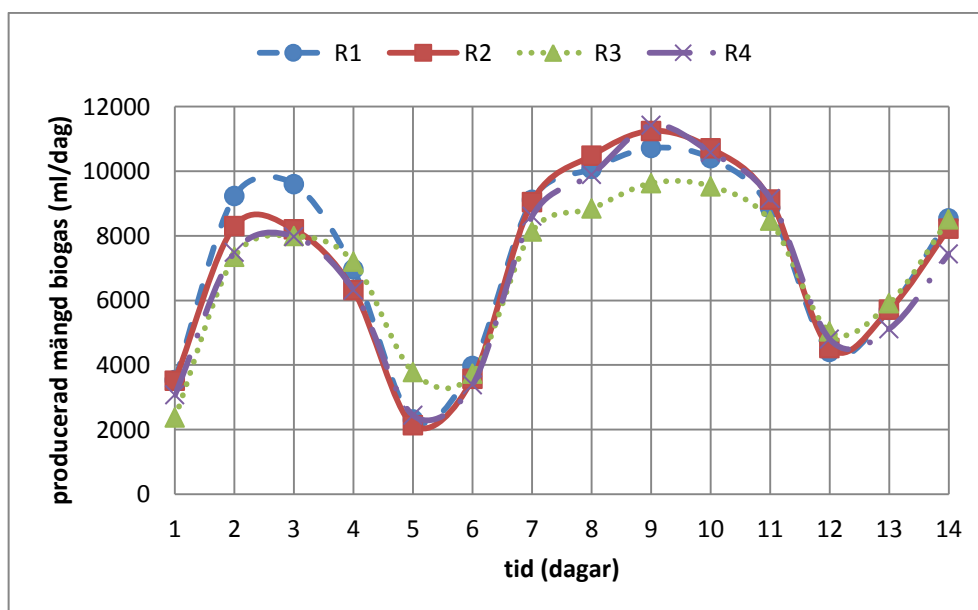
### 3.5 Ammoniumanalys

Analys av rötrestprover från varje reaktor för ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) utfördes en gång per vecka för att undersöka om det ansamlats något ammonium. Tillvägagångssättet var att rötresterna först filtrerades med hjälp av filterpapper. Efter det att rötresterna filtrerades togs prov och spädades 50 gånger för att matcha koncentrationsintervallet på Hach Lange kyvetterna. Sedan tillsattes prov till Hach Lange kyvetter enligt deras instruktion varpå koncentrationen  $\text{NH}_4\text{-N}$  kunde avläsas. Provkitt som användes från Hach Lange var LCK302 för att mäta  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

## 4 Resultat och diskussion

### 4.1 Uppstart, dag 1-14

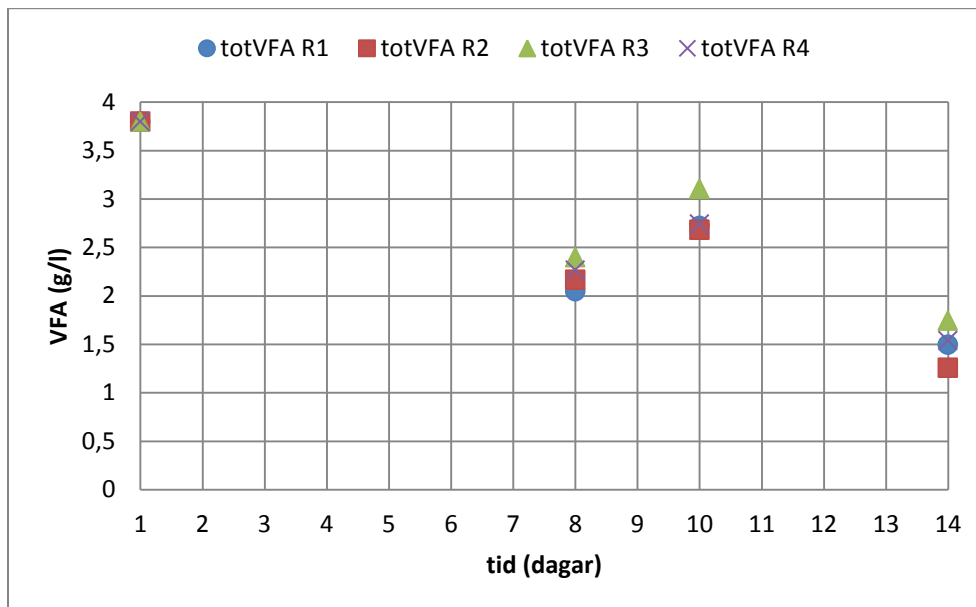
Under dag 1-14 startades reaktorerna upp. Under denna tid visades att reaktorerna producerade ungefär lika mycket biogas. Mängden biogas producerad per dag visas i figur 4.1 nedan. Dag 7 flyttades gasmätarna samtidigt som vattenbadet kopplades om så att den reaktor som från början varit först från vattenbadet nu blev som tvåa på varje vattenbad. Under dag 1-6 sågs att den reaktor som varit kopplad först i ordningen från vattenbadet producerade mer biogas vilket skulle kunna bero på att den har högre temperatur. När den istället fick vara kopplade som tvåa från vattenbadet sjönk biogasproduktionen. Detta skedde samtidigt som gasmätarna roterades. De reaktorer som var kopplade först i ordningen från vattenbadet var under dag 1-6 reaktor 1 och reaktor 3. Att vattenbadet kopplades om samma dag som gasmätarna roterades var olyckligt. Det var olyckligt eftersom det då var svårt att veta om en förändring berodde på att vattenbadet kopplats om eller om det berodde på att gasmätarna roterats. Vidare under försöken roterades gasmätarna dag 14 och 16. När de roterades de två gångerna märktes ingen skillnad i mängd biogas som producerades vilket betydde att flödesmätarna mätte lika oberoende av vilken reaktor de var kopplade till. Det tycktes under uppstarten synas att det spelade roll i vilken ordning reaktorerna var kopplade till vattenbadet. Detta kan bero på att temperaturen blir något lägre till den reaktor som är kopplad som nummer två från ett av vattenbadet. Den reaktor som var kopplad som nummer två producerade något mindre mängd biogas.



Figur 4.1 Producerad mängd biogas i reaktor 1-4 under dag 1-14. Reaktorerna hade under dag 1-14 samma temperatur, 39 °C.

Koncentrationen av fria fettsyror varierade något under uppstarten vilket är naturligt då mikroorganismerna anpassar sig till sin nya omgivning, se figur 4.2 nedan. Att fettsyror minskade något istället för att öka var positivt. En ökad mängd fettsyror tyder på att belastningen skulle kunna vara för hög. Att fettsyorna minskade något kan ha berott på att belastningen

var lägre än i den verkliga processen som de var anpassade till då de hämtades och tillsattes reaktorerna. Om fettsyror hade ökat hade det antytt att mikroorganismerna inte hann med att omvandla allt substrat till biogas vilket på sikt kunde medfört sänkt pH och därmed cell-död. Anledningen till att biogasmängden sjönk dag 4-5 och dag 11-12 är att reaktorerna inte fick något substrat på helger varpå mängden producerad biogas sjönk.



Figur 4.2 Totala koncentrationen fria fettsyror i reaktor 1-4 under dag 1-14.

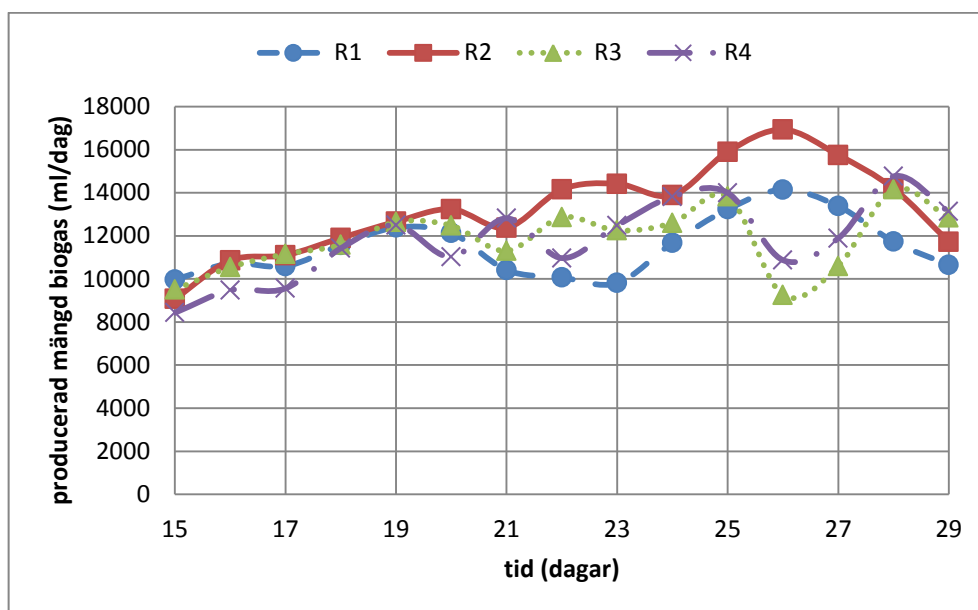
Temperaturen under uppstarten hölls konstant runt 37 °C enligt stektermometern som användes. Senare under försöken kontrollerades stektermometern mot referenstermometer varvid en temperaturskillnad på 2 °C visades. Därför köptes en ny termometer in som visade rätt temperatur och var kalibrerad från fabrik. Detta betyder att en temperatur analyserad under uppstart är 2 °C lägre än den verkliga. Således skedde uppstarten vid 39 °C istället för den planerade temperatur 37 °C. Därför användes senare under försöken reaktorn vid 39 °C som referensreaktor. Stektermometern användes fram till och med dag 28, dag 29 användes den nya korrekta termometern.

## 4.2 Pumpning av substrat, dag 15-29

Då reaktorerna producerade likvärdigt med biogas under dag 1-14 kopplades pumpar in för att kontinuerligt pumpa substrat. De ställdes in så att de skulle pumpa substrat var tredje timme. Innan pumparna började användas kalibrerades de genom att köras en timme åt gången och mäta hur mycket substrat de pumpade under tiden vid en viss hastighet. Baserat på detta beräknades sedan hur lång tid pumparna behövde vara igång för en viss belastning.

