



Sveriges
lantbruksuniversitet

Utveckling av en beräkningsmodell för biogasproduktion

Development of a model for calculating biogas
production

Marcus Mellbin

REFERAT

Utveckling av en beräkningsmodell för biogasproduktion

Marcus Mellbin

Ett ökat intresse för klimat och miljö har lett till ett ökat intresse för miljövänliga och förnyelsebara energikällor, exempelvis biogas. Vid planering av nya biogasanläggningar krävs ett beslutsunderlag som bland annat består av vilken ungefärlig mängd biogas som anläggningen kan komma att producera. Syftet med detta arbete är att ta fram en modell som beräknar ungefärlig mängd producerad biogas och rötrest, från en planerad eller befintlig biogasanläggning, utifrån de substrat som är tänkt att rötas i anläggningen.

För att ta fram beräkningsmodellen utfördes en litteraturstudie av biogasframställning generellt och av de beräkningar av biogas- och rötrestproduktion som tidigare tagits fram av WSP Sverige AB. Som ett komplement till beräkningsmodellen sammanställdes, genom en litteratursökning, fakta om olika substrat för biogasframställning. Dessutom utfördes satsvisa utrotningsförsök för att ta fram data på metanpotential för några utvalda substrat. Två olika fullskaleförsök studerades också för att möjliggöra en jämförelse mellan resultat framtagna från beräkningsmodellen med resultat från biogasframställning i full skala. Fullskaleförsöken tillsammans med utrotningsförsöken gav också en bättre bild av biogasframställning generellt.

Arbetet resulterade i en beräkningsmodell för beräkning av biogas-, metan- och rötrestproduktion samt även av näringsinnehållet i rötresten utifrån den ingående mängden substrat. Modellen byggdes upp i Microsoft Office Excel och en tabell togs fram till beräkningsmodellen, innehållande schablonvärden för olika substrat. Med hjälp av denna schablonvärdestabell är det möjligt att enkelt kunna utföra beräkningar innan aktuella substrat undersökts mer noggrant.

Vid jämförelse av beräknade värden på biogasproduktion, med beräkningsmodellen, med värden från biogasproduktion i full skala visade sig de beräknade värdena ligga inom, eller på gränsen till, standardavvikelsen för fullskalevärdena. De beräknade värdena visade sig också ligga något lägre än fullskalevärdena, vilket tyder på att beräkningsmodellen inte överskattar biogasproduktionen. Osäkerheten i värdena från schablonvärdestabellen tillsammans med de förenklingar som gjorts i beräkningsmodellen gör ändå att beräkningar utförda av modellen är något osäkra. Beräkningarna skall därför endast ses som en fingervisning av hur biogasproduktionen kan komma att se ut för en planerad eller befintlig biogasanläggning.

Nyckelord: Biogas, biogasframställning, förstudier, beräkningsmodell, substrat, satsvisa utrotningsförsök, fullskaleförsök, schablonvärden,

*Institutionen för mikrobiologi. Sveriges lantbruksuniversitet, SLU. Genetikcentrum,
Genetikvägen 5, SE-750 07 UPPSALA
ISSN 1401-5765*

ABSTRACT

Development of a model for calculating biogas production

Marcus Mellbin

A growing interest for the climate and the environment has led to an increased interest for environmentally friendly and renewable energy sources, such as biogas. Planning new biogas plants requires a decision basis including facts about approximate amounts of biogas possible to produce at the plant. The purpose of this thesis is to develop a model that calculates the approximate biogas and digestate production from a planned or existing biogas plant.

Developing the model required a literature review and studies of calculations concerning biogas and digestate production performed by WSP Sweden AB. As a complement to the model development, facts about substrates for biogas production were compiled through a literature review. In addition the methane potential from selected materials was determined by batch experiments. Two full scale experiments were also studied to compare results from the model with results from full scale biogas production.

This thesis work resulted in a model for calculating biogas, methane and digestate production, including calculations of nutrient content in the digestate, from a given amount of substrate. The model was constructed in Microsoft Office Excel and complemented by a chart, containing template facts for different biogas substrates. The template facts, together with the model, make it possible to perform calculations of biogas production before any up-to-date investigations are made of the biogas substrate.

Comparing results of biogas production calculated with the model with values of biogas production from a full scale biogas plant showed that the calculated values were within, or just outside, the standard deviation of the full scale values. The calculated values from the model also turned out to be in general lower than the full scale values, which indicate that the model doesn't overestimate the biogas production. However, the uncertainties of the values in the template facts chart and the simplifications made in the model both contribute in to making the model calculations somewhat uncertain. The calculations should thus only be seen as an indication of the possible biogas production from planned or existing biogas plants and not as an exact prediction.

Key words: Biogas, biogas production, pre-study, computation model, biogas substrate, batch experiments, full scale experiments, template facts,

*Department of microbiology, The Swedish University of Agricultural Sciences, SLU.
Genetikcentrum, Genetikvägen 5, SE-750 07 UPPSALA.*

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Detta examensarbete har utförts som avslutning på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och utfördes åt WSP Sverige AB i Stockholm och MittSverige Vatten i Sundsvall. Ämnesgranskare har varit Anna Schnürer vid institutionen för mikrobiologi vid SLU i Uppsala.

Jag vill tacka mina handledare Cajsa Hellstedt och Folke Nyström på WSP respektive MittSverige Vatten för ett stort engagemang och stöd. Ett stort tack också till Anna Schnürer för dina synpunkter och svar på alla mina frågor. Utan er hjälp hade arbetet inte kunnat genomföras.

Uppsala 2009

Marcus Mellbin

Copyright © Marcus Mellbin och Institutionen för mikrobiologi, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU.

UPTEC W10 002, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala 2010

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Utveckling av en beräkningsmodell för biogasproduktion

Marcus Mellbin

Runt om i världen blir förändringar i klimatet allt tydligare. Glaciärer som smälter, ökad nederbörd och ökenområden som breder ut sig är några exempel. I samband med detta har en debatt uppstått om vem eller vad som orsakar dessa förändringar och hur stora de kommer att bli. Är det människans utsläpp av växthusgaser som är orsaken eller är det en naturlig process? Kanske lite av båda? Oavsett orsaken till klimatförändringarna är det tydligt att vi måste ändra vår energiförbrukning och energiframställning till ett mer långsiktigt, förnyelsebart och miljövänligt alternativ.

Idag sker energiframställningen främst från fossila bränslen som olja, kol och naturgas. Fossila bränslen består av material från döda växter och djur som förmultnat djupt nere i marken under en lång tid. Växter och djur är till största del uppbyggda av kol. Detta kol tas upp av växter och djur under deras levnadstid. När djuren och växterna dör frigörs kolet och en del av detta går tillbaka till kretsloppet av kol som finns ovan jord. Men en del av kolet blir kvar i de döda beståndsdelarna och hamnar med tiden längre och längre ned i marken. Till slut har olika processer omvandlat det döda materialet till fossila bränslen och kolet tagits ur kolkretsloppet ovan jord. Sedan vi människor upptäckt att dessa fossila bränslen är en utmärkt energikälla har vi börjat ta upp dem ur marken igen. Det innebär att kol som en gång plockats bort ur kolkretsloppet nu återförs i en rasande takt. Förbränningen av fossila bränslen ger bland annat upphov till växthusgasen koldioxid (CO_2) som restprodukt. Ökade utsläpp av koldioxid ökar koncentrationen i atmosfären och den så kallade växthuseffekten förstärks.

Påverkan på växthuseffekten och det faktum att fossila bränslen inte är någon förnyelsebar resurs inom överskådlig tid har gjort att politiker, företag och allmänhet börjat efterfråga nya energikällor som är förnyelsebara och har mindre påverkan på miljön och klimatet. Där kommer biogasen in i bilden.

Biogas bildas när organiskt material, växter och djur, bryts ned under syrefria förhållanden. Nedbrytningen utförs av mikroorganismer som använder det organiska materialet som näringskälla och ger biogas som en restprodukt. Denna process sker naturligt i till exempel våtmarker eller i magen hos kor. Biogas består liksom naturgas till största del av metan och koldioxid. Skillnaden mellan naturgas och biogas är att kolet i biogasen redan är inkluderat i kolets kretslopp ovan jord. Det är en av fördelarna med biogas, den ger inget nettotillskott av växthusgaser till atmosfären. När nya växter växer upp tar de upp den koldioxid som frigjorts vid biogasförbränningen och ett kretslopp skapas. Biogas kan framställas av allt organiskt material, t.ex. gödsel från lantbruk, slam från avloppsreningsverk, sorterat hushållsavfall och restprodukter från livsmedels- och produktionsindustrin. En annan fördel är att restprodukten från biogasframställningen (rötresten) kan, om den anses vara av tillräckligt god kvalitet, användas som gödsel på odlingsmarker. Det innebär att den näring som annars går förlorad kan återföras till odlingslandskapet och ännu ett kretslopp skapas.

Biogasen framställs idag i både större och mindre skala. Organiskt material samlas in och transporteras till anläggningar där nedbrytningen sker i en så kallad rötchammare. Rötchammaren är en syrefri behållare där mikroorganismer utför nedbrytningen. Biogasen som uppstår är lättare än luft och tas ut i toppen på chammaren. Idag används biogasen till största del till uppvärmning av lokaler men kommer kanske främst till sin rätt som fordonsbränsle där den kan ersätta bensin och diesel. Uppgraderad och komprimerad biogas har nämligen ett likvärdigt energiinnehåll med bensin och diesel och används idag bl.a. inom kollektivtrafiken.

Intresset för biogas och uppförandet av nya anläggningar för framställning ökar. Det innebär ett ökat behov av planering och utredning för dessa anläggningar. WSP Sverige AB är ett konsultföretag som bl.a. utför sådana planeringar, eller förstudier som det kan kallas. En förstudie innebär att kostnader, tillgång på organiskt material (substrat), och potentiell gasproduktion uppskattas med hjälp av olika beräkningar och bedömningar.

Beräkningar av potentiell gasproduktion utifrån en given mängd substrat utförs idag av WSP med hjälp av massbalansberäkningar. Dessa beräkningar har ingen allmän struktur och ställs upp olika från fall till fall. Det finns därför ett behov av en generell modell som snabbt och enkelt kan utföra dessa beräkningar och ge ett ungefärligt svar på hur mycket biogas som kan komma att kunna produceras från en planerad biogasanläggning.

Syftet med detta examensarbete är att konstruera en modell för beräkning av biogasproduktionen från planerade biogasanläggningar. Med hjälp av litteraturstudier och med data från olika försök skall fakta om potentiella substrat och biogasframställning tas fram för att ligga som grund för själva modellen. Försöken innebär att biogasproduktionen från olika substrat studeras i laboratorie- och fullskala.

Arbetet resulterade i en beräkningsmodell i Microsoft Office Excel där bland annat ungefärlig mängd producerad gas kan beräknas utifrån en given mängd substrat. Till modellen hör även en faktatabell om olika substrat som kan vara aktuella för biogasproduktion. Denna tabell är tänkt att kunna användas innan aktuella substrat undersöks närmare. Tabellen gör det möjligt att tillsammans med beräkningsmodellen snabbt kunna ta fram ungefärlig mängd producerad biogas från planerade biogasanläggningar.

Värden på biogasproduktion beräknade med beräkningsmodellen jämfördes mot värden från biogasproduktion i full skala. Denna analys visade att de beräknade värdena låg inom variationen för värdena från fullskaleförsöket. De beräknade värdena visade sig också ligga något lägre än fullskalevärdena, vilket tyder på att beräkningsmodellen inte överskattar biogasproduktionen. Beräkningsmodellen är en förenkling av verkligheten och resultatet skall endast ses som en fingervisning om hur stor biogas- och rötrestproduktionen kan bli. Nedbrytningen av organiskt material är en biologisk process som utgörs av levande organismer. Det gör att den påverkas av många olika faktorer. Därför behövs större modeller som kan ta med alla dessa faktorer i sina beräkningar och göra resultaten säkrare. Mer undersökningar på olika substrat bör också utföras för att ligga till grund för bättre beräkningar av planerad biogasproduktion.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	i
ABSTRACT	ii
FÖRORD.....	iii
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	iv
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	vi
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Målsättning.....	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Bakgrund och teori	3
2.1 Nuvarande produktion, potential och användningsområden	3
2.2 Den mikrobiologiska nedbrytningsprocessen.....	5
2.2.1 Mikroorganismens uppbyggnad.....	5
2.3 Anaerob nedbrytning	6
2.3.1 Hydrolys.....	6
2.3.2 Fermentation	7
2.3.3 Anaerob oxidation.....	7
2.3.4 Metanbildning	7
2.4 Substrat.....	7
2.4.1 Kolhydrater	8
2.4.2 Fetter	8
2.4.3 Protein	8
2.4.4 Kol kväveknoten	9
2.4.5 Fettsyror	9
2.4.6 Samrötning av substrat.....	9
2.5 Biogasprocessen.....	10
2.5.1 Förbehandling	10
2.5.2 Reaktorer.....	11
2.5.3 Satsvis/kontinuerlig inmatning	12
2.5.4 Röttningssteg.....	13
2.5.5 Gaskvalitet	14
2.5.6 Uppgradering av biogas	14

2.5.7	Rötresthantering	15
2.6	<i>Viktiga processparametrar</i>	16
2.6.1	Temperatur	16
2.6.2	Alkalinitet och pH	17
2.6.3	Syrehalt	17
2.6.4	Tillgänglighet av organiskt material	17
2.6.5	Uppehållstid och belastning	18
3	Material och metoder	20
3.1	<i>Massbalansberäkningar vid förstudier av biogasanläggningar</i>	20
3.2	<i>Beräkningsmodell</i>	20
3.3	<i>Litteraturstudie</i>	20
3.4	<i>Satsvisa utrötningsförsök</i>	21
3.4.1	Substrat	21
3.4.2	Utförande	21
3.4.3	Provtagning	23
3.4.4	Analys av metanhalt	23
3.5	<i>Fullskaleförsök</i>	23
3.5.1	Fillanverket	23
3.5.2	Substrat	24
3.5.3	Utförande	24
3.5.4	Provtagning	25
3.6	<i>Beräkningar för jämförelse av beräkningsmodell med fullskaleförsök</i>	25
4	Resultat	28
4.1	<i>Litteraturstudie</i>	28
4.2	<i>Satsvisa utrötningsförsök</i>	29
4.3	<i>Beräkningsmodell</i>	31
4.3.1	Struktur	31
4.3.2	Indatatabell	32
4.3.3	Schablonvärdestabell	33
4.3.4	Beräkningsdel	33
4.3.5	Presentation av beräkningar	34
4.3.6	Jämförande beräkningar	35
5	Diskussion	36
5.1	<i>Litteraturstudie</i>	36
5.2	<i>Satsvisa utrötningsförsök</i>	37
5.3	<i>Fullskaleförsök</i>	37

5.4	<i>Beräkningsmodell</i>	38
5.5	<i>Sammanfattande diskussion</i>	40
6	Slutsatser	41
	Litteraturförteckning	42
	Muntliga källor	45
	Källor till schablonvärdestabellen	46
	Bilaga 1 - Ordförklaringar	a
	Bilaga 2 - Tabeller	c
	Bilaga 3 - Ekvationer	k
	Bilaga 4 - Beräkningsmodellen	l

1 INLEDNING

Runt om i världen blir förändringar i klimatet allt tydligare. Glaciärer som smälter, ökenområden som breder ut sig och ökad nederbörd är några exempel. Som en följd av detta har en debatt uppstått om vem eller vad som orsakar dessa förändringar och hur stora de kommer att bli. Är det människans utsläpp av växthusgaser som är orsaken eller är det en naturlig process? Kanske lite av båda? Oavsett orsaken till klimatförändringarna är det tydligt att vi måste ändra vår energiförbrukning och energiframställning till ett mer långsiktigt, förnyelsebart och miljövänligt alternativ. Här kommer biogasen in i bilden.

Biogas definieras som den gas som bildas vid nedbrytning av organsikt material under anaeroba (syrefria) förhållanden. Det organiska materialet kan vara t.ex. matavfall, slam från avloppsreningsverk eller skörderester från lantbruk. Nedbrytningen sker med hjälp av mikroorganismer som använder det organiska materialet som näringskälla, substrat, och bildar biogas som en restprodukt. Detta sker naturligt i t.ex. våtmarker och i magen hos kor. Biogas består till största del av metan (CH_4) och koldioxid (CO_2). Anledningen till att biogas är attraktiv som energikälla är att den koldioxid som släpps ut vid förbränning redan är en del av koldioxidkretsloppet ovan jordskorpan och inte ger något ytterligare tillskott till atmosfären. Biogasen är alltså koldioxidneutral. Vid biogasframställning uppstår också en restprodukt, eller rötrest, som består av vatten, icke nedbrutet material, näringsämnen och mikroorganismer. Rötresten kan, beroende på renheten i det ingående substratet, användas som biogödsel och föras tillbaka till odlingsmarken. På så sätt skapas ett kretslopp av näringsämnen, som t.ex. fosfor (P) och kväve (N), mellan odling och konsumtion. Detta är ett viktigt kretslopp då fosfor är en ändlig resurs.

Produktionen av biogas i Sverige år 2006 var 1,2 TWh och den totala energiproduktionen 139,4 TWh. Användningsområden för biogas är idag framförallt värmeproduktion och fordonsgas som 2006 stod för 56 respektive 19 % av den totala användningen av biogas. Produktionspotentialen, sett till den mängd organiskt material som finns tillgängligt med dagens tekniska och ekonomiska förutsättningar, beräknas emellertid vara betydligt högre än 1,2 TWh och ligga på ca 10,6 TWh (Linné m fl, 2008). I Sverige finns det idag 227 anläggningar som producerar biogas och fler är planerade (Svenska Gasföreningen, 2008). Bl.a. satsar regeringen sammanlagt 350 miljoner kronor på främjande och utvecklande av biogasproduktion på industri- och lantbruksnivå (Näringsdepartementet, 2009; Jordbruksdepartementet, 2008). Ett ökat intresse för biogas innebär en ökad efterfrågan på förstudier, kartläggning av lämpliga substrat och projektering av nya anläggningar.

WSP Sverige AB utför idag bl.a. förstudier för biogasanläggningar. En biogasanläggning är en stor investering och kräver en noggrann planering innan produktionen sätts igång. Förstudier innefattar bland annat en bedömning av förutsättningarna för anläggandet eller utbyggnaden av en biogasanläggning. Det innebär kortfattat en analys av vilken mängd eller typ av substrat, tillsammans med vilken form av processlösning, som krävs för att producera tillräckligt med biogas för att göra anläggningen lönsam. Den innefattar också förslag på tekniska lösningar och tillhörande ekonomiska kostnader som krävs för uppnå lönsamhet.

Bedömningen av den potentiella biogas- och rötrestproduktionen görs med hjälp av massbalansberäkningar. Där beräknas ungefärliga värden på den mängd biogas och rötrest som kan komma att produceras utifrån den mängd substrat som bedöms finns tillgänglig. Dessa beräkningar görs idag från fall till fall och det saknas en grundläggande och generell modell. En allmän modell som kan användas som grund vid förstudier och som enkelt kan ta fram värden på gas- och rötrestproduktion skulle spara tid och underlätta arbetet med förstudierna samt säkra kvaliteten på utredningarna.

De modeller som finns på marknaden idag för beräkning av biogasproduktion är i många fall relativt stora och komplicerade (Hyeong-Seok m fl, 2004; IWA Task Group, 2002). Det innebär att det finns ett behov av en beräkningsmodell som på ett enkelt och användarvänligt sätt kan beräkna ungefärlig biogasproduktion från en biogasanläggning.

1.1 SYFTE

Syftet med det här arbetet är att skapa en modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktionen från planerade eller befintliga biogasanläggningar. Detta skall uppnås med hjälp av litteraturstudier av biogasprocessen och av olika substrat samt även med hjälp av utrotnings- och fullskaleförsök.

1.2 MÅLSÄTTNING

Målsättningen med detta arbete är att:

1. Genom en litteraturstudie och studier av fullskaleförsök få en bild av biogasprocessen och hur den fungerar.
2. Genom småskaliga utrotningsförsök och en litteraturstudie sammanställa information om olika substrat för att underlätta beräkning av biogas- och rötrestproduktion.
3. Skapa en generell och användarvänlig modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktion från planerade biogasanläggningar eller från tillsats av ytterligare substrat vid befintliga anläggningar.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

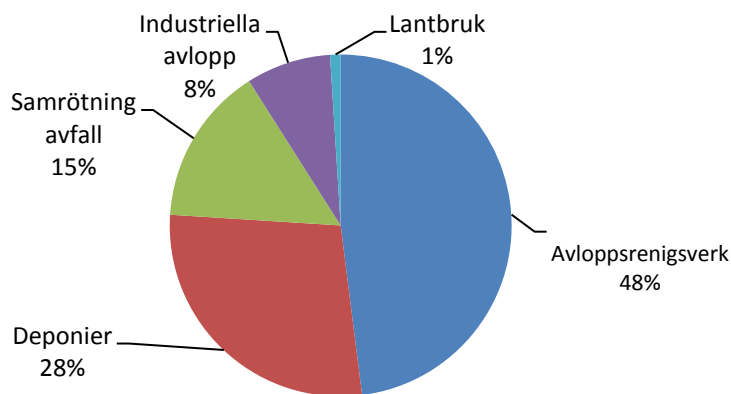
Beräkningsmodellen begränsas till att beräkna biogas- och rötrestproduktion. Inga ekonomiska beräkningar utförs för val substrat, processtyp, gasupptradering eller rötrestbehandling.

2 BAKGRUND OCH TEORI

Att framställa biogas är en process som påverkas av en mängd olika faktorer, allt från biologi till processteknik. För att kunna bygga upp en modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktion samt för att få en förståelse för modellens användbarhet och eventuella begränsningar krävs därför en viss bakomliggande kunskap om biogasprocessens, inklusive biologi och tekniska lösningar.

2.1 NUVARANDE PRODUKTION, POTENTIAL OCH ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER

Produktionen av biogas är fördelad på 227 anläggningar runt om i landet (Svenska Gasföreningen, 2008). År 2006 producerades ca 1,2 TWh energi från biogas i Sverige där den största delen kom från avloppsreningsverk (figur 1). Den totala energiproduktionen i Sverige var samma år 139,4 TWh (Energimyndigheten, 2008a).



Figur 1. Procentuell fördelning av biogasproduktion i GWh på anläggningstyp i Sverige år 2006 (modifierad från Energimyndigheten, 2008b).

Den producerade biogasen används inom olika områden där den största delen i Sverige går till uppvärmning av rötningsanläggningens egen process och lokaler eller närliggande fastigheter (56 % av den totala användningen). Andra användningsområden är fordonsgas (19 %), elproduktion (8 %), fackling (förbränning, 13 %) och distribution på gasnätet (4 %) (Energimyndigheten, 2008b). Tabell 1 visar en mer detaljerad bild av biogasanvändningen.

Tabell 1. Förbrukning av biogas i GWh under 2006 inom olika användningsområden (Energimyndigheten, 2008b)

Anläggningstyp	Uppvärmning^a	El	Fordons- gas	Gas- distribution	Fackling	Summa
Industriella avlopp	88,6	2,1	0,0	0,0	0,5	91,2
Lantbruk	3,0	6,6	0,1	0,0	4,1	13,9
Samrötning avfall	59,2	1,7	80,2	26,3	14,0	181,3
Deponier	261,3	20,8	0,0	0,0	60,2	342,4
Avloppsrenings- verk	265,6	67,9	137,4	19,5	79,1	569,5
Summa (GWh)	677,8	99,1	217,7	45,7	157,9	1 198,2
Såld mängd fordonsgas			230,0			1 210,5 ^b

^aInklusive internförbrukning ^bSumma, inklusive biogas såld som fordonsgas

Samtliga fakta som redovisas nedan om energipotentialen från biogas har hämtats från en och samma rapport (Linné m fl, 2008). Den totala energipotentialen från biogas, om allt organiskt avfall i Sverige skulle tas omhand, beräknades 2008 vara ca 15 TWh/år (kolumnen ”totalt” i tabell 2). Om också alla restprodukter från skogsbruk (59 TWh/år) tas med i beräkningarna blir den totala energipotentialen från biogas i Sverige 74 TWh/år. Det är dock tekniskt, praktiskt och ekonomiskt svårt att ta vara på allt organiskt material och det saknas också erfarenhet av framställning av biogas ur restprodukter från skogen. Detta gör att värdena för energipotentialen eventuellt är överskattade. Om tekniska, praktiska och ekonomiska begränsningar tas med i beräkningarna blir den totala biogaspotentialen ca 10,6 TWh/år i Sverige 2008, exklusive skogsavfall (kolumnen ”totalt med begränsningar” i tabell 2). Biogaspotentialen vid införandet av ny teknik beräknas vara ca 14,1 GWh/år (kolumnen ”totalt med ny teknik”, tabell 2). Ny och effektivare teknik kan implementeras t.ex. vid insamling eller rötning av det organiska materialet.

Tabell 2. Den totala biogaspotentialen i Sverige år 2008 per avfallskategori, exklusive skogsavfall. Total potential innebär att allt organiskt material i Sverige samlas in och rötas. Total potential med begränsningar innebär att praktiska, tekniska och ekonomiska begränsningar tas med i beräkningen av biogaspotentialen. Total biogaspotential med ny teknik innebär att biogaspotentialen beräknats med hänsyn till att ny och effektivare teknik införts (Linné m fl, 2008)

Substrat	Biogaspotential [GWh/år]		
	Totalt	Totalt med begränsningar	Totalt med ny teknik
Matavfall från hushåll, restauranger, storkök och butiker	1346	759	1139
Park- och trädgårdsavfall	400	0	400
Restprodukter från industri och livsmedelsindustri	1962	1062	1168
Avloppsslam	727	700	841
Restprodukter från lantbruket och gödsel	10780	8099	10529
Summa	15215	10647	14108

2.2 DEN MIKROBIOLOGISKA NEDBRYTNINGSPROCESSEN

Biogas bildas när mikroorganismer bryter ner organiskt material under anaeroba (syrefria) förhållanden. Biogasen består till största del av metan (45-85 %) och koldioxid (15-45%) (Nordberg & Nordberg, 2007; Jarvis & Schnürer, 2009; Gerardi, 2003). Nedbrytningen av organiskt material är beroende av ett samarbete mellan mikroorganismer och hur dessa påverkas av sin levnadsmiljö. För att kunna leva och föröka sig behöver mikroorganismerna energi, byggstenar (näringssämnen), elektronmottagare, spårämnen (olika metaller) och vitaminer. De tillgodogör sig dessa genom att bryta ner organiska molekyler som kolhydrater, fetter och proteiner (Jarvis & Schnürer, 2009; Gerardi, 2003). Mikroorganismerna som är aktiva under biogasframställningen tillhör både bakterier och så kallade arkéer och substratet som används vid rötningen blir mikroorganismernas mat. Nedbrytningen sker i en rad steg och resulterar i en mängd olika restprodukter. Restprodukterna från varje nedbrytningssteg blir i sin tur substrat till andra mikroorganismer i påföljande eller samma steg.

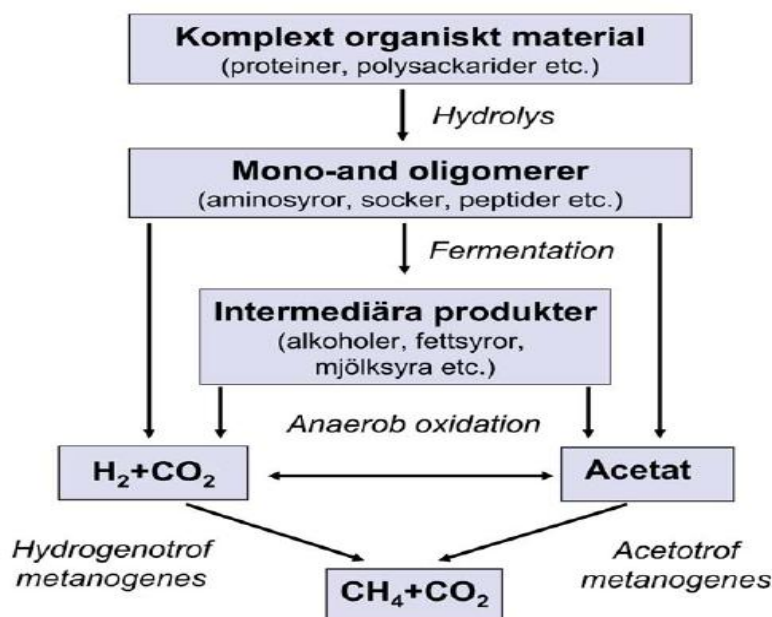
2.2.1 Mikroorganismens uppbyggnad

Mikroorganismer består till största delen av kol (C, ca 50 %). De innehåller även syre (O), kväve (N), väte (H), svavel (S), fosfor (P), natrium (Na), kalium (K), magnesium (Mg), kalcium (Ca) och klor (Cl) (Gerardi, 2003). Dessa ämnen behöver mikroorganismen för att kunna leva och föröka sig och bör alltså finnas tillgängliga i röt-kammaren. Förutom dessa byggstenar behöver mikroorganismerna vitaminer och spårämnen som t.ex. nickel (Ni), kobolt (Co), järn (Fe) och sulfid (S^{2-}) (Zhang, 2003; Gerardi, 2003). För att kunna gynna mikroorganismens tillväxt är kunskap om dess uppbyggnad, samt energi- och näringsbehov, viktig. Till exempel vid valet av komponenter i näringstillsetser eller vid valet av substrat för att anpassa miljön i röt-kammaren och göra den så optimal som möjligt för

mikroorganismerna. Det är också viktigt att känna till hur förhållandena mellan näringsämnen, som t.ex. kvoten mellan kol och kväve (C/N-kvoten) och mängden fosfor i substratet, påverkar mikroorganismernas nedbrytningsförmåga.

2.3 ANAEROB NEDBRYTNING

Här beskrivs de olika mikrobiologiska nedbrytningsstegen som krävs för en fullständig omvandling av organiskt material till biogas; hydrolys, fermentation, anaerob oxidation och metanbildning (figur 2). Vid hydrolysen spjälkas större organiska molekyler ner till mindre, för mikroorganismen mer lätthanterliga, molekyler med hjälp av extracellulära enzymer. Fermentationen och den anaeroba oxidationen kallas ofta för det syrabildande steget då de föreningar som bildats under hydrolysen här omvandlas till i huvudsak organiska syror och alkoholer. Den anaeroba oxidationen är beroende av det sista steget, metanbildningen. De metanbildande organismerna, eller metanogener som de också kallas, håller vätgashalten på en lagom nivå för att de oxiderande organismerna ska trivas och förse metanbildarna med rätt substrat. Det är vid metanbildningen som restprodukterna från den anaeroba oxidationen omvandlas till biogas. Hur stor del av biogasen som består av metan beror bl.a. på vilka ämnen som substratet innehåller, förbehandling och miljöförhållandena i rötningstanken (Jarvis & Schnürer, 2009).