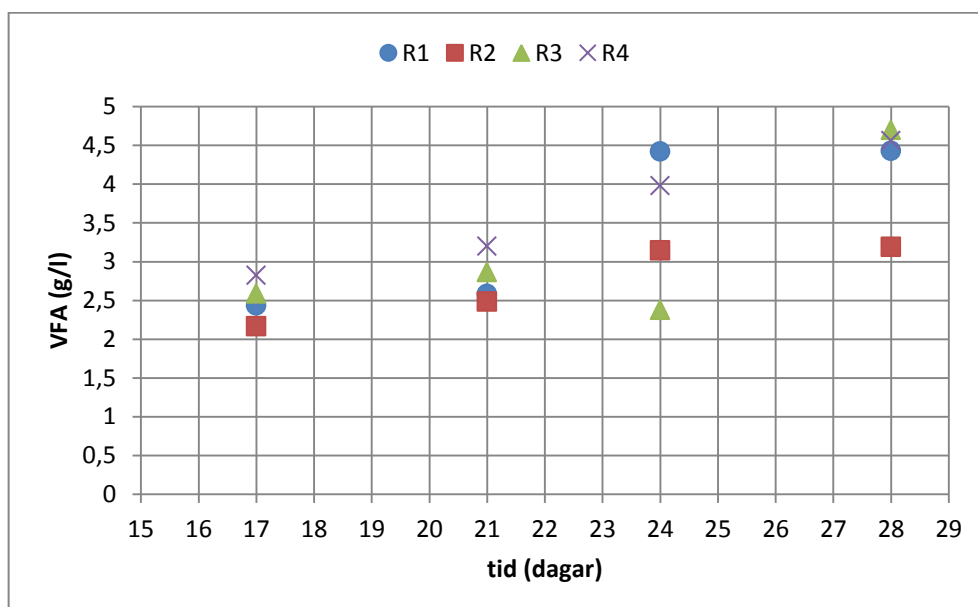
Till en början fungerade pumpningen bra men efter några dagar började slangarna som gick igenom pumpen att sätta igen och orsaka stopp. Detta innebar att reaktorerna inte fick lika mycket substrat vilket resulterade i ojämn biogasproduktion. Efter att ha försökt rensa slangarna och tvätta dem övergavs pumpning av substrat eftersom det inte var tillräckligt pålitligt. Mängden producerad biogas under perioden dag 15-29 visas i figur 4.3 nedan. Som syns i figur 4.3 var biogasproduktionen under dag 15-19 jämn mellan reaktorerna men från dag 20 var mängden producerad biogas ojämn. Under dag 29, den dag då pumpningen övergavs, kopplades även värmemantlarna på reaktor 1 och 2 för att se att de inte påverkade biogaspro-

duktionen samt att de kunde hålla en jämn temperatur. Samtidigt kopplades vattenbaden om så att reaktor 3 och 4 värmdes av varsitt vattenbad.



Figur 4.3 Producerad mängd biogas per dag under dag 15-29. Reaktorerna hade under dag 15-29 samma temperatur, 39 °C.

I figur 4.4 visas hur den totala koncentrationen av fria fettsyror var under tidsperioden dag 15-29. Som synes varierade koncentrationerna mellan reaktorerna vilket troligtvis beror på att de fick olika stor mängd substrat till följd av opålitlig pumpning. Om någon reaktor får mer eller mindre substrat påverkas även koncentrationen av fria fettsyror eftersom substratet har en högre koncentration fettsyror än vad miljön i reaktorerna normalt hade under försöken.

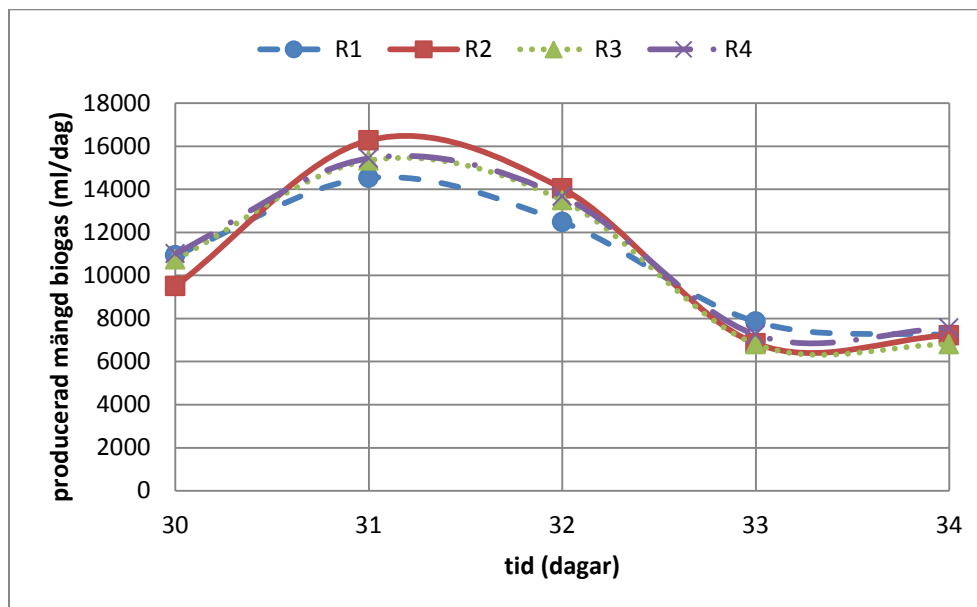


Figur 4.4 Totala koncentrationen fria fettsyror i reaktorerna 1-4 under dag 15-29. Reaktorerna hade under dag 15-29 samma temperatur, 39 °C.

### 4.3 Manuell matning, dag 30-34

Efter att pumpning övergavs under dag 29 återgick försöken att använda sig av manuell matning en gång per dag. För att säkerställa att detta fungerade kontrollerades biogasproduktionen under dag 30-34 för att visa att reaktorerna producerade lika mycket biogas. I figur 4.5 nedan visas resultaten av biogasproduktionen under dag 30-34. Biogasproduktionen likvärdig för reaktorerna vilket var önskvärt för att börja ändra temperaturen.

Under denna tid och även framöver under försöken (dag 30-103) användes värmemantlar till reaktor 1 och 2 och vattenbad till reaktor 3 och 4. Som synes påverkade inte värmningen produktionen av biogas utan den var fortsatt stabil och likvärdig mellan reaktorerna trots något olika typ av uppvärmning. Skillnaden i uppvärmning innebar att för reaktor 3 och 4 som värmdes med vattenbad var temperaturen något stabilare. Vid användning av värmemantel börjar värmemanteln värma då temperaturen var 0,2 °C under önskad temperatur och värme till dess att temperaturen var 0,2 °C över önskad temperatur. Det innebar att temperaturen kunde öka till 1 °C över den önskade då till exempel substrat tillsattes eftersom temperaturen då sjönk för att substratet höll en temperatur om ungefär 5 °C då det tillsattes. Värmemantlarna började då värma väldigt mycket eftersom temperatur sjönk mer än 0,5 °C.

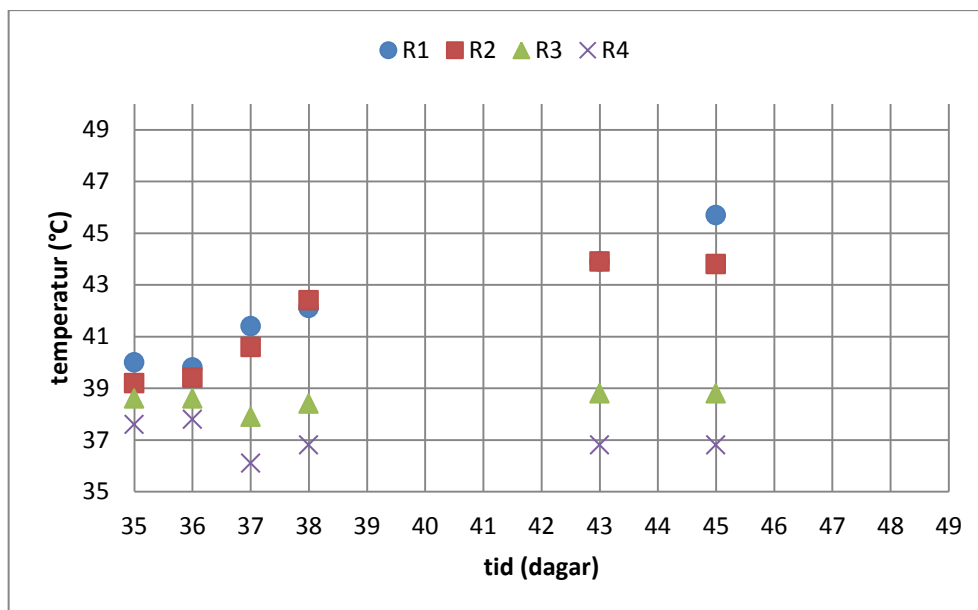


Figur 4.5 Producerad mängd biogas i reaktorerna 1-4 under dag 30-34. Reaktorerna hade under dag 30-34 samma temperatur, 39 °C.

### 4.4 Temperaturändring, dag 35-49

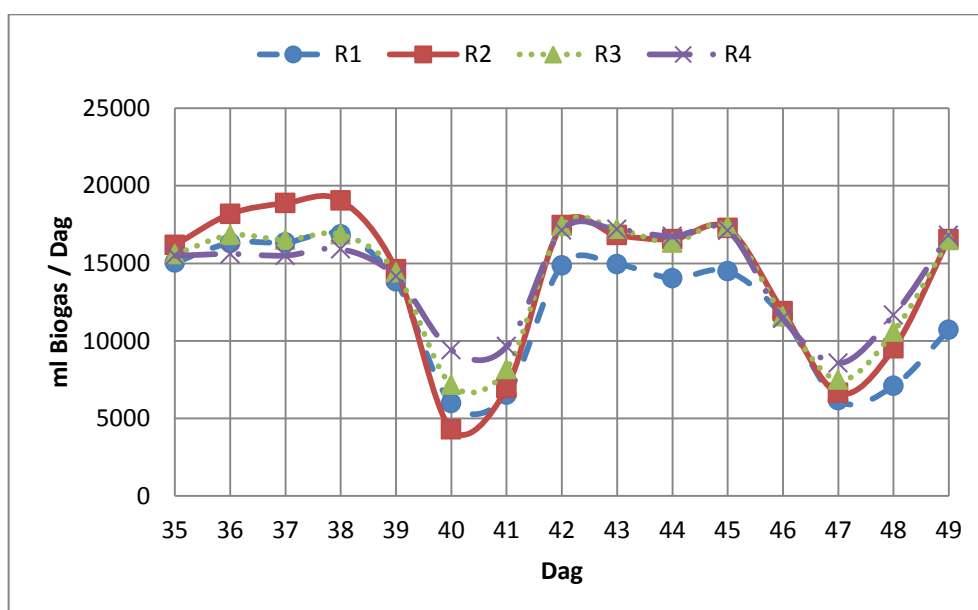
Efter att biogasproduktionen visats vara stabil och likvärdig för reaktorerna 1-4 samt att värmningen fungerade som önskat påbörjades temperaturändringen till de avsedda temperaturerna 49 °C, 44 °C, 39 °C och 37 °C för respektive reaktor 1-4. Temperaturen i reaktor 3 var redan 39 °C och ändrades därmed inte. Temperaturändringen skedde om 1 °C per dag förutom på helger då temperaturen inte ändrades. Under tiden som temperaturen ändrades hölls det främst koll på mängden producerad biogas, andelen fria fettsyror, temperatur och pH. De uppmätta temperaturerna visas i figur 4.6 nedan. Dag 49 ändrades temperaturen till de slutgiltiga avsedda temperaturerna.





Figur 4.6 Temperatur i reaktor 1-4 under dag 35-49. Temperaturen ändrades till de avsedda temperaturerna under denna tidsperiod.