Figur 2. Schematisk bild av de mikrobiella nedbrytningsstegen i biogasprocessen (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.3.1 Hydrolys

Det inledande steget i den mikrobiologiska nedbrytningsprocessen är hydrolysen. Här bryts stora olösliga organiska föreningar (kolhydrater, proteiner, fetter) ner till mindre vattenlösliga molekyler som är möjliga för mikroorganismerna att tillgodogöra sig. Detta sker genom att mikroorganismerna utsöndrar enzymer som ”klipper” upp de stora molekylerna i mindre bitar som de sedan kan ta upp (Gerardi, 2003). Mikroorganismer kan vara specialiserade på att bryta ner särskilda ämnen, t.ex. socker eller fett, men det finns även de som utsöndrar flera olika enzymer och kan bryta ner flera olika ämnen. De mindre organiska föreningarna som

bildas och blir restprodukter vid hydrolysen är t.ex. aminosyror, enkla sockerarter, peptider, alkoholer, fettsyror (Jarvis & Schnürer 2008). Dessa ämnen används som substrat i efterföljande nedbrytningssteg.

2.3.2 Fermentation

I fermentationssteget bryts restprodukter från hydrolyssteg ner, med undantag av fettsyror som bryts ner i den anaeroba oxidationen. Nedbrytningen sker av en mängd olika mikroorganismer och vilka restprodukter som bildas beror av substratets sammansättning, omgivningens karaktär samt av vilka organismer som är närvarande. Restprodukterna från fermentationen är till största del olika organiska syror (t.ex. acetat), alkohol, ammoniak, koldioxid och vätgas (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.3.3 Anaerob oxidation

Vid den anaeroba oxidationen bryts restprodukter från fermentationen (fettsyror, alkoholer, vissa aminosyror och aromater) ner ytterligare och bildar i huvudsak vätgas, acetat och koldioxid (Sousa m fl, 2008; Jarvis & Schnürer, 2009). Den anaeroba oxidationen är en komplex process som kräver ett väl fungerande samarbete mellan de mikroorganismer som utför detta steg och de metanbildande mikroorganismerna (metanogenerna), aktiva i det efterföljande nedbrytningssteget. Vid den anaeroba oxidationen bildas vätgas som en restprodukt. Om halten vätgas blir för hög hämmas de oxiderande mikroorganismerna och nedbrytning bromsas (Jarvis & Schnürer 2008). Metanbildarnas uppgift är här att konsumera vätgas. Genom denna process håller de vätgaskoncentrationen tillräckligt låg för att den anaeroba oxidationen skall fungera.

2.3.4 Metanbildning

Metanogenerna använder i huvudsak koldioxid, vätgas och acetat som substrat och restprodukten blir till största del metan och koldioxid (Jarvis & Schnürer, 2009; Gerardi, 2003). Alla metanogenerna tillhör en egen grupp av organismer som kallas för arkea (Nettmann m fl, 2008). Dessa organismer har en längre tillväxttid (1-12 dygn) än övriga mikroorganismer i biogasprocessen och är dessutom känsligare för störningar i omgivningen som t.ex. ändrat pH och temperatur eller förekomsten av tungmetaller och giftiga organiska föreningar (Liu & Whitman, 2008; Chen m fl, 2008). Den relativt långa tillväxten hos metanogenerna och känsligheten för störningar bestämmer ofta hastigheten i biogasprocessen. För kort uppehållstid, mindre än 12 dagar, innebär att organismerna inte alltid hinner växa till och då finns det en risk att de spolats ut ur processen. Metanogenerna kan delas in i grupper beroende på vilket substrat som de använder. Den vanligaste gruppen är de acetotrofa metanogenerna som använder acetat som substrat (i en biogasreaktor är acetat källan till 70 % av den bildade biogasen (Jarvis & Schnürer, 2009). En annan vanlig grupp är de hydrogenotrofa metanogenerna som använder koldioxid och vätgas som substrat.

2.4 SUBSTRAT

Substratet är det organiska material som under anaeroba förhållanden bryts ned i rötchambaren och bildar biogas. Substratet kan ha olika sammansättning men består i grunden av kolhydrater, proteiner och fetter (Gerardi, 2003). Innehållet och sammansättningen på substratet, vilka påverkar kvaliteten på både biogasen och rötresten, är viktiga att ta hänsyn

till innan substratet rötas. Nedbrytningen av substratet utförs av mikroorganismer och substratet blir mikroorganismernas mat. Exempel på vanliga substrat är matavfall från hushåll, restauranger och storkök samt restprodukter från process- och livsmedelsindustri. Även biomassa från lantbruket (gödsel, grödor, skörderester etc.), park och trädgårdsavfall samt slam från avloppsreningsverk är vanliga substrat. Det mest förekommande substratet är slam från avloppsreningsverk (Carlsson & Uldal, 2009; Nordberg, 2006; Linné m fl, 2008). Några andra substrat som är under utredning och som eventuellt har potential att användas vid biogasframställning är träråvaror (t.ex. energigrödor), hönsfjädrar, gräs och alger (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.4.1 Kolhydrater

Kolhydrater består i grunden av en sammansättning av sockerarter och återfinns ofta i relativt höga halter i växtbaserade substrat som grödor (Jarvis & Schnürer, 2009). Den enklaste formen är monosackarider, som består av endast en sockerart. Därefter, i storleksordning, kommer disackarider (två sockerarter) och till sist polysackarider (fler än två sockerarter) (Gerardi, 2003). Ju större molekylerna är desto svårare är det för mikroorganismer att bryta ner dem, vilket leder till att uppehållstiden i rötningstanken måste förlängas. Monosackarider och disackarider är relativt enkla för mikroorganismerna att bryta ner och en biogasprocess med sådant substrat går förhållandevis snabbt. Ett problem som kan uppstå vid för snabb nedbrytning i hydrolys- och fermentationssteget är att det ansamlas fettsyror i rötningstanken, vilket sänker alkaliniteten och pH-värdet (Pariwara m fl, 2008). Ett alternativ för att motverka detta är att använda sig av samrötning med ett mer svårnedbrytbart material, gärna med hög kvävehalt. Detta minskar andelen socker i rötningstanken, vilket minskar risken för en ansamling av fettsyror. Ett annat alternativ är tvåstegsrötning som beskrivs mer i avsnitt 2.5.4.

2.4.2 Fetter

Fetter kan delas in i tre grupper, mättade, enkelomättade och fleromättade fetter, beroende på hur många bindningar de har mellan kolatomerna (en, två, tre eller flera) (Gerardi, 2003). Mättat fett är stabilare än de övriga fetterna och är därför svårare för mikroorganismerna att bryta ner (Jarvis & Schnürer, 2009).

De vanligast förekommande fetterna är animaliskt och vegetabiliskt fett eller olja (Gerardi, 2003). Dessa är så kallade triglycerider som efter nedbrytning bildar långa fettsyror (LCFA: long chain fatty acids) och glycerol. Glycerolen bryts enkelt ned och bildar biogas medan LCFA på samma sätt som andra fettsyror kan hämma de metanbildande mikroorganismerna vid för höga halter och även orsaka skumning (Jarvis & Schnürer, 2009). Mer om LCFA i avsnitt 2.4.5.

2.4.3 Protein

Protein består av olika aminosyror som binds samman genom peptidbindningar. Proteinet är för stort för att mikroorganismerna skall kunna ta upp det och det krävs att de bryter upp bindningarna först. Det görs med hjälp av enzymer som "klipper" upp bindningarna så att enskilda aminosyror blir tillgängliga. De enskilda aminosyrorna tas upp av mikroorganismen och bryts ner och bildar olika organiska syror som acetat och butyrat samt även ammoniak. Acetatet blir substrat till de metanbildande mikroorganismerna medan ammoniaken höjer

alkaliniteten och därigenom motverkar ändringar i pH. En hög halt av ammoniak kan emellertid också vara toxisk för metanogenerna (Gerardi, 2003). Substrat med en hög halt av protein är slakteriavfall, höns- och svingödsel och drank från etanolindustrin (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.4.4 Kol kväveknoten

Förhållandet mellan innehållet av kol och kväve, den så kallade C/N-kvoten, i substratet är viktigt. En för låg C/N (<10-15) kan orsaka en förhöjd halt av ammoniak som kan vara giftigt för mikroorganismerna och en för hög C/N (>30) kan leda till kvävebrist. Ett bra värde på C/N ligger mellan 15-30 (Nordberg, 2006; Gerardi, 2003; Xiaoling m fl, 2008). Det optimala värdet på C/N-kvoten varierar beroende på andra miljöfaktorer i rötningstanken, vilka också påverkar nedbrytningsprocessen. Faktorer som kan påverka nedbrytningen, förutom själva C/N-kvoten, är t.ex. förekomsten av fosfor och spårämnen, ammoniakhalten och i vilken form som kolet och kvävet befinner sig (det kan vara mer eller mindre åtkomligt för mikroorganismerna) (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.4.5 Fettsyror

Lättflyktiga fettsyror, eller volatile fatty acids (VFA), är organiska syror som bildas vid fermentationen. Anledningen till att de kallas för lättflyktiga fettsyror är att de kan avdunsta och förångas vid atmosfärstryck (Gerardi, 2003). I en väl fungerande biogasprocess bryts de ner och bildar slutligen acetat som utgör 85 % av de lättflyktiga fettsyrorerna. Acetatet blir som nämnts tidigare substrat till metanogenerna. Fettsyrorerna är viktiga för metanogenerna, men en för hög belastning av lättomsatt substrat in till röt-kammaren kan leda till att för mycket fettsyror bildas i de inledande nedbrytningsstegen. Metanogenerna får då svårt att hinna med att bryta ner dem. Det i sin tur innebär att fettsyrorerna ansamlas i röt-kammaren och alkalinitet och pH sjunker, vilket kan leda till en instabil process. Lättomsatt substrat bör därför tillföras långsamt till rötningstanken (Jarvis & Schnürer, 2009; Gerardi, 2003; Pariwara m fl, 2008).

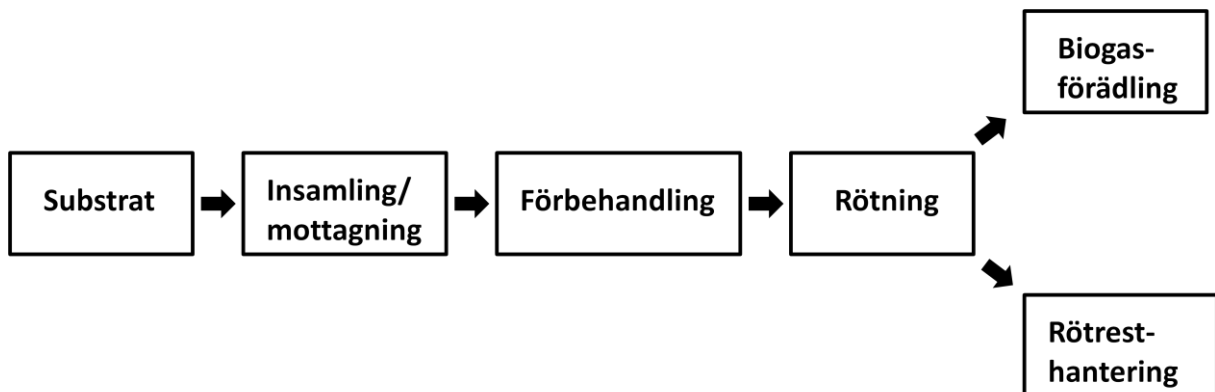
Långkedjade fettsyror (LCFA), som framförallt bildas vid nedbrytning av fettrika material, kan ha en hämmande effekt på metanogenerna och därmed biogasproduktionen (Jarvis & Schnürer, 2009). De påverkar mikroorganismernas cellmembran och hindrar cellen från att utföra sina olika funktioner som t.ex. transport av olika näringsämnen (Chen m fl, 2008).

2.4.6 Samrötning av substrat

Rötning av flera olika substrat samtidigt ger generellt en bättre produktion av biogas. Detta beror på att med fler substrat närvarande är möjligheten större att alla de närings- och spårämnen som mikroorganismerna behöver finns närvarande. Med en blandning av flera substrat blir också mikroorganismersamhället mer varierat, eftersom det består av fler olika sorters mikroorganismer som är bra på att bryta ner olika saker. Det innebär att mikroorganismersamhället blir mer stabilt eftersom chansen är större att någon grupp av nedbrytare överlever en eventuell störning, men också att mikroorganismerna bättre klarar av att bryta ned nya substrat som tillförs (Jarvis & Schnürer, 2009).

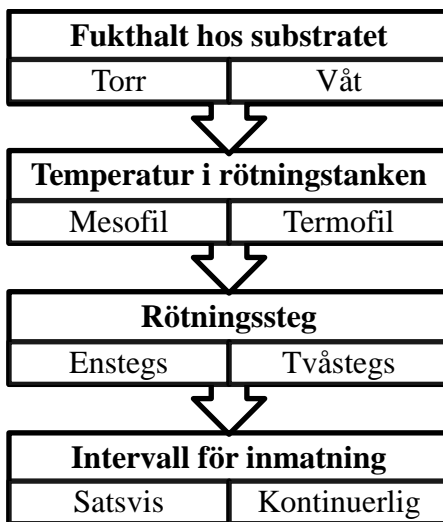
2.5 BIOGASPROCESSEN

Processen för att ta emot eller samla in organiskt avfall och framställa biogas kan allmänt beskrivas som nedan (figur 3).



Figur 3. Schematisk bild över framställningen av biogas genom rötning (modifierad efter Nordberg, 2006).

Beroende på vilket substrat som skall rötas och till vad biogasen och rötresten skall användas, så varierar processens utformning. Några vanliga processalternativ för rötningssteget kan ses nedan (figur 4).



Figur 4. En överblick av olika processalternativ för rötningssteget för framställning av biogas (modifierad efter Nordberg, 2006).

2.5.1 Förbehandling

Förbehandling kan innebära olika moment och valet av förbehandlingsmetod beror bl.a. på substratets kemiska sammansättning och struktur (Jarvis & Schnürer, 2009). Syftet är att göra substratet så lättillgängligt och lättnedbrytbart som möjligt för mikroorganismerna samt att göra det mer hanterbart (t.ex. bättre pumpbarhet) i processen.

Mekanisk förbehandling är den vanligaste metoden och innefattar storleksreducering, storleks- eller densitetsseparering och specifik materialseparering (Nordberg, 2006). Storleksreducering av materialet sker genom krossning, malning, mosning och skärningar

med hjälp av olika redskap. Det kan även vara aktuellt att öppna och separera påsar för hushållsavfall. Syftet är att minska partikelstorleken på materialet vilket underlättar nedbrytningen för mikroorganismerna.

Storleks- eller densitetsseparering syftar till att separera substratet i olika fraktioner med avseende på partikelstorlek. Det kan t.ex. vara önskvärt att fördela materialet i en fraktion med brännbart och en fraktion med organiskt material. Detta sker vanligen med hjälp av en sikt som endast släpper igenom material av en viss partikelstorlek och på så sätt separerar materialet.

Specifik materialseparering innebär att material som kan vara skadligt för processen eller slutprodukten t.ex. bestick och andra ickenedbrytbara material sorteras bort. Det sker t.ex. med hjälp av en magnet och i kombination med ovanstående förbehandlingsmetoder.