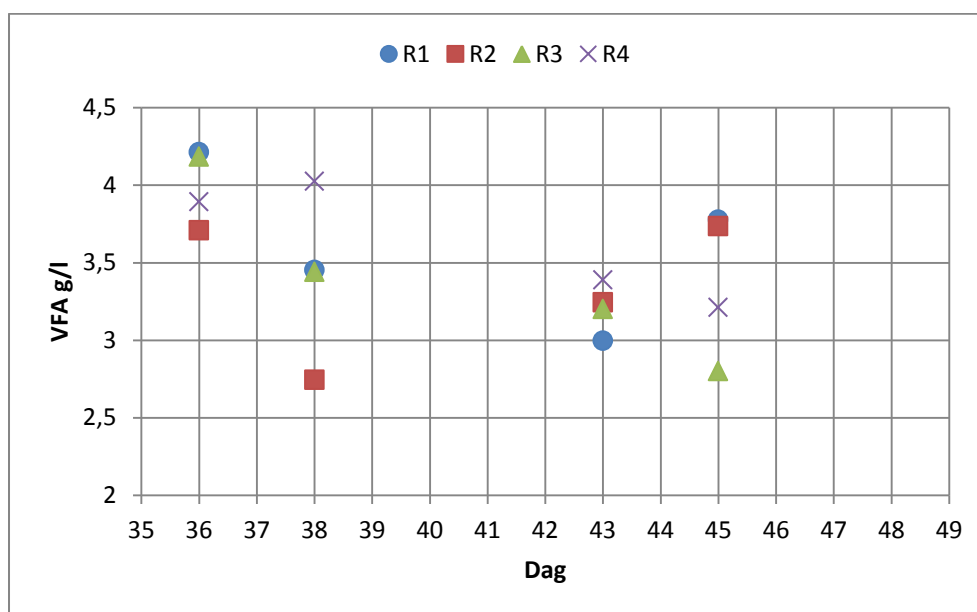
I figur 4.7 nedan visas mängden biogas producerad under temperaturförändringen till de avsedda temperaturerna. Som synes ökade reaktor 2 i biogasproduktion till en början innan den under några dagar producerade något mindre. I takt med att temperaturen i reaktor 1 blev allt högre producerade den märkbart mindre biogas än de andra reaktorerna. Detta var väntat eftersom de mikroorganismerna störs mer av en större temperaturökning och bör därför producera mindre biogas än de i reaktorer som påverkas av ingen eller mindre temperaturändring. Reaktor 3 och reaktor 4 var likvärdiga under temperaturförändringen i avseendet producerad mängd biogas och det var som väntat eftersom reaktor 3 inte förändrades något i temperatur och reaktor 4 endast sänktes två grader till 37 °C.



Figur 4.7 Producerad mängd biogas under dag 35-49. Under tidsintervallet ändrades temperaturerna till de avsedda i reaktorerna (49 °C, 44 °C, 39 °C och 37°C för reaktor 1-4).

Som synes minskade mängden biogas under några dagar då temperaturen ökade. En temperaturvariation i en process bidrar ofta till instabilitet vilket inte är önskvärt i en verklig process. Försöken gjorda i denna studie visar på att mängden producerad biogas minskar till en följd av en temperaturförändring vilket inte är önskvärt i en verklig process eftersom det eftersträvas att producera så mycket biogas som möjligt. En störning av processen är inte effektivt och bidrar till att mikroorganismerna inte kan bryta ner substrat lika fort som vid stabil temperatur. Dag 39-40 och dag 46-47 minskade biogasproduktionen vilket beror på att reaktorerna inte fick något substrat under helger vilket leder till minskad mängd biogas.

I figur 4.8 visas hur de fria fettsyrorerna förändrades under dag 35-49. Som synes ökade reaktor 1 och 2 något samtidigt som reaktor 3 och 4 faktiskt minskade något i andelen fria fettsyror jämfört med startvärdena för tidsperioden. Att de fria fettsyrorerna ökar i de reaktorer där temperaturen ändras mer är väntat eftersom mikroorganismerna inte är anpassade till de temperaturerna och därmed har svårare att omvandla substrat till biogas. Om koncentrationen fria fettsyror ökar betyder det att mikroorganismerna inte hinner omvandla det till biogas. Dag 36 var de fria fettsyrorerna höga jämfört med senare vad de visade senare. Det kan bero på att mikroorganismerna fortsatt att anpassa sig till de nya förhållandena. Den största ökningen av fria fettsyror kom först efter att temperaturen ökats vilket kan bero på en fördröjd effekt eftersom de fria fettsyrorerna först måste ansamlas innan det visar sig vid mätning av dem.



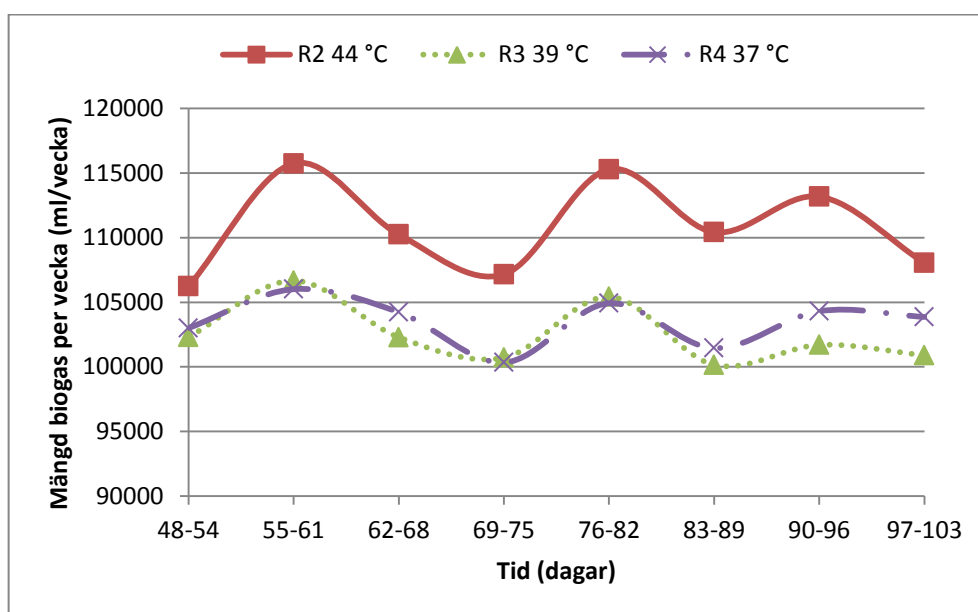
Figur 4.8 Total koncentration av fettsyror i reaktor 1-4 under temperaturförändring till de avsedda temperaturerna i reaktorerna.

#### 4.5 Försök vid avsedda temperaturer, dag 50-103

Då uppstarten var avklarad och reaktorerna antagit de avsedda temperaturerna 49 °C, 44 °C, 39 °C och 37 °C för respektive reaktor 1-4 inleddes försöken vid de avsedda temperaturerna. Försöken syftade då till att studera hur processen anpassas till de nya temperaturerna i avseendet processtabilitet och producerad mängd biogas. Under försöken vid de avsedda temperaturerna presenteras endast resultat för reaktor 2-4 eftersom reaktor 1 tyvärr sprack under dag 52.

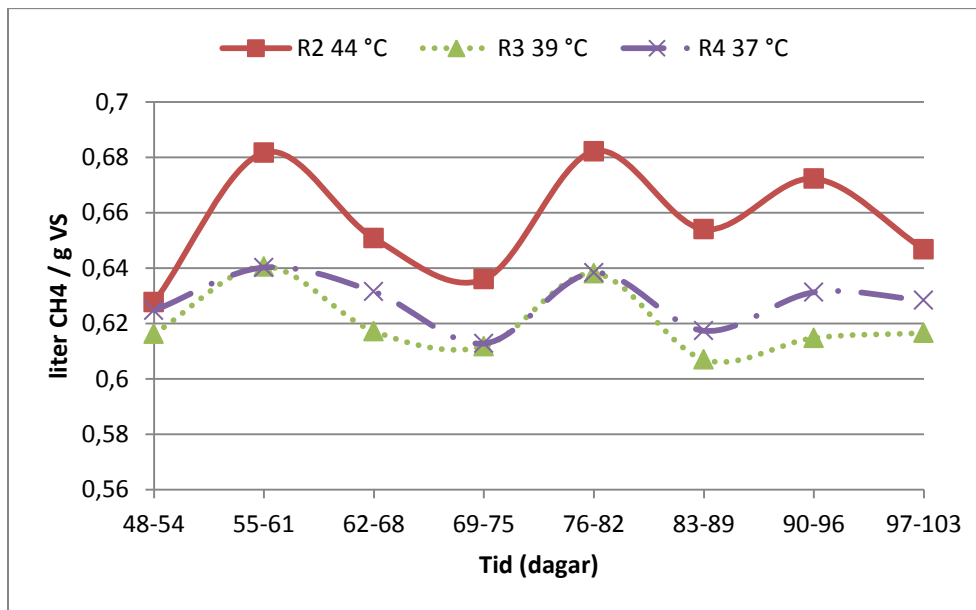
### 4.5.1 Biogasproduktion

Biogasproduktionen under dag 48-103 presenteras i figur 4.9 nedan. Anledningen till att dag 48 och 49 också presenteras är för att få hela veckor att presentera i grafen. För de tre reaktorer som presenteras hade de rätt temperatur under dag 48 och 49 men reaktor 1 som tyvärr gick sönder var inte vid rätt temperatur. Reaktor 2 producerade mer biogas än de andra två reaktorerna under given period. En variation i mängd producerad biogas finns från vecka till vecka och tycks variera på samma sätt för alla tre reaktorer samtidigt. Det kan bero på skillnad på substrat från vecka till vecka som reaktorerna matades med eftersom det är den enda yttre betingelsen som märkbart förändrades. Trots att substratet försöktes hållas vid en jämn nivå med avseende på TS/VS kan en viss skillnad ändå ha förekommit genom att det tillsattes olika mängd glycerol olika veckor. Mängden biogas var som sagt högre vid 44 °C jämfört med de lägre temperaturerna 37 °C och 39 °C vilket även tidigare forskning har visat (Moestedt, et al., 2014; Westerholm, et al., 2015). Med utgångspunkt i producerad mängd biogas kan det vara bättre att använda sig av en högre temperatur.

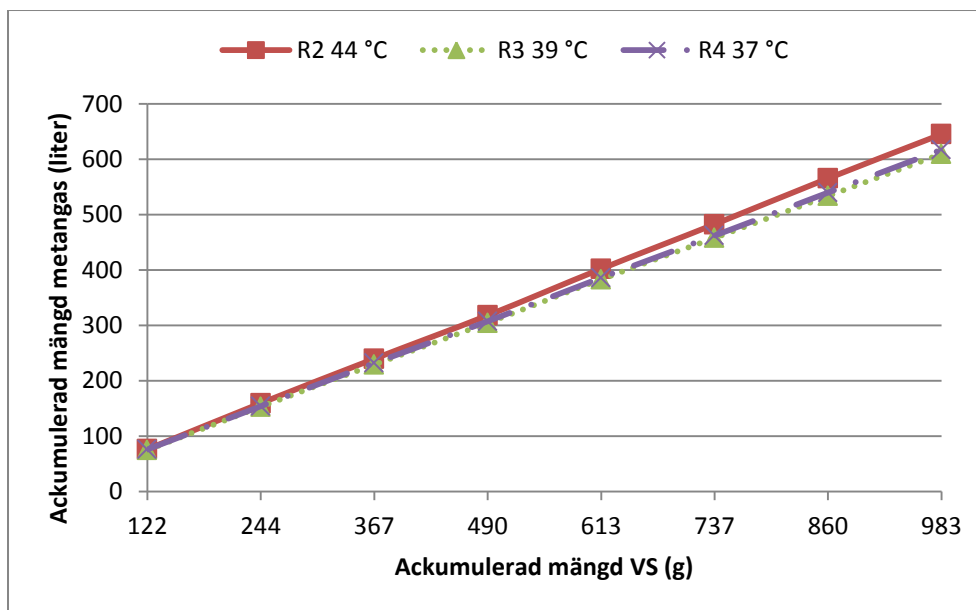


Figur 4.9 Producerad mängd biogas per vecka för respektive reaktor under dag 48-103. Det har använts dag 48-103 för att få med hela veckor. Dagarna är indelad i veckor för att få en bättre uppfattning om mängden producerad biogas. Temperaturen för reaktorerna var 44 °C, 39 °C och 37°C för reaktor 2-4.