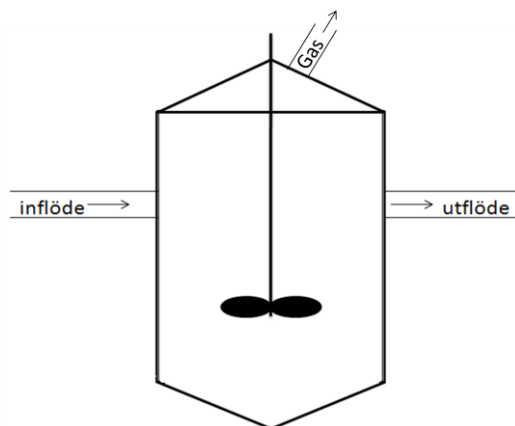
Konditionering av det ingående substratet innebär att en viss TS-halt (torrsubstanshalt) fastställs genom avvattning eller spädning. Fördelen med avvattning (förtjockning) är att TS-halten ökar och reaktorvolymen utnyttjas mer effektivt vilket kan ge en högre gasproduktion. Nackdelen är att vissa näringsämnen och löst organiskt material kan spolats ut med rejektvatten samt ett större slitage på pumpar och ledningar (Jarvis & Schnürer, 2009). Spädningen kan ske genom tillsats av vatten, processvatten (reaktorinnehåll och rejektvatten från rötningstanken) och avloppsslam. En ytterligare rening sker när tungt material som grus, sten och metall tillåts sedimentera medan lätt material som trä och plast flyter upp till ytan och avskiljs.

Hygienisering innebär korfattat att substratet värms till 70°C under en timme för att avdöda sjukdomsalstrande organismer (Svenska Gasföreningen, 2008; Carlsson & Uldal, 2009; Jarvis & Schnürer, 2009). Denna metod används framförallt vid rötning av animaliska biprodukter (ABP) och naturgödsel för att undvika smittspridning och öka hanterbarheten av framförallt rötresten (Jarvis & Schnürer, 2009).

Förutom mekanisk förbehandling så förekommer även andra metoder för sönderdelning och homogenisering av substrat som termisk, kemisk och biologisk förbehandling genom ångexplosion, värmebehandling, tillsats av syror och baser, ultraljud, elektroporation och hydrolytiska enzymer m.m. (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.5.2 Reactorer

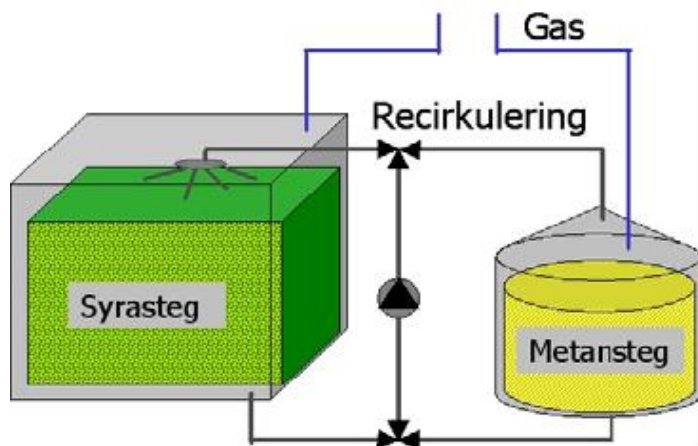
Det förekommer många olika reaktortyper och utformningar, men den mest förekommande i Sverige är en enstegs totalomblandad reaktor (CSTR: Continously stirred tank reactor, figur 5). Den är ofta byggd i stål eller betong och försedd med någon slags uppvärmning och isolering för att hålla värmen samt en omrörare. Det är viktigt att den är tät och inte släpper in syre vilket kan påverka nedbrytningsprocessen negativt. Substratet pumpas in i rötkammaren i en jämn takt och rötresten kan antingen pumpas ut eller tas ut via ett breddavlopp, medan gasen tas ut ur toppen av tanken då metan är lättare än luft (Edström & Nordberg, 2004).



Figur 5. Kontinuerligt matad enstegs totalombländad reaktor (CSTR) där inflödet utgörs av substrat och utflödet av rötrest. Biogasen tas ut ur toppen på tanken då metan är lättare än luft (modifierad efter Jarvis & Schnürer, 2009).

Ett alternativ till CSTR är en kontinuerligt beskickad pluggflödesprocess som också är relativt vanlig i Sverige (Nordberg, 2006). Där matas substratet in i rötningstanken och förflyttas med en omrörare till tankens utlopp i ett pluggflöde. På det sättet blandas inte rötat och orötat material i samma utsträckning som i en CSTR.

En tredje förekommande reaktortyp är en så kallad tvåfasprocess eller tvåstegsrötning (figur 6). Där sker hydrolysen och syrabildningen i en reaktor (syra-steget) och metanbildningen i en påföljande, seriekopplad, reaktor (metansteget). I denna typ av process är det möjligt att separat optimera de olika nedbrytningsstegen. Även om det metanbildande steget är skilt från övriga nedbrytningssteg kan en viss metangasbildning ske i syra-steget och därför finns en möjlighet att utvinna biogas även där (Nordberg, 2006).



Figur 6. Rötningprocess uppdelad i två steg. Hydrolysen och syrabildningen sker i det första steget (syra-steget) och metanbildningen i det påföljande seriekopplade steget (metansteget) (Agrigas, 2002).

2.5.3 Satsvis/kontinuerlig inmatning

Substratets egenskaper påverkar hur inmatningen till röt-kammaren utformas. Ett mer flytande material kan vanligtvis pumpas in medan mer fasta material ofta måste tillsättas på något annat sätt, t.ex. toppmatning rakt ner i reaktorn. Formen på substratet bestäms av TS-halten, alltså andelen torrt material i substratet. Man skiljer på torr- och våtrötning, men alla substrat

innehåller en viss mängd vatten. Substrat i vätskeform med en TS-halt på under 5 % rötas under kontinuerlig inmatning medan substrat med en vätskehalt på mellan 5 och 15 % rötas med så kallad halvkontinuerlig inmatning (1-8 ggr/dygn). ”Torra” substrat med en TS-halt på över 20-25 % matas in mer sällan vid så kallad satsvis rötning, medan gränsen för ett fungerande mikroorganismssamhälle är en TS-halt på 35 % (Jarvis & Schnürer, 2009).

Vid satsvis rötning rötas allt substrat på en gång och inget material tas ut eller tillsätts under röttningsprocessen. När rötningen är klar tas allt material ut och en ny sats med substrat tillförs rötkammaren. Detta kallas även för satsvis eller batchvis rötning och är t.ex. vanligt vid rötning av deponerat material. Det finns i huvudsak tre olika tekniker som används vid satsvis rötning; passiv bädd, perkolationsbädd eller dränkt bädd. Vid passiv bädd sker rötningen utan omrörning. Det sker inte heller någon form av borttransport eller recirkulation av den vätska som bildas i rötkammaren. Denna vätska innehåller metanbildande bakterier och används inom de andra två teknikerna för att på olika sätt återinföra bakterier till processen och för att snabbare kunna starta nedbrytningen av nytt material (Nordberg & Nordberg, 2007). Fördelen med satsvis rötning är att mikroorganismerna får god tid på sig att bryta ner substratet utan risk för att spolats ut. Nackdelen är att det ofta krävs att flera rötkammare körs samtidigt med olika starttider för att uppnå ett jämnt flöde av gas. Flera rötkammare innebär en större kostnad.

Vid kontinuerlig rötning pumpas samma mängd substrat in i rötkammaren som tas ut. Det sker en jämn tillförsel av substrat, vilket gör att mikroorganismerna får en jämn tillgång på mat. Det ger i sin tur en jämnare produktion av gas jämfört med satsvis rötning och möjlighet till en högre belastning av rötkammaren. Med belastning menas hur mycket organiskt material som tillförs rötkammaren per tidsenhet. Rötkammarvolymen utnyttjas på ett bättre sätt och risken för överbelastning minskar jämfört med satsvis rötning (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.5.4 Röttningssteg

Rötning kan delas upp i ett eller två steg där det vanligaste är enstegsrötning (Nordberg, 2006). Vid rötning i ett steg sker alla mikrobiologiska nedbrytningssteg i samma tank, vilket ger en relativt enkel, billig och lättöverskådlig process. Är dessutom två enstegsreaktorer parallellkopplade blir känsligheten mot avbrott mindre, i och med att de olika reaktorerna ej är beroende av varandra.

För att få en process som kan optimeras ytterligare delas rötningen upp i två steg (figur 6, avsnitt 2.5.2). I det första steget sker framförallt syrabildningen. Här kan pH-värdet bli lågt p.g.a. bildningen av organiska syror, vilket potentiellt kan hämma de metanbildande mikroorganismerna. För att undvika det sker metanbildningen i det andra röttningssteget. Där kan andelen organiska syror som tillförs regleras genom att reglera tillförd mängd rötrest/lakvatten från det första steget. Det i sin tur innebär att pH-värdet kan regleras för att ligga på en nivå som är optimal för biogasproduktionen. Tvåstegsrötning har visat sig vara effektivt, framförallt vid lättnedbrytbara substrat, med ett kraftigt ökat metanutbyte som följd jämfört med enstegsrötning (Verrier m fl, 1987; Pariwara m fl, 2008). En nackdel med tvåstegsprocessen är dock att den kräver mer arbete eftersom det bl.a. är två rötkammare och

ett flöde däremellan som skall optimeras till skillnad från en enstegsprocess som består av endast en röt-kammare.

2.5.5 Gaskvalitet

Innehållet och sammansättningen av substratet påverkar kvaliteten på biogasen och rötresten och är viktiga att ta hänsyn till. Är substratets sammansättning av kolhydrater, proteiner och fetter känd kan gasproduktionen uppskattas (tabell 3). Tabellen visar, utifrån teoretiska beräkningar, ungefärlig mängd producerad metangas per kg organiskt material samt andelen (%) metan, koldioxid och ammoniak. Teoretiska beräkningar skiljer sig dock en aning från verkligheten. Skillnaden kan t.ex. bero på i vilken form som beståndsdelarna (proteinet, kolhydraterna och fetterna) befinner sig i. Vissa former är mer svårnedbrytbara än andra, t.ex. cellulosa, och ger ett lägre gasutbyte i praktiken än i teorin. För höga halter av vissa komponenter kan indirekt verka hämmande på mikroorganismerna och därmed minska gasutbytet. Så är även fallet med protein, där höga halter av protein som bryts ner kan medföra att höga halter ammoniak bildas som i sin tur verkar hämmande på metanogenerna. Hur mycket av energin i substratet som går åt när mikroorganismerna tillväxer spelar också in (Jarvis & Schnürer, 2009), samt även processparametrar som pH, temperatur, uppehållstid och belastning och samrötningseffekter, se avsnitt 2.6 och 2.4.6 (Nordberg, 2006; Carlsson & Uldal, 2009).

Tabell 3. Data över uppskattad metanproduktion beräknad utgående från substratets sammansättning av kolhydrater, protein och fetter (Berglund & Börjesson, 2003). Bidraget från kolhydrater, proteiner och fetter var för sig kan ses överst i tabellen. Nm³ står för normalkubikmeter vilket innebär volym vid 0° C och atmosfärstryck (1,01325 bar) och VS står för organiskt material.

Substrat	Metanproduktion [Nm ³ /kg VS]	Metan [volymprocent]	Koldioxid [volymprocent]	Ammoniak [volymprocent]
Kolhydrater	0,38	50	50	-
Protein	1,00	41	39	20
Fetter	0,53	70	30	-
Matavfall	0,51	49	45	5
Trädgårdsavfall	0,50	50	47	3
Gräs	0,44	48	47	4
Halm	0,49	52	47	1
Svingödsel	0,57	52	42	6
Nötödsel	0,56	54	44	2

2.5.6 Uppgradering av biogas

Uppgraderingen av biogas har som syfte att rena gasen och höja energiinnehållet. Reningsgraden varierar med användningsområdet för gasen. Vid användning till värmeproduktion och kraftvärmeproduktion renas gasen från vatten, svavelväte och halogener medan ytterligare rening krävs för användning som fordonsgas. Metanhalt i gasen skall vara minst 95 %, vilket gör det möjligt att använda biogasen inom samma område som naturgas. Skall gasen användas till fordonsgas komprimeras den efter rening till ca 200 bars tryck och

ett lukttämne tillsätts för att eventuell läckande gas lättare skall upptäckas. Om gasen skall ledas ut på naturgasnätet krävs ytterligare rening, vilket kan uppnås med den teknik som används i Sverige idag, se t.ex. tryckvattenabsorption nedan. Uppgraderingen kan göras på olika sätt, t.ex. (Svenska Gasföreningen, 2008; Nordberg, 2006):

- Tryckvattenabsorption: Den mest förekommande uppgraderingstekniken i Sverige är tryckvattenabsorption, eller vattenskrubber som den också kallas. Den renar gasen från främst koldioxid, svavelväte och ammoniak och går ut på att dessa gaser under tryck löser sig lättare i vatten än vad metan gör. På så sätt absorberas gaserna i vattnet och metanhalten i den kvarvarande gasen höjs. Det förekommer även andra ämnen än vatten som absorptionsmedel.
- Pressure Swing Adsorption (PSA): Den näst vanligaste uppgraderingstekniken i Sverige bygger på att de olika gaserna separeras med avseende på sin molekylstorlek. Detta görs genom att trycket varieras och de olika gaserna fastnar, adsorberas, på adsorptionsytor i uppgraderingstanken.
- Membranteknik och processintern membranteknik: Vid uppgradering med hjälp av membranteknik leds gasen genom tunna hålfibrer, som släpper igenom koldioxid och vatten men inte metan. Processintern membranteknik renar gasen direkt i rötningsstanken. Där leds slammet genom en så kallad desorptionskolonn samtidigt som luft blåses genom slammet och driver bort den lösta koldioxiden. Därefter förs slammet tillbaka till röt-kammaren och metanhalten i gasen har ökat.

2.5.7 Rötresthantering

Rötresten är det som är kvar av det ursprungliga substratet när rötningsprocessen är klar. Den består av vatten, icke nedbrutet material, näringsämnen och mikroorganismer (biomassa) (Jarvis och Schnürer 2008). Kvaliteten på rötresten beror på olika faktorer (Hansson & Christensson, 2005; Jarvis & Schnürer, 2009):

- vilket substrat som rötats,
- förbehandlingsmetod,
- vilken rötningsprocess som använts,
- processförhållandena (temperatur, uppehållstid etc.),
- hur mycket av det införda substratet som brutits ner (utrötningsgrad) och
- förutsättningar vid lagringen.

Om rötresten är av tillräckligt god kvalitet, d.v.s. att den t.ex. inte innehåller tungmetaller, sjukdomsalstrande mikroorganismer, rester av läkemedel eller bekämpningsmedel, kan den med fördel användas som biogödsel (Svenska Gasföreningen, 2008). För att säkerställa kvaliteten på rötresten finns olika certifieringssystem, som SPCR 120 vid certifiering av biogödsel och REVAQ vid certifiering av slam från avloppsreningsverk. En av fördelarna med att använda rötresten som gödsel jämfört med konventionellt stallgödsel är att rötresten innehåller en högre halt ammoniumkväve, som lättare tas upp av växterna, än organiskt bundet kväve. Växterna får därmed bättre tillgång till näringsämnen vilket leder till bättre skördar (Hansson & Christensson, 2005). Konstgödsel innehåller också en hög halt av

ammoniumkväve men är mer energikrävande vid framställning än rötresten. En annan fördel, speciellt vid gödsling med rötrest från hushållsavfall och livsmedel, är att de näringsämnen som en gång togs up ur marken återförs och därmed erhålls ett slutet kretslopp (Hansson & Christensson, 2005).

2.6 VIKTIGA PROCESSPARAMETRAR

Hur bra nedbrytningen i röt-kammaren fungerar beror på hur väl mikroorganismerna trivs och reproducerar sig. Hur väl de trivs beror på vilken mat (substrat) de får och de omgivande förhållandena i röt-kammaren. Här påverkar en mängd faktorer, framförallt temperatur, pH, syrehalt, vattenhalt och tillgängligheten på det organiska materialet (Nordberg 2006; Jarvis och Schnürer 2008; Gerardi, 2003).