I figur 4.10 visas hur mycket metangas som producerats per tillsatt gram organisk substans (VS). Här syns att reaktor 2 producerade mer metangas per gram organisk substans samtidigt som reaktor 3 och 4 ligger något lägre. Här har hänsyn tagits till metanhalten i den producerade mängden biogas, hur mycket biogas som producerats och hur mycket substrat som tillsats. Mängden substrat som tillsats har varit densamma för reaktorerna under försöken.



Figur 4.10 Mängd producerad metangas per tillsatt gram organisk substans. Temperaturen för reaktorerna var 44 °C, 39 °C och 37 °C för reaktor 2-4.



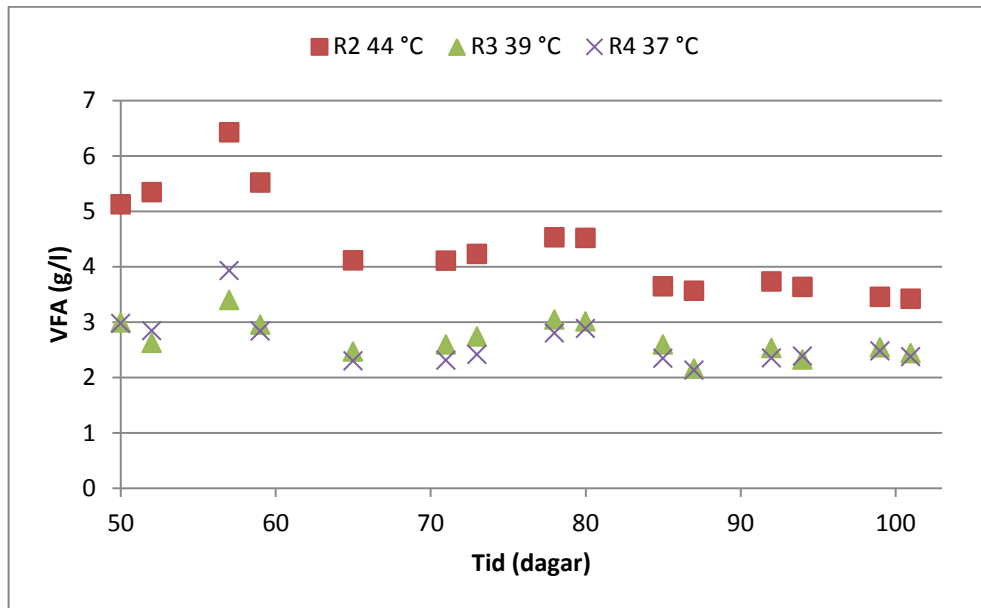
Figur 4.11 Mängd ackumulerad producerad gas per mängd ackumulerad VS. Varje mätpunkt ackumulerad mängd VS motsvarar 7 dagar likt figur 4.10.

Som visas i figur 4.11 ökar mängden metangas linjärt med mängden VS. Här visas den ackumulerade mängden VS jämfört med ackumulerade mängden metangas. Detta visar att totalt har det producerats mer metangas per gram VS vid den högre temperaturen i reaktor 2 jämfört med de andra två reaktorerna som körts vid lägre temperaturer.

#### 4.5.2 Fria fettsyror och NH<sub>4</sub>-N

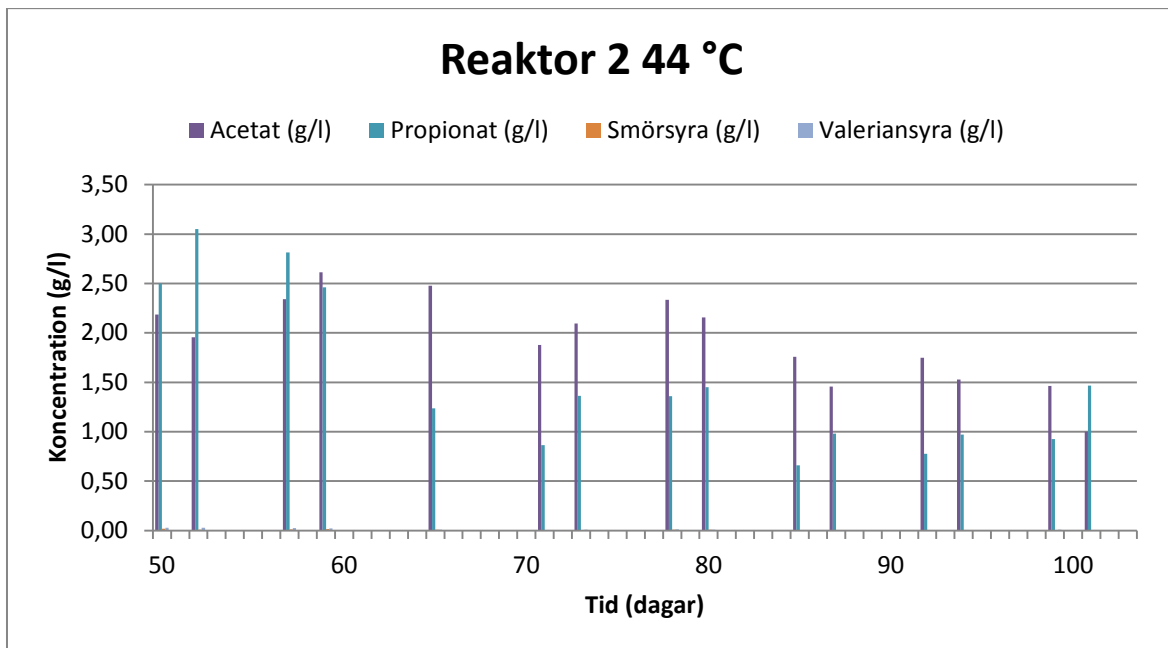
I figur 4.12 visas koncentrationen av de fria fettsyrorerna (VFA) för reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103. Här ses att koncentrationen VFA var högre för reaktor 2 under hela försöksperioden vid avsedda temperaturer. För reaktor 3 och 4 var koncentrationerna i det närm-

aste lika under försöket. I figur 4.12–4.14 visas koncentrationen av de olika fria fettsyrorna acetat, propionat, butansyra och pentansyra.

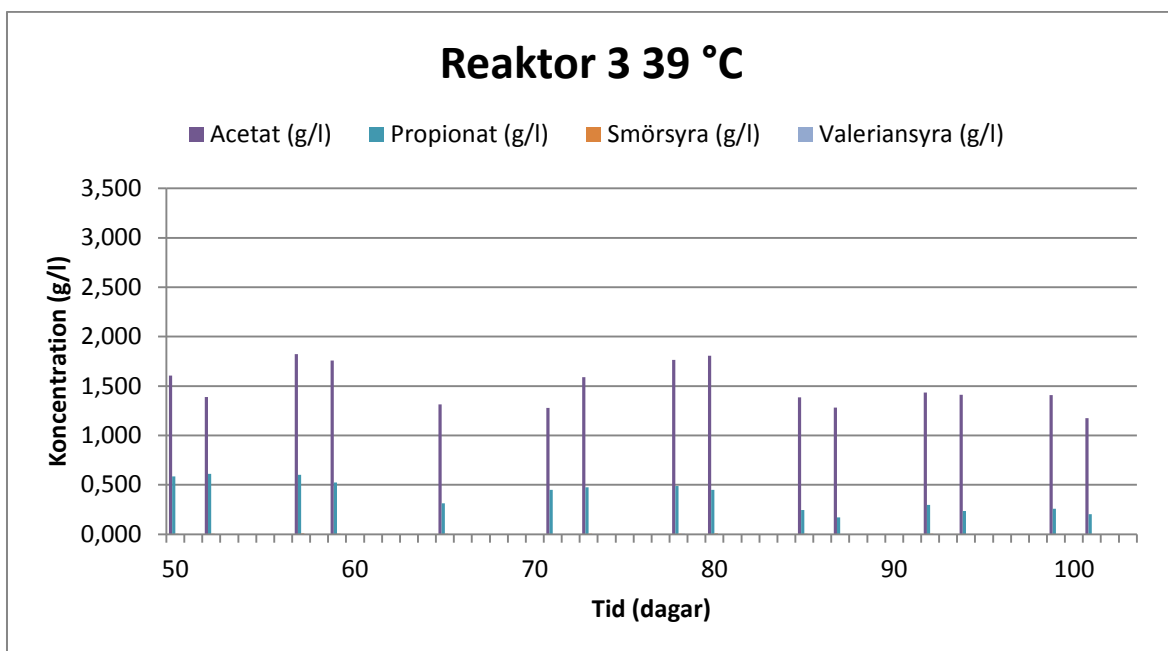


Figur 4.12 Totala koncentrationen av fria fettsyror i reaktor 2-4 för tidsperioden dag 50-103.

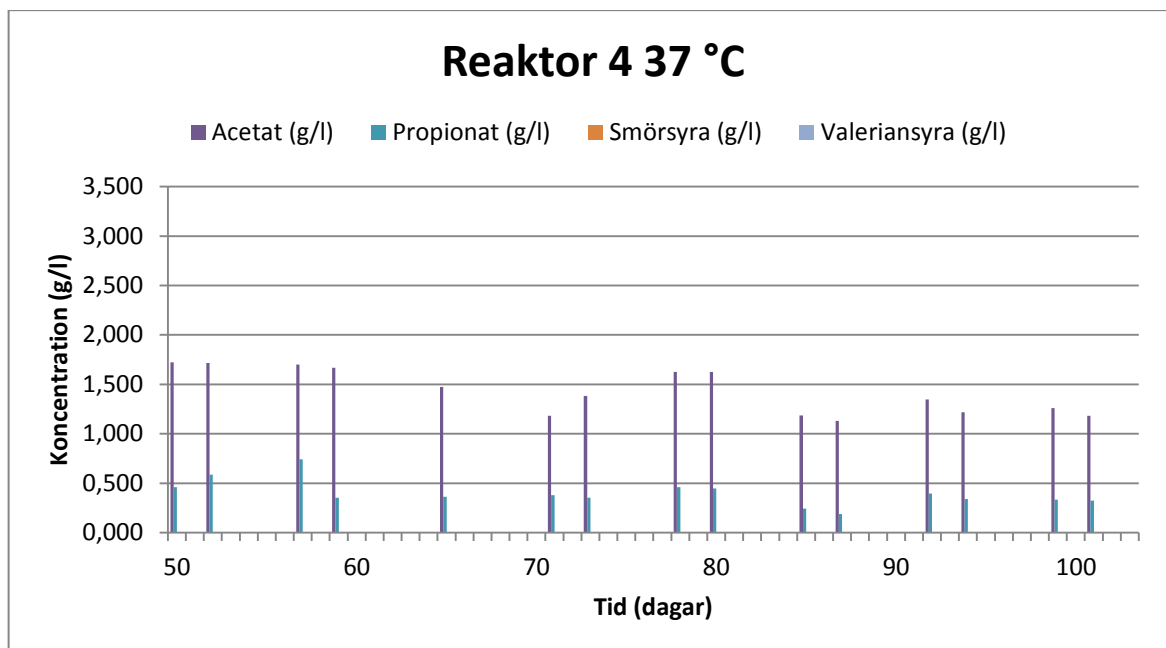
Koncentrationerna av acetat och propionat var under försöket högre för reaktor 2 jämfört med reaktor 3 och 4. I reaktor 3 och 4 var koncentrationerna likvärdiga samtidigt som de ökade initialt för reaktor 2. Efterhand som mikroorganismerna anpassade sig minskade koncentrationen av acetat till en nivå likvärdig reaktor 3 och 4. Koncentrationen av propionat var högre i reaktor 2 än reaktor 3 och 4 under hela försöken men avtog även den med tiden. Butansyra och pentansyra var även de initialt högre efter temperatur förändring i reaktor 2 än de andra två reaktorerna. Efterhand sjönk koncentrationerna till en nivå sådan att koncentrationerna var likvärdiga mot slutet av försöken i alla reaktorerna med avseende på butansyra och pentansyra.



Figur 4.13 Koncentration av specifika fria fettsyror för reaktor 2 under tidsperioden dag 50-103. Reaktor 2 hade en temperatur på 44 °C under tidsperioden.

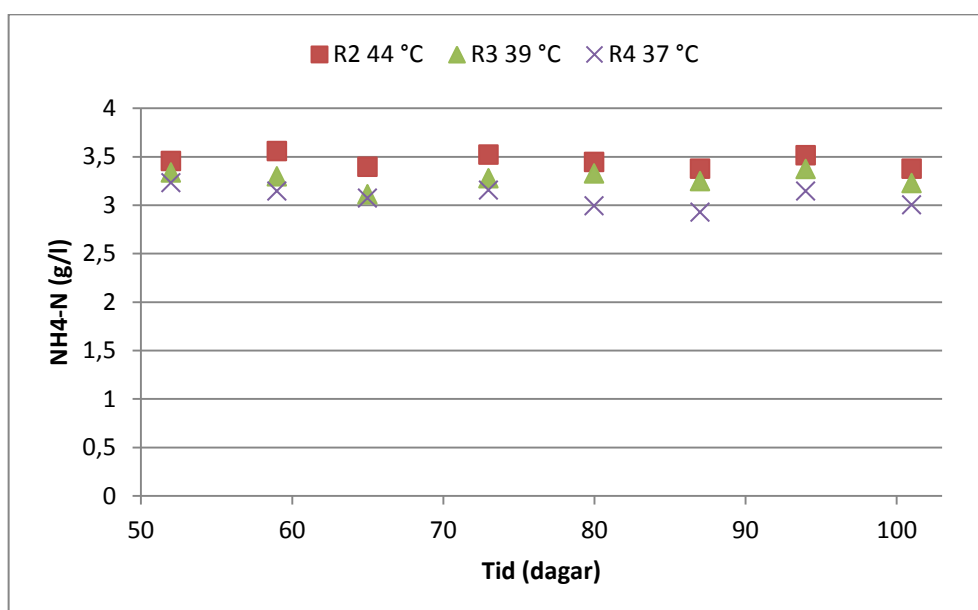


Figur 4.14 Koncentration av specifika fria fettsyror för reaktor 3 under tidsperioden dag 50-103. Reaktor 3 hade en temperatur på 39 °C under tidsperioden.



Figur 4.15 Koncentration av specifika fria fettsyror för reaktor 4 under tidsperioden dag 50-103. Reaktor 4 hade en temperatur på 37 °C under tidsperioden.

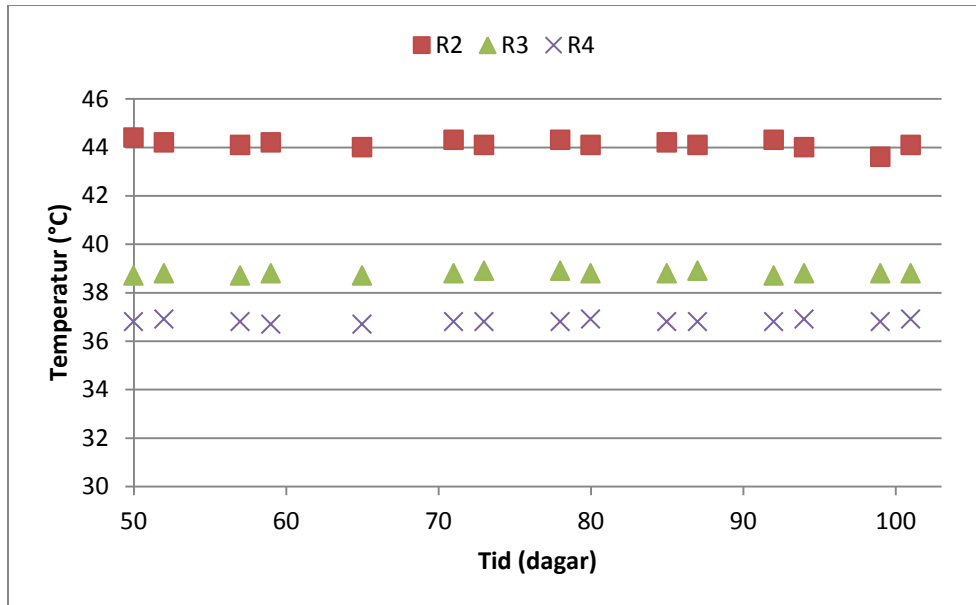
I figur 4.16 visas koncentrationen av  $\text{NH}_4\text{-N}$  under tidsperioden dag 50-103. Koncentrationerna var på en stabil nivå för respektive reaktor under hela försöket och varierade inte nämnvärt. Det syns i figur 4.16 att koncentrationen varierar med temperaturerna i reaktorerna, reaktor 2 som hade högst temperatur har även högre koncentration  $\text{NH}_4\text{-N}$  och reaktor 4 som hade lägst temperatur hade även lägst koncentration  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Detta visades även i en studie av Moestedt et al. (2014) att reaktor med högre temperatur hade högre koncentration av ammonium. Att koncentrationen av ammonium är högre vid högre temperatur beror på högre nedbrytningsgrad (visas nedan under TS/VS test). Bryts mer organiskt material ner frigörs även mer kväve och därmed ammonium.



Figur 4.16 Koncentrationen  $\text{NH}_4\text{-N}$  i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103.

### 4.5.3 Temperatur och pH

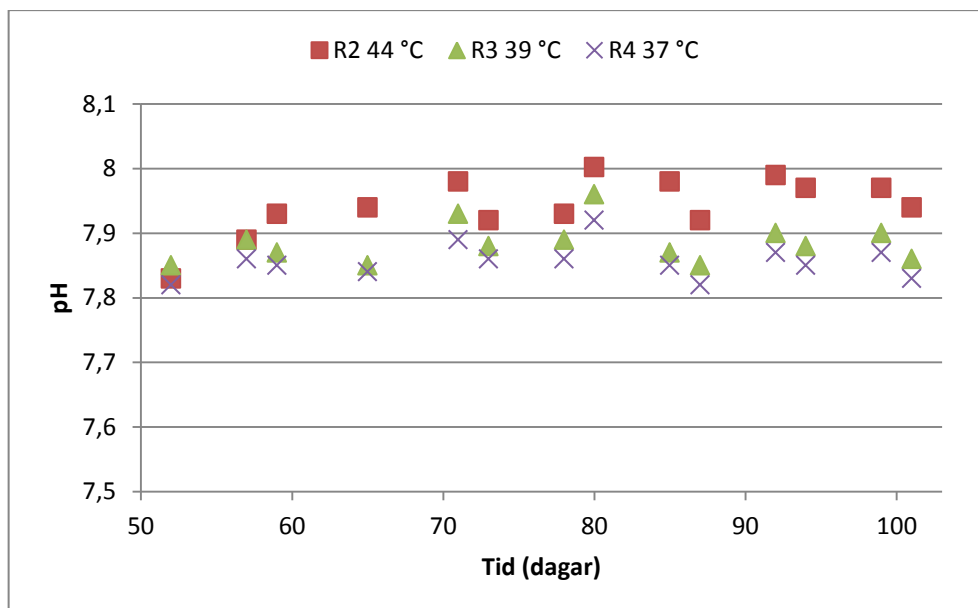
I figur 4.17 visas de uppmätta temperaturerna för reaktorerna 2-4 under försöket vid avsedda temperaturer under dag 50-103. Som syns var temperaturen stabil och låg på en jämn nivå under hela försöket. Att temperaturen låg på en jämn nivå och inte varierade är gynnsamt för att mikroorganismerna ska kunna anpassa sig och optimeras till de förhållanden de är satta att producera biogas under.



Figur 4.17 Uppmätt temperatur i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103.

I figur 4.18 visas de uppmätta pH halterna i reaktor 2-4 under dag 50-103. pH var stabil under försöken och låg för alla reaktorer mellan 7,8 och 8,0. pH var något högre för reaktorn med högre temperatur. Att alla reaktorer låg på en stabil nivå omkring 8 i pH indikerar att det varit bra förutsättningar för mikroorganismerna. Att pH inte varierar är precis som för temperaturen viktigt för att mikroorganismerna ska kunna anpassa sig och producera biogas vid givna temperaturerna. Om pH hade avvikit eller sjunkit för mycket hade mikroorganismerna kunnat skadas och leda till celledöd eftersom de inte trivs vid ogynnsamma förhållanden. Detta har inte varit något problem under försöken.