2.6.1 Temperatur

Mikroorganismer trivs vid olika temperaturer, ofta beroende på var de förekommer i naturligt tillstånd. Med avseende på vid vilka temperaturer de trivs bäst kan organismerna delas in i olika grupper. De fem temperaturintervall som mikroorganismerna är indelade i är (Nordberg och Nordberg 2007, Jarvis och Schnürer 2008):

- psykrofil (0-20 °C)
- mesofil (15-45 °C)
- termofil (45-75 °C)
- extremofil (≥ 65 °C)
- hypertermofil (≥ 80 °C)

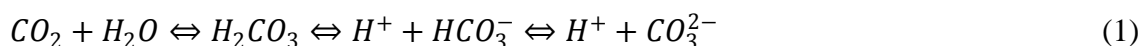
De viktiga metanbildande mikroorganismerna trivs och är mest talrika i det mesofila intervallet 30-37 °C och i det termofila intervallet 50-60 °C (Gerardi, 2003; Jarvis & Schnürer, 2009). Ökande temperatur leder generellt till att organismerna gynnas och blir mer produktiva ända tills den övre gränsen i temperaturintervallet är nådd då organismerna dör. Just under den dödliga gränsen är generellt sett mikroorganismerna som mest produktiva (Jarvis & Schnürer, 2009). En sjunkande temperatur innebär att tillväxten av metanogener avstannar snabbare än de syrabildande mikroorganismerna, som är mindre temperaturkänsliga. Syrabildarna kan då fortsätta att producera organiska syror som ökar i koncentration då det finns färre metanogener som kan bryta ner dem. Detta leder till minskad alkalinitet och sjunkande pH. Det är därför viktigt att övervaka temperaturen i rötningstanken med tillåten variation på < 1 °C/dag för mesofila processer och mellan 2-3 °C/dag för termofila processer (Gerardi, 2003). Vanligtvis drivs biogasanläggningar antingen inom intervallet 35-40 °C (mesofilt) eller 51-60 °C (termofilt) (Nordberg, 2006; Svenska Gasföreningen, 2008; Gerardi, 2003; Schnürer 2009). Nedan följer några generella egenskaper som ofta skiljer mesofil och termofil rötning (tabell 4).

Tabell 4. Jämförelse av mesofil och termofil rötning (Gerardi, 2003)

	Mesofil rötning	Termofil rötning
Belastning (org. material)	Lägre	Högre
Avdödning av patogener	Lägre	Högre
Känslighet mot gifter	Lägre	Högre
Driftkostnad	Lägre	Högre
Temperaturkontroll	Enklare	Svårare

2.6.2 Alkalinitet och pH

För en väl fungerande nedbrytningsprocess där mikroorganismerna trivs krävs ett stabilt pH på mellan 6,5 och 8,0 (Nordberg 2006; Gerardi, 2003; Schnürer 2009). pH är i sin tur beroende av alkaliniteten i substratet, alltså substratets buffertförmåga eller förmågan att motstå förändringar i pH. Förändringar i pH visar att alkaliniteten är förbrukad och det är vanligtvis ett tecken på en rejäl störning av processen. En förändring i alkalinitet visar att processen är på väg mot instabilitet. Därför är mätningar av alkaliniteten en viktig övervakningsparameter (Gerardi, 2003). En minskad alkalinitet kan bero på att bildandet av organiska syror går snabbare än vad de metanbildande organismerna hinner med att bryta ned. Detta sker ofta vid uppstart, överbelastning, temperatursvängningar eller om metanogenerna på något sätt hämmas av toxiska ämnen. En för hög alkalinitet är inte heller bra, då det leder till att ammoniak frigörs, vilket kan hämma metanogenerna. Ett bra värde på alkaliniteten varierar mellan 3 000 -15 000 mg HCO_3^- per liter (Jarvis & Schnürer, 2009). Alkaliniteten i anaeroba processer utgörs främst av bikarbonatjoner (HCO_3^-) som står i jämvikt med koldioxid (CO_2), men även karbonatjoner (CO_3^{2-}) och kolsyra (H_2CO_3) bidrar till alkaliniteten (formel 1). Vid nedbrytning av substrat som innehåller mycket aminosyror och protein bildas ammoniak som i sin tur reagerar med löst koldioxid och bildar ammoniumbikarbonat, vilket också bidrar till att höja alkaliniteten (Gerardi, 2003).



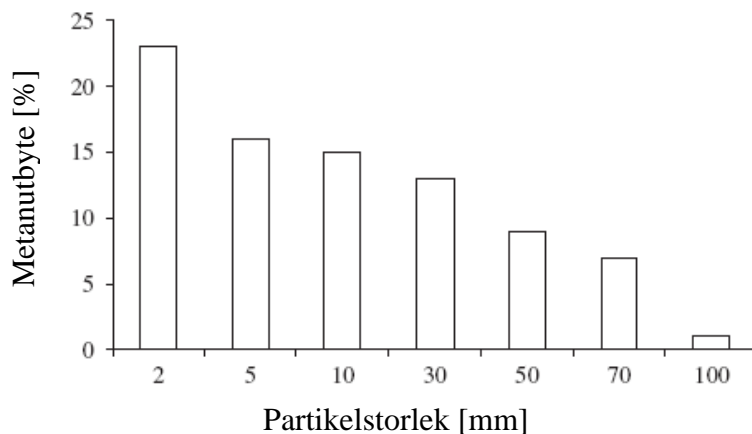
2.6.3 Syrehalt

Syrehalten bör generellt hållas på en låg nivå för att bibehålla en väl fungerande process (Nordberg 2006). Syre kan vara giftigt för vissa organismer medan det kan gynna andra. Metanbildarna är t.ex. mycket känsliga för syre och dör vid kontakt med luft, medan många fermenterande organismer kan växla mellan aerob oxidation vid förekomst av syre och fermentation vid brist på syre (Jarvis & Schnürer, 2009).

2.6.4 Tillgänglighet av organiskt material

Tillgängligheten på det organiska materialet för mikroorganismerna varierar beroende på substratet som rötas, förbehandlingsmetod och omrörning. Ett substrat med en mindre partikelstorlek har en större total yta än ett substrat med en större partikelstorlek, förutsatt samma mängd material. Den större totala ytan ger mikroorganismerna en bättre möjlighet att fästa på materialet och det blir då lättare för dem att bryta ner det (Gerardi, 2003; Jarvis &

Schnürer, 2009). Med detta följer att nedbrytningsgraden av materialet ökar när partikelstorleken minskar och så också metanutbytet (figur 7). Tiden det tar att bryta ner samma mängd substrat minskar med partikelstorleken vilket innebär att uppehållstiden kan minskas med bibehållet metanutbyte. För små partiklar kan vara ett problem då de kan sätta igen utrustning i processen. En noggrann sönderdelning behöver inte alltid innebära en minskad uppehållstid. Även om hydrolysen går snabbare med ett mer finfördelat material är det inte säkert att hela processen gör det. Metanogenerna måste hinna med att bryta ner restprodukterna från hydrolysen. Mikroorganismerna bryter också ner de flesta organiska material av varierande partikelstorlek förutsatt att de har tillräckligt med tid (Jarvis & Schnürer, 2009).



Figur 7. Partikelstorlekens betydelse för metanutbytet från sisal fiber (Mshandete, 2006). Ökningen är jämförd med obehandlat material.

Även omrörningen påverkar nedbrytningsgraden och uppehållstiden. En väl omrörd reaktor ger en jämnare temperaturfördelning och en mer homogen fördelning av mikroorganismer, substrat och näringsämnen. Detta ger i sin tur en bättre nedbrytningsgrad (Gerardi, 2003).

2.6.5 Uppehållstid och belastning

Det finns två olika mått på uppehållstid; hydraulisk uppehållstid (hydraulic retention time, HRT), och partikulär uppehållstid (solids retention time, SRT). HRT är ett mått på hur länge vätskan eller slammet stannar i rötammaren medan SRT är ett mått på hur länge det fasta materialet, mikroorganismerna, befinner sig i rötammaren. I processer utan återcirkulation av rötrest och slam är HRT och SRT ofta samma. Vid återcirkulation av slam kan SRT vara längre än HRT och vid återcirkulation av rejektvatten är HRT längre än SRT. För att undvika att mikroorganismerna spolats ut bör inte uppehållstiden i rötammaren understiga 12 dagar, metanogenernas fördubblingstid (Gerardi, 2003). Hur lång uppehållstiden bör vara beror bl.a. på hur lättnedbrytbart substratet är, temperaturen och belastningen av organiskt material in till rötammaren. En hög belastning av substrat kräver en längre uppehållstid, särskilt om substratet är svårnedbrytbart. Likaså kräver en process som drivs vid en lägre temperatur, mesofilt, generellt en längre uppehållstid än en termofil process (Borja m fl, 1995).

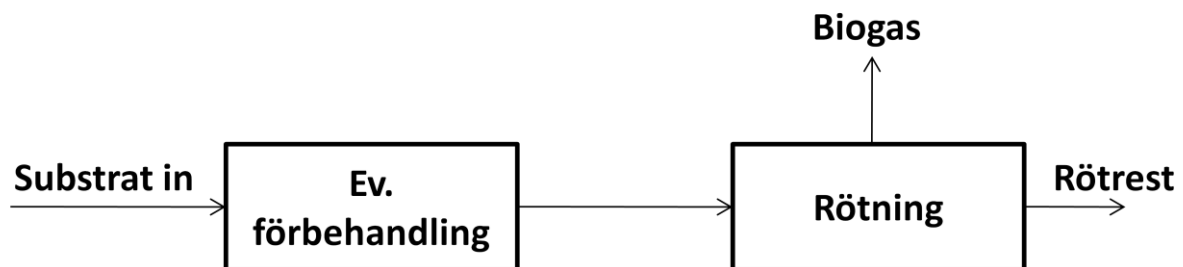
Belastningen anges vanligtvis som mängd tillförd organiskt material (VS), eller organic loading rate (OLR). OLR mäts t.ex. i kg VS/m³ dygn och ett vanligt värde vid

biogasframställning är ca 3 kg VS/m³ dygn (Schnürer, 2009). En för hög belastning kan innebära att mikroorganismerna inte hinner med att bryta ner substratet och en ansamling av icke nedbrutet material t.ex. fettsyror kan uppstå, vilket leder till ett sjunkande pH och en instabil process (Jarvis & Schnürer, 2009).

3 MATERIAL OCH METODER

3.1 MASSBALANSBERÄKNINGAR VID FÖRSTUDIER AV BIOGASANLÄGGNINGAR

Arbetet med att ta fram en generell modell för beräkning av biogasproduktion är baserat på tidigare utförda massbalansberäkningar. En massbalansberäkning innebär i princip att den mängd som går in i processen är densamma som den mängd som kommer ut. I en biogasprocess består massbalansen av ingående mängd substrat som under rötning omvandlas till motsvarande mängd biogas och rötrest (figur 8). Beräkningar är framtagna av WSP Sverige AB för att användas bland annat till förstudier av biogasanläggningar och ställdes upp specifikt för varje anläggning och saknade en generell modellstruktur. Massbalansberäkningarna används framförallt till att uppskatta mängden producerad biogas och rötrest med utgångspunkt från mängden ingående substrat och olika processbetingelser.



Figur 8. Principskiss av en massbalans för biogasproduktion, där inflödet är lika stort som utflödet.

3.2 BERÄKNINGSMODELL

För att få ett bättre underlag för beräkningar utarbetas i detta arbete en modell. Denna beräkningsmodell ställdes upp baserad på en litteraturstudie av biogasproduktion, tidigare utförda massbalansberäkningar (enklare modellberäkningar) utförda av WSP, fullskaleförsök och utrötningsförsök. Beräkningsunderlaget i modellen utarbetades också efter diskussioner med personal på WSP i Stockholm. Beräkningsmodellen byggdes sedan upp i Microsoft Office Excel för att efterlikna processflödet vid fullskalig biogasproduktion. Modellen konstruerades för att främst beräkna mängd total gas, metangas, rötrest och kvalitet på rötresten (TS, VS, kväve-, fosfor- och kaliumhalt) utifrån fakta om ingående substrat.

3.3 LITTERATURSTUDIE

För att beräkningsmodellen skall fungera krävs fakta om de ingående substraten. I litteraturstudien sammanställdes därför värden för de inparametrar som ingår i beräkningsmodellen, framförallt värden på TS [%], VS [% av TS], mängd gas per ton tillfört organiskt material [biogas/ton VS], metanhalt [%], N_{tot} [% av TS], P_{tot} [% av TS] och K [% av TS]. En lista över referenser till dessa värden sammanställdes också. Studien gick till så att databaser som Science Direct, Wiley Interscience och även sökmotorn Google användes för att hitta aktuella vetenskapliga rapporter. Personliga kontakter togs även med forskare vid JTI och SLU samt med personal vid WSP (Nordberg, 2009; Schnürer, 2009; Starberg, 2009, muntlig). Dessa värden och referenser fördes in i en tabell som sammanfogades med beräkningsmodellen.

För att få en bra bild av hur biogasproduktion går till utfördes även en litteraturstudie kring biogasprocessen i allmänhet. Denna del låg sedan till grund för utformningen av beräkningsmodellen. Material till denna studie togs fram på samma sätt som beskrivs ovan i detta kapitel.

3.4 SATSVISA UTRÖTNINGSFÖRSÖK

För att komplettera litteraturstudien och därigenom också beräkningsmodellen utfördes satsvisa utrotningsförsök på fyra olika substrat; vassle, vasslepermeat, drav och blekeripressat. Målet med försöken är att ta fram fakta om de testade substraten (främst metan- och biogasutbytet), men också att ge en bättre bild av nedbrytningsprocessen vid biogasframställning.

3.4.1 Substrat

Här följer en genomgång av de substrat och den ymp som undersöktes i de satsvisa utrotningsförsöken.

- Vassle och vasslepermeatet är båda restprodukter från mejeriindustrin, framförallt från osttillverkning. Skillnaden mellan dem är att vasslen innehåller både laktos och vassleproteiner medan vasslepermeatet till största del endast innehåller laktos (Layman, 2000). Protein är relativt energirikt och ger en högre bildning av biogas per tillförd mängd organsikt material än kolhydrater (t.ex. laktos) (tabell 3). Laktos bryts som andra enkla sockerarter ned snabbt, vilket i sig är bra men det kan också leda till instabilitetsproblem p.g.a. ökade halter av fettsyror och sjunkande pH, se avsnitt 2.4.1 och 2.4.5.
- Drav är en restprodukt från framställningen av alkohol, i detta fall whiskey, men det bildas även vid framställning av öl. Den största fraktionen består av grodd spannmål, vanligen korn som innehåller kornkärnans mer svårslösliga kolhydrater samt skal. Drav innehåller mer protein än vanligt korn men har ett lägre energiinnehåll (Planck, 2009).
- Blekeripressat är en cellulosarik vätska från blekningsprocessen inom pappersindustrin. Ett högt innehåll av cellulosa kan fördröja hydrolyssteget i biogasprocessen. Tidigare försök som gjorts på detta material har också påvisat toxiska ämnen som hämmar biogasproduktionen. (del Pilar Castillo & Hansson, 2009).
- ❖ Ymp togs från VAFAB:s biogasanläggning i Västerås och består alltså av material från en rötkammare som är i drift. Biogasanläggningen som ympen hämtades från har en uppehållstid i rötkammaren på ca 20 dygn och där rötas till största del sorterat matavfall, slam från fettavskiljare och vallgrödor (Vafab Miljö, 2009). Ympen används för att införa mikroorganismer till nedbrytningsprocessen.