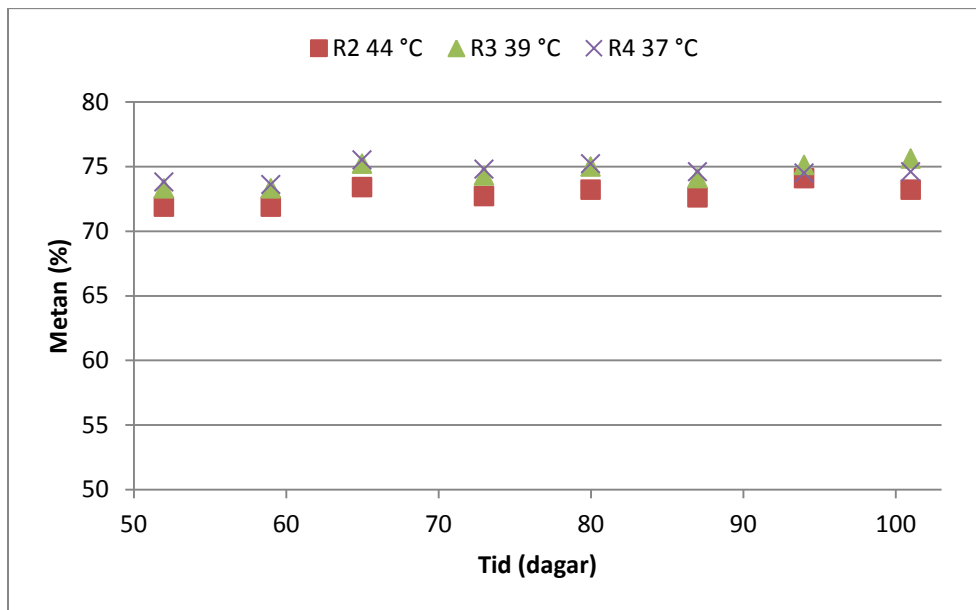




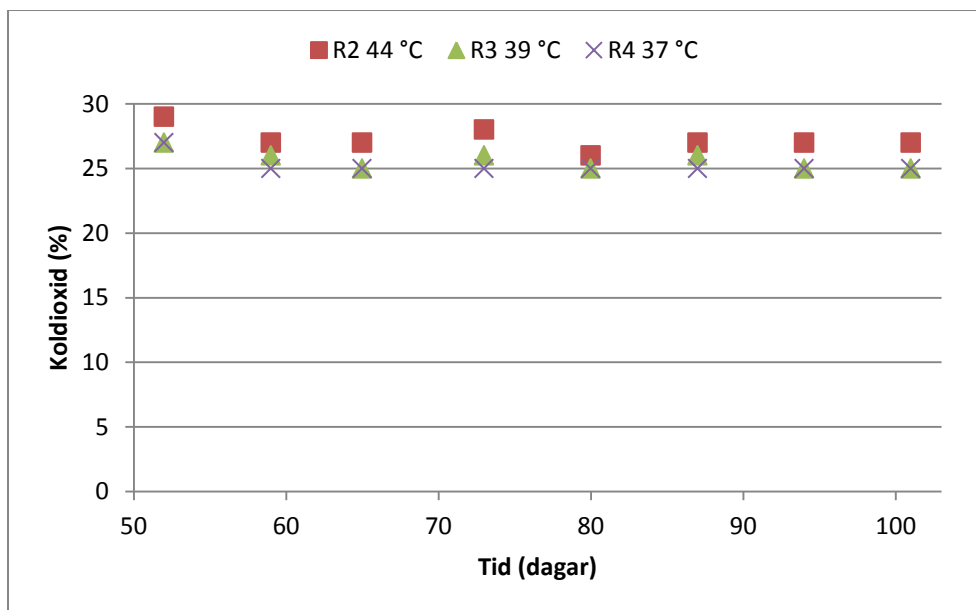
Figur 4.18 Uppmätt pH i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103.

#### 4.5.4 Biogasens sammansättning

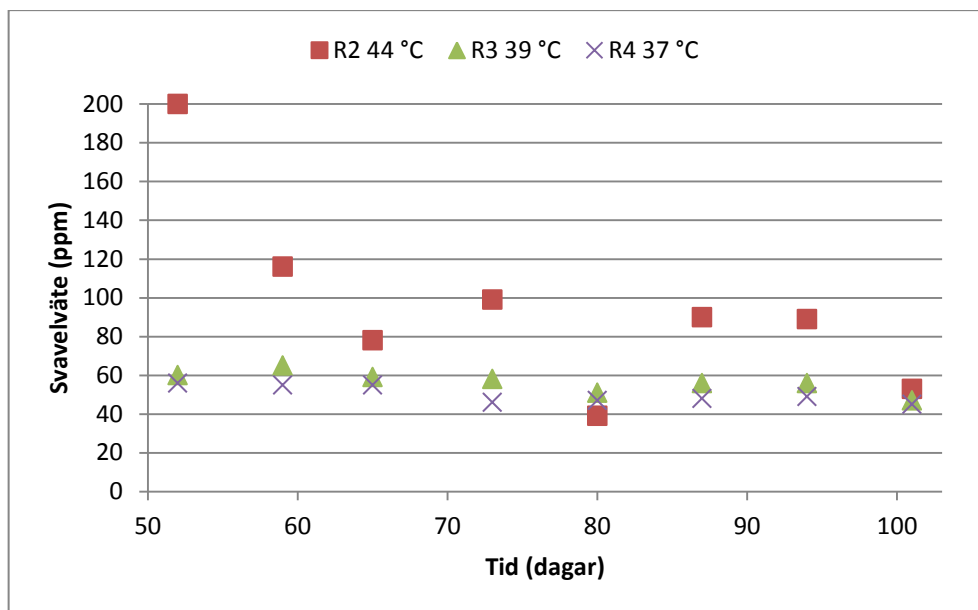
I figur 4.19–4.21 visas biogasens sammansättning vad gäller metangas, koldioxid och svavelväten. Högst metanhalt hade biogasen i reaktor 4 följt av biogasen i reaktor 3 och lägst metanhalt hade biogasen i reaktor 2. Metanhalten ökade med tiden, från det att försöken startade, i alla tre reaktorer vilket kan bero på att mikroorganismerna anpassade sig till sina temperaturer och förutsättningar med tiden. Mängden koldioxid var således högre i reaktor 2 och lägre i reaktor 3 och 4. Mängden svavelväte var högre i reaktor 2 än i de andra två reaktorerna. Halterna var aldrig så höga att de skulle ha kunnat bidra med några problem utan var under hela försöket på en relativt låg nivå. De uppmätta metanhaltarna kan vara något överskattade. Jämförelse gjordes att mäta gasens sammansättning före och efter det att substrat tillsattes. Det visade att metanhalten efter tillsats av substrat var något lägre. Metanhalten var efter tillsats av substrat i reaktorerna omkring 1,5 % lägre. Skillnaden var lika mellan reaktorerna. Metanhalten ligger i anläggningen normalt omkring 65-72 % vilket alltså betyder att metanhaltarna i försöken är något högre än i verkliga processen (Bioenergy, 2014).



Figur 4.19 Metangashalten i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103. Temperaturen för reaktorerna var 44 °C, 39 °C och 37 °C för reaktor 2-4.



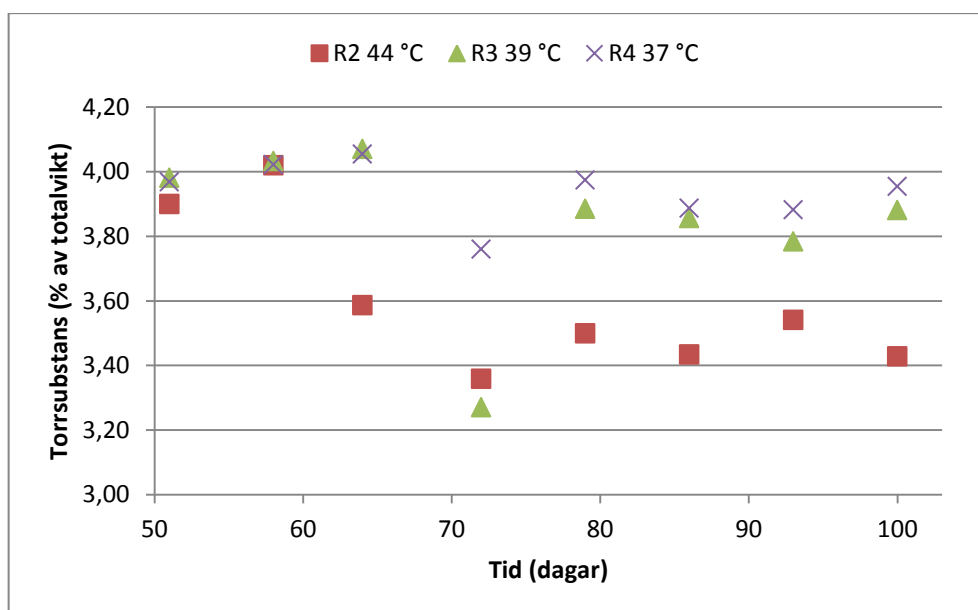
Figur 4.20 Koldioxidhalten i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103. Temperaturen för reaktorerna var 44 °C, 39 °C och 37 °C för reaktor 2-4.



Figur 4.21 Halten svavelväte i reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103. Temperaturen för reaktorerna var 44 °C, 39 °C och 37 °C för reaktor 2-4.

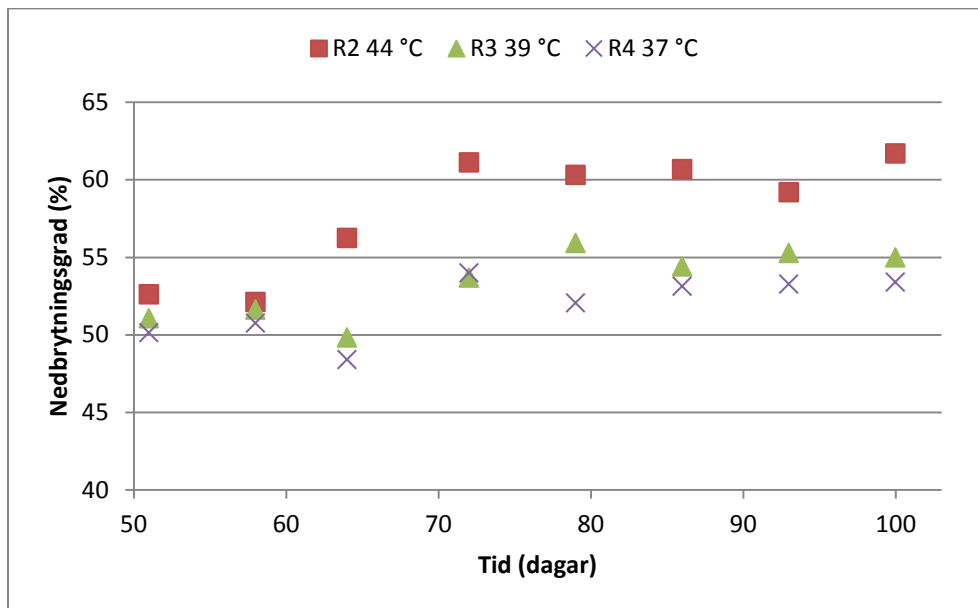
#### 4.5.5 TS/VS test

För att undersöka hur stor andel som bestod av torrsvikt genomfördes tester där prover först torkades i 105 °C i 24 timmar varefter de brändes i 550 °C i två timmar. Efter att ha torkat i 24 timmar anses endast torrsubstansen återstå. Andelen torrsubstans som % av den totala provvikten visas i figur 4.22 nedan. Här visas att reaktor 2 hade en något lägre torrsubstans än reaktor 3 och 4. Detta innebär att i reaktor 2 kan mer material ha brutits ner än i reaktor 3 och 4. Detta stämmer väl överens med diskussionen om högre ammoniumkoncentration ovan och även högre biogasproduktion. Om mer biogas bildas bör även mer organiskt material ha brutits ner. Så även vad gäller koncentration av ammonium, en högre nedbrytningsgrad leder till ökat koncentration av ammonium eftersom mer kväve frigörs från det organiska materialet.



Figur 4.22 TS i % av totalvikt för reaktorerna 2-4 under tidsperioden dag 50-103.

I figur 4.23 visas nedbrytningsgraden för de olika reaktorerna. Som syns vad nedbrytningen högst i reaktor 2 som även producerade mer biogas. Enligt resonemanget ovan stämmer det bra överens med både biogasproduktion och koncentration av ammonium att nedbrytningen faktiskt var högre för reaktor 2 jämfört med reaktor 3 och 4.



Figur 4.23 Nedbrytningsgrad för reaktorerna vid avsedda temperaturer 44 °C, 39 °C och 37 °C för respektive reaktor 2-4

#### 4.5.6 Energiberäkning

Energiberäkningar presenteras i sin helhet i appendix I. De visade att det för en uppskalad process var fördelaktigt att höja temperaturen. Det vill säga att mer energi bildas i form av metangas än vad som behövs för att värma upp substratet och hålla den temperaturen. I tabell 4.1 visas hur mycket mer energi som behöver tillföras, hur mycket större energiförlusterna blev samt hur mycket mer energi i form av metangas som producerades för en uppskalad reaktor.

Tabell 4.1 Tabellen visar hur mycket mer energi det behöver tillföras för att uppnå en högre temperatur samt hur mycket mer eller mindre energi som produceras i form av metangas.

	37→39°C	37→44 °C
Tillförd mängd energi	180 MWh/år	630 MWh/år
Energiförluster	12 MWh/år	43 MWh/år
Mängd energi producerad via biogas	- 480 MWh/år	2020 MWh/år
Mängd energi förbrukad minus mängd energi producerad	- 672 MWh/år	1347 MWh/år

Som visas i tabellen skulle det inte vara fördelaktigt att använda sig av 39 °C istället för 37 °C. I verkligheten är det troligtvis inte så stor skillnad mellan de båda temperaturerna utan kan vara tillfälligheter som gjort att det producerats något mer biogas vid 37 °C jämfört med 39 °C. Vid 44 °C producerades däremot betydligt mer biogas än vid de andra två temperaturerna. För beräkningar av energier se appendix A.



## 5 Slutsatser

En höjning av processtemperatur vid rötning och produktion av biogas ledde initialt till att mikroorganismerna blev mindre effektiva under en tidsperiod och därmed producerade mindre biogas. Efterhand som mikroorganismerna anpassade sig till sin nya förutsättning producerades mer biogas vid 44 °C än vid 37 °C och 39 °C. Metanhalten i biogasen som produceras vid 44 °C var lägre än vid de två lägre temperaturerna 37 °C och 39 °C, men sammantaget producerades mer metangas vid högre temperatur. Det visades även att varken ammonium eller fria fettsyror kom upp i sådana koncentrationer att de störde processen genom inhibering eller förändring av pH.

Energiberäkningar visar att det för en uppskalad version skulle vara energimässigt försvarbart att producera biogas vid en högre temperatur. Mer energi fås ut i form av metangas än vad som behövs för att värma och hålla den högre temperaturen.

Sammantaget är det bättre sett till de parametrar som studerats att producera biogas vid 44 °C jämfört med 37 °C och 39 °C eftersom det är energimässigt gynnsamt samt att mer metangas kan utvinnas med hjälp av samma mängd substrat. Att ha en temperaturvariation vid produktion av biogas är inte gynnsamt eftersom det leder till lägre mängd producerad biogas som följd av ineffektiva mikroorganismer under anpassningsperioden. Att producera biogas vid en högre temperatur som 44 °C skulle dels ge mer biogas och dels utesluta problemet med variation i temperatur vid rötning.





## 6 Förslag på förbättringar och vidare forskning

Vidare forskning bör fokusera på att dels se hur högt i temperatur processen kan förändras utan att processen förstörs. I denna studie sprack reaktor för 49 °C vilket var synd eftersom den uppvisade beteende på att ha fått en för stor förändring i temperatur på grund av ökad koncentration fria fettsyror. Förslag kan även vara att undersöka om en högre temperatur skulle klara av högre belastning än vid lägre temperatur. Att dessutom jämföra mellantemperaturer som ligger närmre varandra i temperatur än vad som gjorts i detta försök hade varit intressant för att få en bred bild av de olika temperaturerna. Att till exempel jämföra 37 °C med 40 °C, 42 °C och 44 °C skulle kunna ge god förståelse om hur varje grad Celsius påverkar rötningen av substrat.



## 7 Litteraturförteckning

Bioenergy, I., 2014. *MORE THAN 10 YEARS PRODUCTION OF FOSSIL FREE AUTOMOTIVE FUEL AND CERTIFIED DIGESTATE FROM FOOD WASTE*, Ireland: IEA Bioenergy.

Energigas Sverige, 2016. *Biogasportalen*. [Online]  
Available at: <http://www.biogasportalen.se/FranRavaraTillAnvandning/VadArBiogas/Energiinnehall>  
[Använd 25 04 2016].

E. S., 2015. *Biogasportalen*. [Online]  
Available at: <http://biogasportalen.se/FranRavaraTillAnvandning/Produktion/Uppgradering>  
[Använd 3 5 2016].

Harrysson, J., 2015. *Produktion och användning av biogas och rötresten år 2014*, Eskilstuna: Statens Energimyndighet.

Jarvis, Å. & Schnürer, A., 2009. *Rapport SGC 207 Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. u.o.:Svenskt Gastekniska Center AB.

Jonstrup, M., Murto, M. & Björnsson, L., 2010. *Environmental Biotechnology*. 2nd red. Lund: Department of Biotechnology, LTH.

Jordbruksverket, 2015. *Jordbruksverket*. [Online]  
Available at: <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/djur/produkterfrandjur/animaliskabiprodukter.4.67e843d911ff9f551db80002182.html>  
[Använd 13 5 2016].

Jung, K. K., Baek, O. R., Young, C. N. & Si, K. W., 2006. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Volym 102, pp. 328-332.

Mata-Alvarez, J., 2003. *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. 1st red. Padstow: IWA Publishing.

Moestedt, J., Nordell, E. & Schnürer, A., 2014. Comparison of operating strategies for increased biogas production from thin stillage. *Journal of Biotechnology*, Volym 175, pp. 22-30.

OX2, 2016. *OX2*. [Online]  
Available at: <http://www.ox2.com/bioenergi/anlaggningar/biogas/>  
[Använd 09 04 2016].

Swedisol, 2016. *Swedisol*. [Online]  
Available at: [http://www.swedisol.se/sites/default/files/undersidor/filer/pdf\\_bilaga\\_A.pdf](http://www.swedisol.se/sites/default/files/undersidor/filer/pdf_bilaga_A.pdf)  
[Använd 19 5 2016].

Westerholm, M., Müller, B., Isaksson, S. & Schnürer, A., 2015. Trace element and temperature effects on microbial communities and links to biogas digester performance at high ammonia levels. *Biotechnology for biofuels*, Volym 8, pp. 1-19.

# 8 Appendix

## 8.1 Appendix A

### Laboratorieförsök

För att beräkna specifik värmekapacitet för ett substrat med en viss torrsubstanshalt (TS %) används ekvation (6) nedan där TS är mängden torrsubstans i substratet uttryckt i procent.

$$Cp_s = \frac{(100-TS) \cdot 4180 + TS \cdot 1050}{100} J/kg K \quad (6)$$

För att beräkna hur mycket energi som krävs för att värma en viss mängd substrat från en temperatur  $T_1$  till en temperatur  $T_2$  används ekvation (7) nedan. Massflödet  $m$  anges i kg/dag,  $C_p$  anges i J/kg K och temperaturen anges i °C.  $Q$  är den energi som behöver tillföras och anges i enheten J/dag.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) J/dag \quad (7)$$

För att räkna om  $Q$  till enheten kWh/dag från J/dag används ekvation (8) nedan.

$$\frac{Q J/dag \cdot 365 \text{ dagar/år}}{1000 J/kJ \cdot 3600 \text{ sekund/timme}} = kWh/år \quad (8)$$

För att beräkna hur mycket energiförlust som finns i form av konvektion från reaktorerna används ekvation (9) nedan.  $Q_L$  anger hur mycket energiförlusten är i J/dag,  $k$  är värmegenomgångstalet och anges i enheten W/m<sup>2</sup> K,  $A$  är arean för givet reaktor kärl angivet i m<sup>2</sup>,  $T_{ute}$  är temperaturen på omgivningen given i °C och  $T_{reaktor}$  är temperaturen i reaktorn givet i °C.

$$Q_L = k \cdot A \cdot (T_{ute} - T_{reaktor}) \quad (9)$$

Substratet som användes i laboratorieförsöken hade ett TS-värde på 8,8 %. Genom att ansätta TS till 8,8 i ekvation (3) ges den specifika värmekapaciteten,  $C_p$ .  $C_p$  antogs vara konstant vid de temperaturer som undersökts i detta examensarbete.

$$Cp_{8,8\%} = \frac{(100-8,8) \cdot 4180 + 8,8 \cdot 1050}{100} J/kg K = 3904,56 J/kg K$$

Hur mycket energi som behövde tillsättas de olika reaktorerna beräknas sedan genom att använda  $Cp_{8,8\%}$  i ekvation (6). Substratet som ska värmas upp varje dag förvarades i kylskåp varpå det antogs hålla en temperatur på 5 °C då det börjar värmas upp till givna temperaturer om 37 °C, 39 °C och 44 °C. Mängden substrat som tillsattes varje dag var i snitt 0,2 kg/dag. För att räkna om J/dag till kWh per år användes ekvation (8).

$$Q_{37^\circ C} = 0,2 \text{ kg/dag} \cdot 3904,56 J/kg K \cdot (37 - 5) = 24989,184 J/dag$$

$$Q_{37^\circ C} = \frac{24989,184 \cdot 365}{1000 \cdot 3600} = 2,534 kWh/år$$

$$Q_{39^\circ C} = 0,2 \text{ kg/dag} \cdot 3904,56 J/kg K \cdot (39 - 5) = 26551,008 J/dag$$

$$Q_{39^\circ C} = \frac{26551,008 \cdot 365}{1000 \cdot 3600} = 2,692 kWh/år$$

$$Q_{44^{\circ}\text{C}} = 0,2 \text{ kg/dag} \cdot 3904,56 \text{ J/kg K} \cdot (44 - 5) = 30455,568 \text{ J/dag}$$

$$Q_{44^{\circ}\text{C}} = \frac{30455,568 \cdot 365}{1000 \cdot 3600} = 3,088 \text{ kWh/år}$$

Energiförlusten som avges från var reaktor i form av konvektion beräknas med ekvation (9). Arealen av reaktorerna beräknas med höjden 20cm och radien 8,5cm. Värmeledningskoefficienten antogs vara densamma som för de verkliga reaktorerna. De verkliga reaktorerna har isolering motsvarande 100mm mineralull och har en värmeledningsförmåga på 0,037 W/mK. Det ger ett värmegenomgångstal  $k$  på 0,37 W/m<sup>2</sup>K (Swedisol, 2016).

$$A_{\text{laboratorie reaktor}} = 0,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,085 + 2 \cdot (0,085^2 \cdot \pi) = 0,152 \text{ m}^2$$

För att beräkna hur stor värmeförlusten är till omgivningen genom konvektion används ekvation (9). Omgivande temperatur i laboratoriet antogs vara 20 °C.

$$Q_{L,37^{\circ}\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,152 \text{ m}^2 \cdot (37 - 20) = 0,956 \text{ W} = 8,375 \text{ kWh/år}$$

$$Q_{L,39^{\circ}\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,152 \text{ m}^2 \cdot (39 - 20) = 1,069 \text{ W} = 9,361 \text{ kWh/år}$$

$$Q_{L,44^{\circ}\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,152 \text{ m}^2 \cdot (44 - 20) = 1,350 \text{ W} = 11,824 \text{ kWh/år}$$

Den mängd biogas som producerades i medelvärde per vecka samt metan-% halten i medelvärde under dag 48-103 presenteras i tabell 8.1 nedan och omräknas till kWh/år. Det har antagits att 1 N m<sup>3</sup> biogas (97 % metangas) motsvarar 9,67 kWh (Energigas Sverige, 2016). Medelvärdena är beräknade under dag 48-103.