3.4.2 Utförande

De fyra substraten undersöktes i så kallade satsvisa utrotningsförsök (batchvisa utrotningsförsök). Innan utrotningsförsöken påbörjades uppmättes TS- och VS-halten av de olika substraten och ympen enligt en standardmetod (APHA/AWWA/WEF, 1995). TS-halten bestämdes genom att provet först vägdes och därefter torkades i ugn vid 105 °C under 12

timmar. Därefter vägdes provet igen och kvoten mellan det torkade provet och provet innan torkning representerar TS-halten (ekvation 1).

$$\frac{\text{vikt efter torkning [g]}}{\text{våtvikt [g]}} \cdot 100 = \text{TS-halt [\%]} \quad (1)$$

VS-halten bestämdes genom att provet brändes i en ugn vid 550 °C i sex timmar och sedan subtraherades vikten efter förbränningen med provets torrsvikt (vikten efter torkningen). Därefter divideras resultatet med provets vikt efter torkning (ekvation 2).

$$\frac{(\text{vikt efter torkning [g]} - \text{vikt efter föraskning [g]})}{\text{vikt efter torkning [g]}} \cdot 100 = \text{VS-halt [\% av TS]} \quad (2)$$

Det mineralhaltiga innehåll som finns kvar efter förbränningen är provets askhalt. Resultatet av TS- och VS-bestämningen kan ses i tabell 5.

Tabell 5. Resultatet från bestämningen av TS-, VS- och askhalt för substraten och ympen som ingick i utrötningsförsöket. Standardavvikelsen som angivits är samma för alla tre prov på varje substrat

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Aska [%]
Vassle 1	18 ± 0,1	92 ± 0,1	1,5
Vassle 2	18 ± 0,1	92 ± 0,1	1,5
Vassle 3	18 ± 0,1	92 ± 0,1	1,5
Vasslepermeat 1	13 ± 0,2	89 ± 0,7	1,4
Vasslepermeat 2	13 ± 0,2	90 ± 0,7	1,4
Vasslepermeat 3	13 ± 0,2	91 ± 0,7	1,2
Drav 1	26 ± 9,1	96 ± 0,2	1,1
Drav 2	42 ± 9,1	96 ± 0,2	1,8
Drav 3	25 ± 9,1	96 ± 0,2	1,0
Blekeripressat 1	0,8 ± 0,0	58 ± 2,4	0,3
Blekeripressat 2	0,7 ± 0,0	54 ± 2,4	0,3
Blekeripressat 3	0,8 ± 0,0	58 ± 2,4	0,3
Ymp 1	3 ± 0,0	64 ± 0,6	1,3
Ymp 2	3 ± 0,0	63 ± 0,6	1,3
Ymp 3	3 ± 0,0	62 ± 0,6	1,3

Batchförsöken bestod av tre replikat av varje substrat samt tre replikat av ympen för kontroll av bakgrundproduktionen av gas. Försöken utfördes enligt en metod för batchförsök (Hansen m fl, 2004). Totalt bestod försöket av tolv flaskor innehållande en blandning av substrat, ymp och vatten samt tre flaskor med endast ymp och vatten som alla rötades i 57 dagar. Flaskorna inkuberades, förvarades, vid konstant temperatur på 37° C under omrörning på skakbord (Infors AG TR-225 CH-4103 Bottmingen) med en hastighet av 130 rpm. Gastryck och gassammansättning mättes kontinuerligt vid flera tillfällen under försökets gång.

Varje flaska hade volymen 1 120 ml och varje provlösning (substrat + ymp + vatten eller ymp + vatten) volymen 700 ml. I flaskorna med substrat tillsattes den mängd substrat som motsvarade ett innehåll av organiskt material på 2,1 g VS/700 ml. Därtill adderades den mängd ymp som motsvarade ett innehåll av organiskt material på 4,2 g VS/700 ml. Till sist fylldes flaskorna med kranvatten upp till volymen 700 ml. I flaskorna med endast ymp tillsattes den mängd ymp som motsvarade en organisk belastning av 4,2 g VS/700 ml och därefter fylldes flaskorna upp med kranvatten till 700 ml. Under arbetet med att tillsätta substrat och/eller ymp sköljdes flaskorna med kvävgas (N₂) för att hålla syrehalten så låg som möjligt. Flaskorna stängdes sedan med gummiproppar och en aluminiumring.

3.4.3 Provtagning

Provtagning skedde kontinuerligt ur flaskorna och vid varje tillfälle mättes gastrycket och ett gasprov togs. Gastrycket mättes med hjälp av en digital tryckmätare (Testo 512, Testo AG, Lenzkirch, Germany). Gasprovet togs med hjälp av en 2 ml spruta och fördes därefter över till ett mindre glaskärl på 23 ml, förslutet med en gummikork och aluminiumkapsyl. Efter att provtagningen var klar justerades trycket i flaskorna till atmosfärstryck genom att gasen i flaskorna leddes ut till en gaspåse.

Den första provtagningen utfördes dagen efter att försöken startades den 12 okt. Det optimala trycket i flaskorna för provtagning ligger mellan 400 och 800 mbar (Schnürer, 2009, muntlig) och provtagningen ägde rum kontinuerligt med hänsyn till detta intervall.

3.4.4 Analys av metanhalt

Biogasens innehåll av metan analyserades med hjälp av en gaskromatograf (PerkinElmer ARNEL Clarus 500) med helium som bärargas vid ett flöde av 31 ml/min. Injektionstemperaturen sattes till 60° C med hjälp av en Headspace-sampler Turbo Matrix 110 och kolonnen som användes var en 7' HayeSep N 60/80, 1/8" SF. Det injicerade gasprovets volym var 2 ml och kromatografens detektor var en flamjonsdetektor (FID) med en arbetstemperatur på 250° C.

3.5 FULLSKALEFÖRSÖK

Resultat av fullskaleförsök vid Fillanverket i Sundsvall studerades under två olika tidsperioder. Mellan den 17 juni och den 6 augusti (51 dagar) samt mellan den 15 september och den 11 november (58 dagar) år 2009. Vid det första tillfället, försök A, provrötades vasslepermeat och vid det andra tillfället, försök B, provrötades vassle. Vid båda tillfällena utfördes rötningen tillsammans med slam från avloppsreningsverket och returprodukter från mejeriindustrin. Dessa försök utfördes av MittSverige Vatten i Sundsvall för att undersöka anläggningens förmåga att kontinuerligt ta emot vassle/vasslepermeat. Fullskaleförsöken studerades i detta arbete dels för att ge en bättre bild av biogasproduktion generellt, dels för att kunna jämföra beräkningsmodellen med värden från biogasproduktion i full skala.

3.5.1 Fillanverket

Fillanverket är ett avloppsreningsverk utrustat med en biogasanläggning för slamreduktion. I biogasanläggningen rötas primärslam och överskottsslam från den egna reningsprocessen, slamvatten från slutna tankar, förtjockat/avvattnat slam från trekammarbrunnar och även

externt organiskt material (EOM) som innefattar bl.a. returprodukter från mejeriindustrin (mjölk, fil, yoghurt etc.). Primärslammet (där slam från slutna tankar och trekammarbrunnar inkluderas) och överskottsslammet blandas och förtjockas till ett råslam innan det pumpas in i röttkammaren som drivs vid en temperatur på runt 37° C. Driftparametrar från Fillanverket innan försöken startades går att utläsa nedan (tabell 6). I den totala gasproduktionen (1 450 Nm³) ingår även gas producerad från vinlank (restprodukt från alkoholframställning). Vinlanken är dock ej medräknad i övriga värden. Den genomsnittliga inpumpningen av vinlank var i medeltal mindre än 1 m³/dygn. Rötningen av vinlank upphörde vid årsskiftet 2008/2009.

Tabell 6. Driftparametrar från Fillanverket 2008 innan fullskaleförsöken (modifierad efter Ullman & Juhlin, 2009)

Parameter	Värde	Enhet
Rötkammarvolym	2000	m ³
Organisk belastning	0,9	kg VS/m ³ d
Slamflöde in till röttkammare	3,4	m ³ /h
TS-halt	2,7	%
TS in till röttkammare	2,2	ton TS/d
VS in till röttkammare	1,7	ton VS/d
N_{tot} i råslam	5,4	% av TS
P_{tot} i råslam	2,0	% av TS
Gasproduktion	1450	Nm ³ /d
Specifik gasproduktion	1,4	Nm ³ /kg VS red

3.5.2 Substrat

De substrat som användes vid fullskaleförsöken var vasslepermeat och vassle som båda är restprodukter från mejeriindustrin samt råslam och EOM.

- Vasslepermeatet i fullskaleförsöket togs från ett annat mejeri än vasslepermeatet i det satsvisa utrötningsförsöket p.g.a. att mejeriet flyttade sin produktion. Dessa två permeat antas ha samma egenskaper. För att se mer om vassle och vasslepermeat se avsnitt 3.4.1 ovan.
- Råslammet består av primärslam (där slam från slutna tankar och trekammarbrunnar ingår) och överskottsslam som blandas och förtjockas.
- Returprodukter från mejeriindustrin kan vara t.ex. mjölk, grädde, fil, yoghurt etc. Innehållet kan variera beroende vad som gått i retur men innehållet är över lag fettriakt med en låg alkalinitet som kan ställa till problem i form av surjäsning, se avsnitt 2.4.5.

3.5.3 Utförande

Utförandet av de båda fullskaleförsöken följde samma tillvägagångssätt. Tillsats av substraten utfördes stegvis för att undvika ansamling av fettsyror och försurning (se avsnitt 2.4.1 och 2.4.5). Tillförseln av substrat i försök A utfördes i möjligaste mån enligt schemat i tabell 7.

Vid försök B utfördes introduktionen av substrat med en drygt dubblad mängd, jämfört med försök A, dock fortfarande stegvis. Mer exakta värden på införd mängd vasslepermeat till röt-kammaren går att hitta i tabell 16 och värden på införd mängd vassle i tabell 17 i bilaga 2 (Tuve-sson, 2009, muntlig).

Tabell 7. Tabell med ungefärlig tillsatt mängd vasslepermeat vid fullskaleförsök A (Modif-ierad från Ullman & Juhlin, 2009)

Vecka	Tillförd mängd vasslepermeat [m³/d]
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,7
6	3,5
7	4,0

3.5.4 Provtagning

Provtagning på recirkulerat slam ägde rum varje vardag, med vissa undantag, och vid varje provtillfälle analyserades bl.a. TS- och VS-halt. Gasproduktionen mättes kontinuerligt med en onlinemätare som registrerade både total gasproduktion och metanhalt.

3.6 BERÄKNINGAR FÖR JÄMFÖRELSE AV BERÄKNINGSMODELL MED FULLSKALEFÖRSÖK

För att kunna jämföra beräknade värden från modellen med resultatet från biogasanläggningar i full skala utfördes två olika beräkningar. En beräkning för jämförelse med fullskaleförsök A och en för jämförelse med fullskaleförsök B. Vid båda jämförelserna beräknades biogas- och metanproduktion utifrån en given mängd ingående substrat, vilken hämtades från respektive fullskaleförsök. Beräkningarna utfördes alltså med hjälp av den skapade beräkningsmodellen och värden på de ingående substraten från litteraturstudien och rötning-försöken. Indata som användes vid beräkningen för jämförelse med fullskaleförsök A redovisas i tabell 8 medan indata som användes vid beräkningen för jämförelse med fullskaleförsök B redovisas i tabell 9 nedan.

Vid båda beräkningarna togs värdena för råslammet från fullskaleförsöken och inte från litteraturstudien. Anledningen till detta var att det saknades värden på flödet av de olika komponenter som ingår i råslammet (primärslam och överskottsslam, avsnitt 3.5.2), tillsammans med att det saknades fakta om råslam i litteraturen. Värden på nedbrytningsgraden för de olika substraten uppskattades utifrån tidigare beräkningar (Starberg 2009, muntlig; Ullman, 2009, muntlig). Resultatet av beräkningarna redovisas i avsnitt 4.3.6 nedan.

Tabell 8. Indata till beräkningsmodellen för beräkning och jämförelse mot fullskaleförsök A (vasslepermeat)

Parametrar	Råslam	Mejeriretur	Vasslepermeat	Enheter
Flöde	76,2 ^c	2,4 ^c	3,9 ^c	m ³ /d
TS-halt	2,6 ^g	20,0 ^f	16,0 ^f	%
VS-halt	75,5 ^g	95,0 ^f	92,0 ^f	% av TS
Specifik gaskonstant	0,9 ^d	0,5 ^f	0,8 ^a	Nm ³ /kg VS
Metanhalt	59,8 ^d	67,0 ^f	42,4 ^b	%
Nedbrytningsgrad	60,0 ^e	80,0 ^e	80,0 ^e	%

^a Ackumulerad mängd gas under 57 dagar från utröttningsförsök. ^b Genomsnittlig metanhalt efter 32 dagar från utröttningsförsök. ^c Medelvärde från fullskaleförsökets 20 sista dagar. ^d Medelvärde från fullskaleförsök ett, innan försöksstart. ^e Värden från tidigare beräkningar utförda av WSP. ^f Värden från litteraturstudie (inklusive utröttningsförsök). ^g Medelvärde från fullskaleförsök B.

Tabell 9. Indata till beräkningsmodellen för beräkning och jämförelse mot fullskaleförsök B (vassle)

Parametrar	Råslam	Mejeriretur	Vassle	Enheter
Flöde	72,4 ^c	3,6 ^c	7,5 ^c	m ³ /d
TS-halt	2,8 ^c	20,0 ^f	17,0 ^f	%
VS-halt	78,4 ^c	95,0 ^f	91,0 ^f	% av TS
Specifik gaskonstant	0,9 ^d	0,5 ^f	0,9 ^a	Nm ³ /kg VS
Metanhalt	61,6 ^c	67,0 ^f	45,3 ^b	%
Nedbrytningsgrad	60,0 ^e	80,0 ^e	80,0 ^e	%

^a Ackumulerad mängd gas under 57 dagar från utröttningsförsök. ^b Genomsnittlig metanhalt efter 32 dagar från utröttningsförsök. ^c Medelvärde från fullskaleförsökets 20 sista dagar. ^d Medelvärde från fullskaleförsök ett. ^e Värden från tidigare beräkningar utförda av WSP. ^f Värden från litteraturstudie (inklusive utröttningsförsök).

Resultaten från ovan nämnda beräkningar jämfördes med medelvärdet av resultaten från fullskaleförsökens 20 sista dagar. Detta för att säkerställa att gasproduktionen och nedbrytningen av substratet i röt-kammaren startat vid jämförelsen, samt för att substratsammansättningen, som var innan försöken startade, skall ha hunnit sköljas ut. Uppehållstiden under försökens 20 sista dagar var ca 24 dygn. Medelvärden från de 20 sista dagarna av fullskaleförsök A och B kan ses i tabell 10 och tabell 11 nedan.

Tabell 10. Genomsnittliga värden av flödet till rökammaren från de 20 sista dagarna (20 mätpunkter med standardavvikelse där inget annat anges) av fullskaleförsök A och B

Fullskaleförsök	A			B		
	Flöde [Nm ³ /d]	TS-halt [%]	VS-halt [% av TS]	Flöde [Nm ³ /d]	TS-halt [%]	VS-halt [% av TS]
Råslam	76 ± 3	3 ± 0 ^a	75 ± 3 ^a	71 ± 0	3 ± 0	78 ± 1
EOM	2 ± 1	11 ^b	95 ^b	4 ± 0	11 ^b	95 ^b
Vasslepermeat	4 ± 1	18 ^c	95 ^c	-	-	-
Vassle	-	-	-	7 ± 4	18 ^c	95 ^c

^a Medelvärdena för TS och VS är framräknade för 1/9-5/11 2009 (66 mätpunkter från fullskaleförsök B) då värden från försök A saknades. ^b Uppskattade medelvärden som används vid Fillanverket. Dessa värden kan variera beroende på substratets sammansättning (Tuveesson, 2009). ^c Bedömda värden utifrån tidigare försök (Starberg & Ullman, 2009).

Tabell 11. Genomsnittlig gasproduktion från fullskaleförsök A och B. Värdena är medelvärden från de 20 sista dagarna av respektive försök med standardavvikelse

Fullskaleförsök	A	B
	[Nm ³ /d]	[Nm ³ /d]
Biogas	1513 ± 122	2122 ± 346
Metangas	785 ± 67	1294 ± 197

4 RESULTAT

4.1 LITTERATURSTUDIE

Litteraturstudien resulterade i en sammanställning av fakta om biogasframställning generellt och i en schablonvärdestabell för indata till beräkningsmodellen. I schablonvärdestabellen samlades grundläggande fakta om några vanliga och några mer ovanliga substrat. Värdena som finns med i schablonvärdestabellen kommer till största delen från olika satsvisa utrotningsförsök och i många fall är det medelvärden från olika försök. Tabellens syfte är att ge ett underlag för uppskattningen av biogaspotentialen från olika substrat. Värdena i schablonvärdestabellen är alltså tänkta att användas när inga försök har gjorts på det aktuella substratet och värden saknas. En förenklad bild av schablonvärdestabellen redovisas nedan (tabell 12). Schablonvärdestabellen kan ses i sin helhet i bilaga 2 (tabell 18) och tillhörande referenslista finns i avsnittet källor till schablonvärdestabellen.

Tabell 12. Förenklad schablonvärdestabell med värden från litteraturstudien. Referens nummer 1 till och med 18 är medelvärden från de olika rapporter som det refereras till. Från referens 19 och uppåt har värden lagts till i kolumner där värden saknats. Inga nya medelvärden har beräknats

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Metanhalt [%]	N_{tot} [% av TS]	P_{tot} [% av TS]	Referenser
Drank	8	9		4	-	2,6,13,18
Flytgödsel (svin)	8	80	65	6	2	1,3,5,6,10,11,21, 25
Matavfall (hushåll)	33	85	63	2,2–3,1	0,3-0,6	1,2,3,4,10,14,17, 20
Majs	30	90	56	1,1	0,2	1,4,7,10,21
Potatis (blast)	15	80	56			4,7
Primärslam	5	65	60	2,5	1,6	19,24,27
Sockerbeta	25	94	53	1	-	1,4,7,10,11
Vete	86	98	53	2	0	4,7,10,21

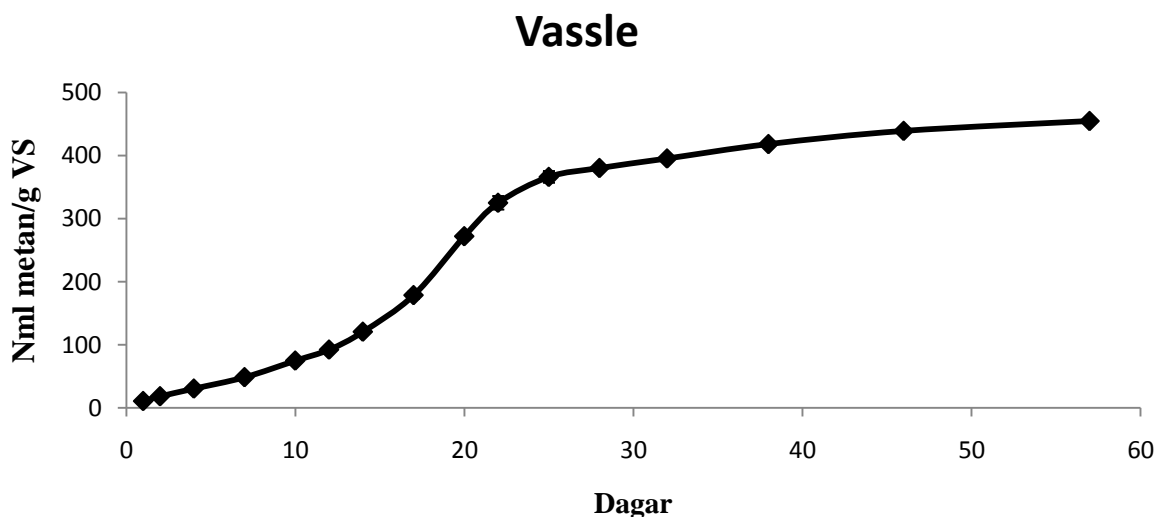
4.2 SATSVISA UTRÖTNINGSFÖRSÖK

Resultaten från utrötningsförsöken sammanfattas i tabell 13. Försöken avslutades när metangasproduktionen från substraten var densamma som metangasproduktionen från ympen och metanbildningskurvorna planat ut.

Tabell 13. Biogaspotential från utvärderade substrat i de satsvisa utrötningsförsöken. Gasproduktionen från ympen har subtraherats från värdena i tabellen. Kolumn A visar medelvärdet av metanproduktionen i Nml CH₄/g VS, kolumn B visar provdagen med högst metanproduktion efter försökets start, C visar medelvärdet av metanhalten i % under försökstiden och kolumn D ackumulerad metangas (Nml CH₄/g VS) med standardavvikelse efter olika inkubationstid

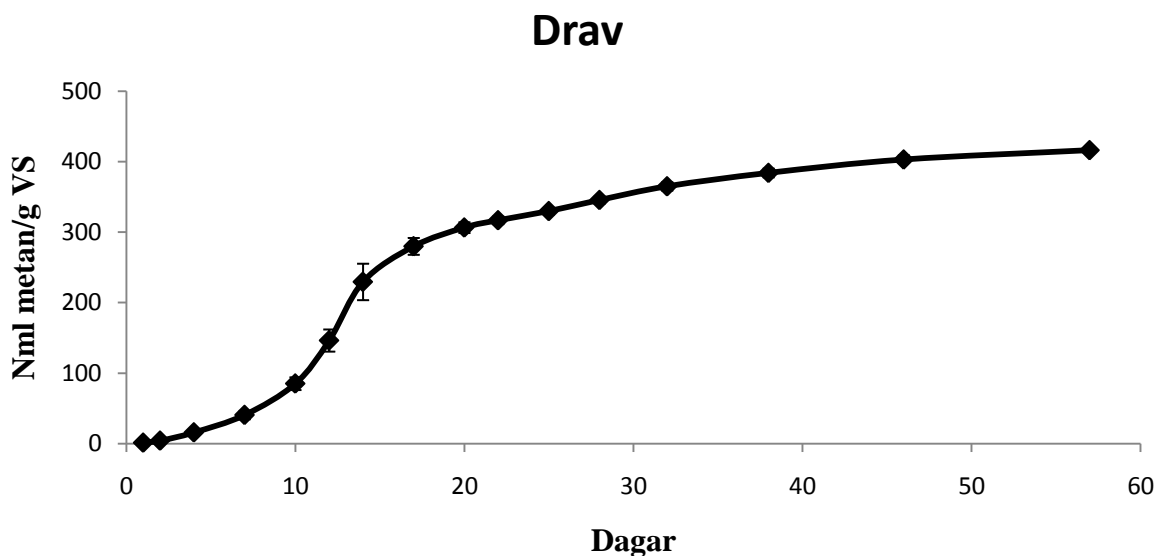
Substrat	A	B	C	D		
				20 dagar	32 dagar	57 dagar
Vassle	28	20	49	272 ± 5	395 ± 1	455 ± 0,1
Vasslepermeat	23	20	46	237 ± 19	323 ± 1	368 ± 3,1
Drav	26	14	47	307 ± 8	365 ± 6	416 ± 6,2
Blekeripressat	22	17	45	243 ± 6	295 ± 2	348 ± 0,8

Vassle var det substrat som gav upphov till den största metangasproduktionen (tabell 13 och figur 9). Den ackumulerade mängden metan från vassle var vid försökets slut 455 Nml CH₄/g VS och på den 20:e provdagen uppnåddes den högsta metanproduktionen per dygn från vasslet.



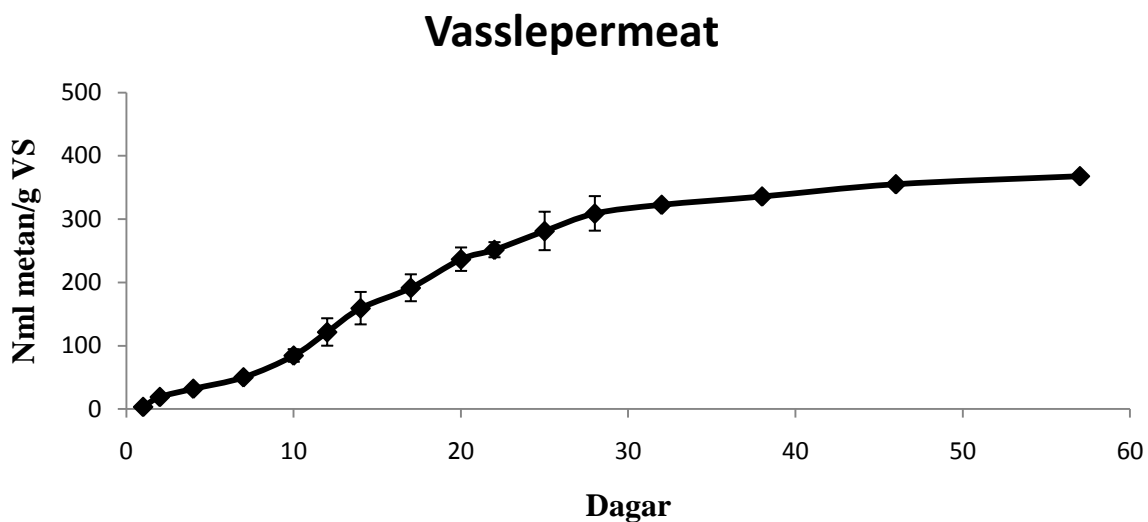
Figur 9. Ackumulerad metanmängd (CH₄ Nml/g VS) från vassle med standardavvikelsen från tre replikat. Bakgrundsgas från kontroll har subtraherats från mätvärdena.

Dravet hade vid försökets slut producerat 416 Nml CH₄/g VS, vilket var den näst högsta ackumulerade mängden i försöket (figur 10). Efter 20 dagar hade dravet den högsta metanproduktionen av alla substrat i försöket. Dravets egen maxproduktion per dygn av metangas uppnåddes redan efter 14 dagar.



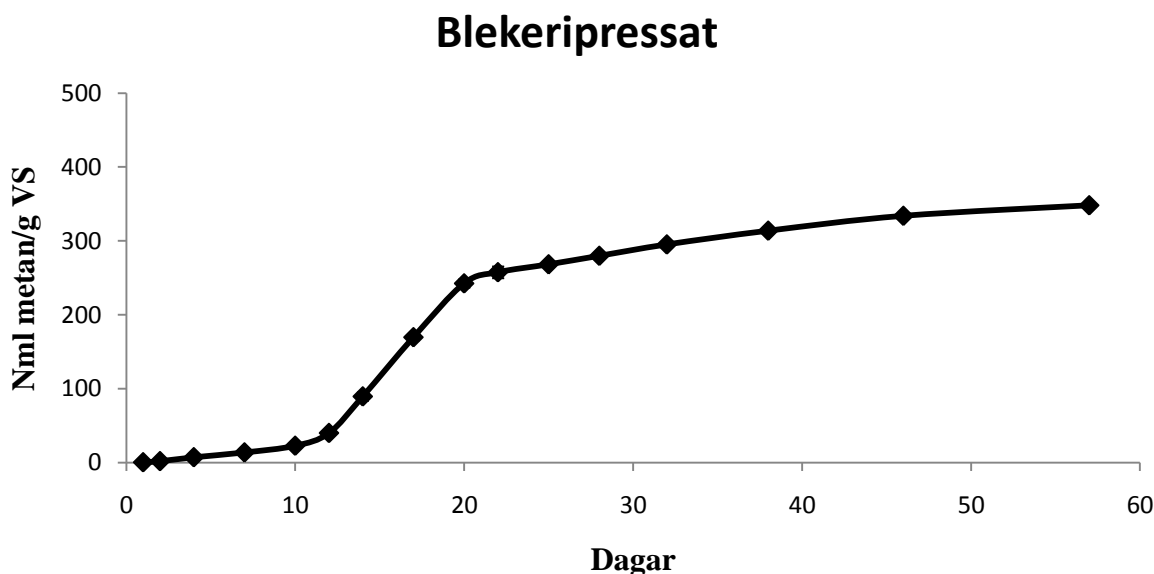
Figur 10. Ackumulerad metanmängd (CH₄ Nml/g VS) från drav med standardavvikelsen från tre replikat. Bakgrundsgas från kontroll har subtraherats från mätvärdena.

Vasslepermeatet gav upphov till en ackumulerad mängd metangas på 368 Nml CH₄/ g VS vid försökets slut (figur 11), vilket var lägre än vanlig vassle och drav. Efter 20 dygn uppnådde vasslepermeatet sin maxproduktion av metan per dygn.



Figur 11. Ackumulerad metanmängd (CH₄ Nml/g VS) från vasslepermeat med standardavvikelsen från tre replikat. Bakgrundsgas från kontroll har subtraherats från mätvärdena.

Blekeripressatet resulterade i en ackumulerad mängd metan på 348 Nml CH₄/ g VS, vilket var den lägsta mängden av de testade substraten. I figur 12 kan man också se att det inledningsvis sker en fördröjning av nedbrytningen, en så kallad laggfase. Därefter sker nedbrytningen relativt snabbt och efter dag 17 uppnår blekeripressatet sin maximala metanproduktion per dygn.



Figur 12. Ackumulerad metanmängd (CH₄ Nml/g VS) från vasslepermeat med standardavvikelsen från tre replikat. Bakgrundsgas från kontroll har subtraherats från mätvärdena.

4.3 BERÄKNINGSMODELL

En beräkningsmodell byggdes upp för att snabbt och enkelt kunna ta fram värden på producerad mängd biogas och rötrest. Modellen är uppbyggd i Microsoft Office Excel och ger ungefärliga värden på medelvärdet av biogas- och rötrestproduktion utgående från sort och mängd av rötat substrat.

4.3.1 Struktur

Modellen är fördelad på fyra olika beräkningsblad, eller flikar, i ett Exceldokument; indatatabell, tabell med schablonvärden, beräkningsdel samt en flik för resultatpresentation. Vid tillämpning av modellen förs data om respektive substrat in i indatatabellen där även val av olika för- och efterbehandlingsmetoder utförs. Beräkningsdelen hämtar därefter data från indatatabellen och utför beräkningarna. Om data ej förs in i indatatabellen hämtar beräkningsdelen data från schablonvärdestabellen. Resultatet från beräkningarna redovisas sedan i resultatpresentationen. I figur 13 redovisas en översiktlig bild av beräkningsmodellen, där varje ruta motsvarar en flik i Exceldokumentet.



Figur 13. Schematisk bild av beräkningsmodellen. Fakta om aktuella substrat förs in i indatatabellen eller hämtas från schablonvärdestabellen. Därefter utförs beräkningarna i beräkningsdelen och resultatet presenteras i resultatpresentationens flik. Varje ruta motsvarar en flik i Exceldokumentet.