*Tabell 8.1 Tabellen visar hur mycket biogas som producerats per vecka samt omräkning till hur mycket energi den motsvarar.*

	37 °C	39 °C	44 °C
% Metangas	74,6	74,5	72,9
Mängd biogas per vecka, N liter/vecka	103,5	102,5	110,8
Mängd metan, N m <sup>3</sup> /vecka	0,0772	0,0764	0,0807
Mängd energi 100 % metangas, kWh/år	38,8	38,4	40,6

I tabellen nedan visas hur mycket energi som förbrukas och hur mycket energi som produceras. Som utgångspunkt antas 37 °C som antas vara referensvärde och den vanligaste temperaturen att producera biogas vid. I tabell 8.2 nedan jämförs hur mycket mer energi som går åt respektive utvinns vid respektive temperatur.

Tabell 8.2 Tabellen visar hur mycket energi som behöver tillföras och hur mycket energi som produceras samt dess differens.

	37 °C	39 °C	44 °C
Tillförd mängd energi för uppvärmning	2,5 kWh/år	2,7 kWh/år	3,1 kWh/år
Energiförluster i form av värmeförluster	8,4 kWh/år	9,4 kWh/år	11,8 kWh/år
Mängd energi producerad via biogas	38,8 kWh/år	38,4 kWh/år	40,6 kWh/år
Mängd energi producerad minus mängd energi förbrukad	27,9 kWh/år	26,4 kWh/år	25,7 kWh/år

Som visas i tabell 8.2 blir mängden energi lägre för en högre temperatur eftersom mer energi behövs till att värma i förhållande till hur mycket mer energi som produceras i form av biogas.

### Uppskalad process

För att applicera resultaten från laboratorieförsöken på den verkliga processen skalas mängden producerad biogas upp, energiförlust för den verkliga processen beräknas på nytt och hur mycket energi som behöver tillföras beräknas. I denna del jämförs hur mycket mer energi som behöver tillsättas jämfört med 37 °C och hur mycket mer energi som produceras jämfört med 37 °C.

För att beräkna hur mycket energi som behövde tillföras för att värma till 44 °C istället för 37 °C användes ekvation (7). Flödet beräknades genom att ta volymen av den verkliga reaktor och dividera med uppehållstiden 22 dagar. Densiteten har antagits vara densamma som för vatten vid 18 °C, 999 kg/m<sup>3</sup>. Cp värdet har antagits vara detsamma som för laboratoriereaktornas substrat med en TS-halt på 8,8 %.

$$\dot{m}_{reaktor,verklig} \frac{6000m^3 \cdot 999 \text{ kg/m}^3}{22 \text{ dagar}} = 272 \text{ 455 kg/dag}$$

$$Q_{37 \rightarrow 39^\circ\text{C}} = 272455 \text{ kg/dag} \cdot 3904,56 \text{ J/kg K} \cdot (39 - 37) = 2127,63 \text{ MJ/dag}$$

$$Q_{37 \rightarrow 44^\circ\text{C}} = 272455 \text{ kg/dag} \cdot 3904,56 \text{ J/kg K} \cdot (44 - 37) = 7446,72 \text{ MJ/dag}$$

Nedan visas energimängden som behöver tillföras för att värma substratet omräknat till MWh/år. Under sommarmånaderna är temperaturen naturligt högre än de önskvärda 37 °C i reaktorn och därför behövs mindre värme tillföras under månaderna juni-september. Under månaderna juni-september antas hälften av energin behöva tillföras. Energin som behöver tillföras blir därför 10/12 jämfört med om energi hade behövt tillföras i full utsträckning.

$$Q_{37 \rightarrow 39^\circ\text{C}} = \frac{2127,63 \text{ MJ/dag} \cdot 365 \cdot 10 / 12}{3600} = 179,77 \text{ MWh/år}$$

$$Q_{37 \rightarrow 44^\circ\text{C}} = \frac{7446,72 \text{ MJ/dag} \cdot 365 \cdot 10 / 12}{3600} = 629,18 \text{ MWh/år}$$

För att beräkna värmeförluster används samma metod som vid laboratoriereaktorerna. Värmeomgångstalet sätts till detsamma,  $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Arealen beräknas med hjälp av höjd och radie på reaktorn. Utomhustemperaturen ansätts till  $10^\circ\text{C}$ .

$$A_{\text{verklig reaktor}} = 18 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10,5 + 2 \cdot (10,5^2 \cdot \pi) = 1880 \text{ m}^2$$

$$Q_{L,37^\circ\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1880 \text{ m}^2 \cdot (37 - 10) = 18781,2 \text{ W} = 164,5 \text{ MWh/år}$$

$$Q_{L,39^\circ\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1880 \text{ m}^2 \cdot (39 - 10) = 20172,2 \text{ W} = 176,7 \text{ MWh/år}$$

$$Q_{L,44^\circ\text{C}} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1880 \text{ m}^2 \cdot (44 - 10) = 23650,4 \text{ W} = 207,2 \text{ MWh/år}$$

Mängden biogas som produceras antas vara proportionell mot ökningen av mängden substrat i reaktorn. Eftersom den verkliga reaktorn alltså är  $6000/0,0045=1\ 333\ 333$  gånger större multipliceras alltså mängden energi som fås från laboratoriereaktorerna med denna siffra. Det har antagits att det inte går att skala upp rakt av till en verklig process. Det har ansatts att den verkliga mängden producerad gas reduceras till ungefär 85 % jämfört med en laboratoriereaktor eftersom driftstörningar såsom temperatursvängning och byte av substrat har negativ inverkan på mängd producerad biogas. Därför multiplicerades den uppskalade mängden biogas även med 0,85 för att kompensera för detta. Värdena presenteras i tabell 8.3 nedan.

Tabell 8.3 Tabellen visar hur mycket biogas som produceras då värdena från laboratorieförsöken skalades upp samt den mängd energi detta motsvarar.

	37 °C	39 °C	44 °C
% Metangas	74,6	74,5	72,9
Mängd biogas per vecka, N m <sup>3</sup> /vecka	117323	116189	125562
Mängd metan, N m <sup>3</sup> /vecka	87494	86546	91503
Mängd energi 100 % metangas, MWh/år	43995	43519	46011

I tabell 8.4 visas hur mycket mer energi som behöver tillföras processen för att uppnå en högre temperatur. Det visar även hur mycket mer eller mindre energi som produceras vid en högre temperatur.



Tabell 8.4 Tabellen visar hur mycket mer energi det behöver tillföras för att uppnå en högre temperatur samt hur mycket mer eller mindre energi som produceras.

	37→39°C	37→44 °C
Tillförd mängd energi	180 MWh/år	630 MWh/år
Energiförluster	12 MWh/år	43 MWh/år
Mängd energi producerad via biogas	- 480 MWh/år	2020 MWh/år
Mängd energi förbrukad minus mängd energi producerad	- 672 MWh/år	1347 MWh/år

Tabell 8.4 visar att det är gynnsamt energimässigt att producera biogas vid 44 °C jämfört med 37 °C. Det krävs mer energi att värma upp den uppskalade processen till 44 °C men det produceras även mer energi i form av biogas vilket gör att det är energimässigt gynnsamt att producera biogas vid 44 °C istället för 37 °C.



## 9 Populärvetenskaplig sammanfattning

### Temperatur vid biogastillverkning

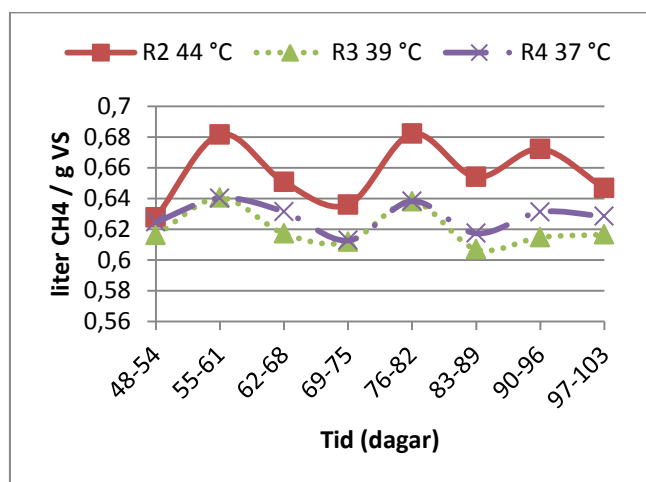
För att kunna få fram mer biogas med samma mängd material kan temperaturen spela en viktig roll. Genom att studera temperaturen kan tillverkningen av biogas bli effektivare.

Vid tillverkning av biogas används vanligtvis en temperatur på antingen 35-40 °C eller 50-55 °C. Under året varierar utomhustemperaturen vilket påverkar temperaturen i biogasanläggningen. Vid biogastillverkningen hos OX2 i Helsingborg är temperaturen normalt 37 °C men kan under sommaren öka till 42 °C. Vad denna temperaturökning har för inverkan har tidigare inte undersökts. För att undersöka hur en högre temperatur än 37 °C påverkar biogastillverkningen och hur temperaturökningen påverkar biogastillverkningen användes mindre reaktorer i laboratorieskala. De temperaturer som undersöktes var 37 °C, 39 °C, 44 °C och 49 °C. Under arbetet togs prover under tillverkningen av biogas för att se om temperaturen påverkade de mikroorganismer som kan omvandla till exempel matavfall till biogas.

De försök som gjordes vid olika temperaturer visade att det kan produceras mer biogas vid 44 °C än vid 37 °C och 39 °C. Det kärl som användes för biogastillverkning vid 49 °C gick sönder under försöken. Det som kunde visas innan det gick sönder var att det var dåligt men en så hög temperaturökning som till 49 °C. En temperaturökning påverkade biogastillverkning på ett dåligt sätt då temperaturen förändrades men när temperaturen varit densamma en längre period ökade biogasproduktionen igen.

Biogas består av metan och koldioxid. För att använda biogas som till exempel fordonbränsle istället för bensin tas koldioxiden bort. Därför är det bra att ha mycket

metan i biogasen när den tillverkas. Försöken visade att andelen metan var lägre vid en högre temperatur. När den högre mängden biogas och den lägre mängden metan lades samman visades det att mer metan producerades vid en högre temperatur för varje mängd material som användes. Detta visas i figur 9.1 nedan.



Figur 9.1 Producerad mängd metan per tillsatt mängd substrat

Genom att kunna producera mer biogas vid en högre temperatur kan tillverkningen av biogas bli effektivare. Beräkningar gjordes som visade att det bildas mer energi i form av metan vid en högre temperatur än vad som behöver tillsättas för att uppnå en högre temperatur. Genom att producera biogas vid en högre temperatur fås dels mer biogas samtidigt som problemet med varierande temperatur under året försvinner eftersom det istället är varmt i anläggningen hela året. Då värms anläggningen på vintern och på sommaren behöver varken kyla eller värme tillsättas.