4.3.2 Indatatabell

I denna flik finns ett antal tabeller där fakta om de olika ingående substraten samt för- och efterbehandlingsmetoder förs in. För- och efterbehandlingsmetoderna som kan anges är förtjockning och/eller spädning innan rötammaren samt förtjockning av rötresten efter rötammaren. Spädningen innan rötammaren sker antingen med hjälp av rejektvatten från rötrestförtjockningen eller med vanligt vatten. Dessa metoder aktiveras i beräkningsmodellen med hjälp av logik (om-satser) beroende på om data förs in i de celler som aktiverar behandlingen i indatatabellen.

Viktiga indata, för varje substrat, som förs in i indatatabellen:

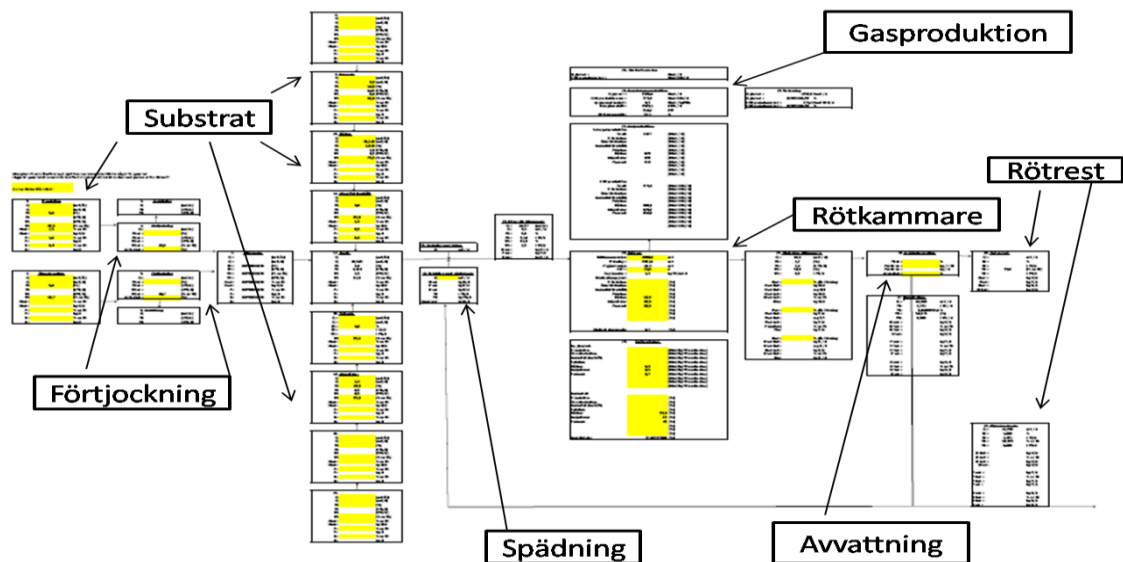
- Mängd substrat [$\text{m}^3/\text{år}$, m^3/d]
- TS- och VS-halt [% , % av TS]
- nedbrytningsgrad [%]
- gasproduktionskonstant [Nm^3 biogas/kg VS nedbrutet]
- metanhalt [%]
- kväve (N_{tot} [% av TS] samt [% som går i lösning])
- fosfor (P_{tot} [% av TS] samt [% som går i lösning])
- kalium (K_{tot} (% av TS) samt (% som går i lösning)).

En bild av indatatabellen redovisas i figur 14.

Här förs alltså inga värden in. Nedan följer en beskrivning av modellens grundläggande beräkningar. Ekvationer redovisas i bilaga 3.

- Modellen beräknar total mängd producerad gas [Nm^3 biogas/dygn] från varje substrat utifrån mängd tillfört substrat [$\text{m}^3/\text{år}/\text{d}$], substratets TS- och VS-halt [%], % av TS], nedbrytningsgrad [%] och en gasproduktionskonstant [Nm^3 biogas/kg VS nedbrutet].
- Hur mycket metangas som produceras beräknas med hjälp av införda värden på metanhalt [%] och total mängd producerad gas [Nm^3 biogas/dygn] för respektive substrat.
- Mängden rötrest beräknas med hjälp av nedbrytningsgraden [%] för varje substrat och ingående mängd substrat [$\text{m}^3/\text{år}/\text{d}$].
- Näringsinnehållet i rötresten beräknas utifrån nedbrytningsgraden för varje ingående substrat [%], hur stor del [%] som går i lösning av varje näringsämne [N, P, K] samt mängden av varje näringsämne [kg näringsämne/dygn] som går in i rötkammaren.

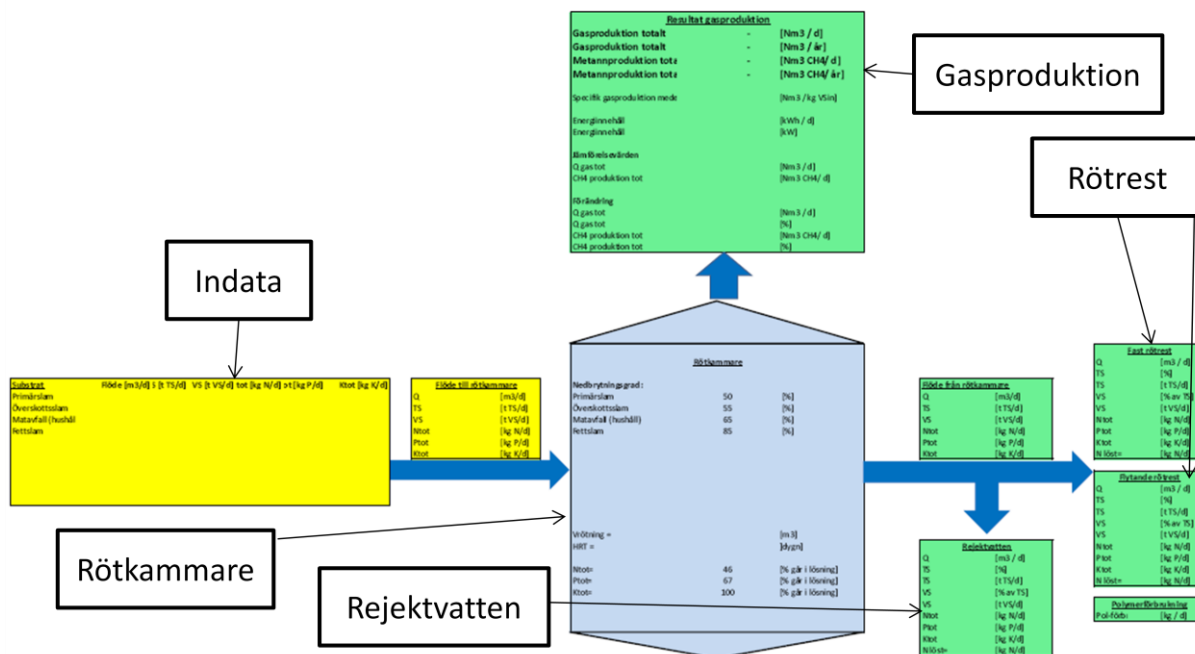
I figur 15 visas en bild av beräkningsdelen från modellen.



Figur 15. Schematisk bild av beräkningsdelen i beräkningsmodellen. En större bild av beräkningsdelen återfinns i bilaga 3.

4.3.5 Presentation av beräkningar

Här visas resultatet från beräkningsdelen i en mer överskådlig form. Det som visas i resultatpresentationen är endast relevanta resultat och indata. Överflödiga information, som t.ex. beräkningar av mellanliggande steg redovisas ej här. Presentationen visar viktiga indata samt resultatet av beräkningarna i form av bl.a. producerad mängd gas totalt [Nm^3 biogas/dygn], mängd metan totalt [$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{dygn}$], energiinnehåll [kWh/dygn], mängd rötrest [m^3/dygn], TS-halt i rötresten [%] och näringsinnehållet i rötresten [(kg N, P eller K/dygn)]. I figur 16 nedan finns en bild av resultatpresentationen.



Figur 16. Bild av resultatpresentationen. Fält markerade med gult innehåller indata medans gröna fält innehåller utdata. Det blå fältet innehåller de konstanter som representerar nedbrytningen i röt-kammaren. De gröna fälten till höger visar mängd rötrest (flytande, fast), polymerförbrukning och rejeckt-vattenflödet och det gröna fältet längst upp visar bl.a. biogasproduktionen. En större bild av resultatpresentationen återfinns i bilaga 3.

4.3.6 Jämförande beräkningar

I tabell 14 presenteras resultatet av beräkningarna som utförts med beräkningsmodellen för jämförelse med fullskaleförsök A och B. Resultaten är medelvärden av förväntad mängd producerad gas.

Tabell 14. Producerad mängd gas från fullskaleförsök A och B (inklusive standardavvikelse) jämfört med beräknade värden från beräkningsmodellen

Gas	Beräknade värden		Fullskaleförsök		
	A	B	A	B	
Biogas	1365	1981	1513 ± 122	2122 ± 346	Nm ³ /d
Metangas	769	1098	785 ± 67	1294 ± 197	Nm ³ /d

Resultaten visar att de beräknade värdena ligger inom standardavvikelsen för värdena från fullskaleförsöken. De beräknade värdena ligger dock generellt lägre än värdena från fullskaleförsöken.

5 DISKUSSION

Syftet med det här arbetet var att skapa en modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktion från planerade biogasanläggningar. Modellen byggdes upp utifrån en litteraturstudie av både biogasproduktion generellt och av fakta om olika substrat. Utöver litteraturstudien utfördes även satsvisa utrotningsförsök tillsammans med studier av fullskaleförsök för att ta fram fakta om olika substrat.

5.1 LITTERATURSTUDIE

Värden som fördes in i schablonvärdestabellen kommer till allra största del från satsvisa utrotningsförsök. Det betyder att dessa värden är framtagna under optimala röttningsförhållanden i laboratoriemiljö, som ofta ger en högre biogasproduktion än vad som är möjligt i verkligheten. Mikroorganismerna får här ostört, under konstant temperatur, konstant omrörning, oförändrad substratsammansättning och tillräckligt lång tid bryta ner substratet. Detta ger en hög nedbrytningsgrad och gasproduktion. Vid fullskaleanläggningar skiljer sig förutsättningarna från försök i mindre skala, då det som är optimalt för mikroorganismerna inte alltid är praktiskt genomförbart i stor skala. Här är tiden som mikroorganismerna har att bryta ner substratet ofta begränsad, eftersom nytt substrat kontinuerligt måste tillföras till röt-kammaren för att hålla storleken på substratlagren på en lagom och hanterbar nivå. I och med att nytt substrat ständigt tillförs röt-kammaren varierar också sammansättningen av substratet. Detta innebär att mikroorganismerna hela tiden måste anpassa sig till nya förutsättningar vad gäller tillgång på näring. Två andra faktorer som är svårare att optimera i större än mindre skala, är temperatur och omrörning. På grund av den stora volymen kan det vara svårt att få en omblandning av hela röt-kammaren och därigenom en jämn temperaturfördelning. Detta är faktorer som påverkar gasproduktionen negativt och ofta ger en lägre produktion av gas vid stor skala än vid liten skala. En faktor som dock kan ge en högre produktion av gas vid biogasproduktion i stor skala är så kallade samrötningseffekter. När flera substrat blandas kan det göra att tillgången på näring förbättras för mikroorganismerna och att gasproduktionen ökar.

Värdena i schablonvärdestabellen ger alltså ingen exakt bild av hur mycket gas som kommer att produceras från ett visst ett substrat vid rötning i stor skala. De är framtagna för att användas som riktlinje och ungefärligt svar när mer grundliga undersökningar av aktuella substrat saknas. Vid jämförelse av beräkningar utförda med värden från schablonvärdestabellen i beräkningsmodellen med värden från fullskaleförsöken visade sig schablonvärdena ge ett ganska bra svar. De beräknade värdena visade sig ligga inom, eller på gränsen till, variationen för standardavvikelsen av värdena från fullskaleförsöken (tabell 14). Detta säger dock inte allt för mycket om modellen och schablonvärdenas riktighet men ger en fingervisning om att modell och schablonvärden ger ett någorlunda rättvisande resultat. Det som också kunde utläsas var att beräkningsmodellen generellt gav lägre värden än fullskaleförsöken vilket tyder på att schablonvärdena och beräkningsmodellen inte överskattar gasproduktionen. För att ytterligare utvärdera värdena i schablonvärdestabellen och beräkningsmodellen krävs fler jämförelser med försök i full skala, något som ej hunnits med inom tidsramen för detta arbete.

5.2 SATSVISA UTRÖTNINGSFÖRSÖK

De satsvisa utrötningsförsöken utfördes för att komplettera schablonvärdestabellen och därigenom också beräkningsmodellen. Förutom detta gav de också en bättre bild av hur nedbrytningsprocessen vid biogasframställning går till. Resultaten från försöken är ungefärliga riktvärden för hur metanproduktionen från dessa substrat ser ut. Att resultaten endast skall ses som riktvärden beror på att variationen i resultatet från satsvisa utrötningsförsök kan vara stor. Värden från samma substrat där prover tagits vid olika tillfällen kan skilja sig betydligt från varandra. Till och med värden från samma provtagning kan variera. Variationerna i gasproduktion och metanhalten i gasen beror bl.a. på att substratets sammansättning kan variera mycket beroende på årstid (gödsel m.m.), produktionsmetod (restprodukter från olika industrier), insamlingsområde och kultur (ger varierande matavfall). Även miljöfaktorer som temperatur och omrörning kan variera mellan olika försök och inverka på resultatet. Detta gör att värdena från utrötningsförsöken och även i schablonvärdestabellen innefattar en viss osäkerhet.

Vassle var det substrat som visade sig ha den största metangaspotentialen, alltså störst mängd ackumulerad gas vid försökets slut. Detta var väntat då vassle innehåller en stor del lättnedbrytbara och energirika kolhydrater (laktos) och även proteiner. Dessa proteiner saknas i vasslepermeatet och som väntat blev också metangaspotentialen lägre för vasslepermeatet än för vasslet.

Att dravet gav upphov till en hög gasproduktion och relativ snabb nedbrytning var något oväntat då dravet består av mer svårnedbrytbara kolhydrater. Den snabba nedbrytningen kan bero på att ympen innehåller mikroorganismer som är vana vid många olika och mer svårnedbrytbara substrat, vilket innebar att dravet inte var något större problem. Det kan även bero på att förhållandena under röttningsförsöken var särskilt gynnsamma. Ur gasproduktionssynpunkt verkar drav vara ett bra substrat för biogasproduktion, med en relativt snabb nedbrytning och en relativt hög gasproduktion.

Resultaten från försöket med blekeripressat visade att nedbrytningen och gasproduktionen fördröjs initialt. Orsaken till detta är troligen förekomsten av lignin, som i de flesta fall betraktas som inert ur biogassynpunkt, och toxiska ämnen, som fenoler, från blekeriprocessen. Denna slutsats stöds av tidigare undersökningar (del Pilar Castillo & Hansson, 2009). Ytterligare försök bör genomföras på blekeripressatet för att undersöka vad som påverkar mikroorganismerna negativt innan det används inom storskalig biogasproduktion.

5.3 FULLSKALEFÖRSÖK

Fullskaleförsöken studerades för att kunna jämföra beräkningsmodellen med värden från en fullskaleanläggning, men de gav också en bättre bild allmänt av hur biogasproduktionen kan ökas genom tillförsel av externa organiska material. Resultaten från försöket utvärderades dock inte djupgående utan rapporten begränsades till att studera mängd producerad gas utifrån tillsatt mängd substrat. Ur resultaten var det möjligt, att som förväntat, utläsa att gasproduktionen (total och metan) ökade när vassle respektive vasslepermeat tillfördes processen. I samband med att vassle infördes ökade gasproduktionen också mer än då vasslepermeat tillfördes. Den troliga förklaringen till detta resultat är att vasslen tillsattes i en

större mängd och att vassle innehåller mer protein än vasslepermeat, vilket ger mer gas. Detta bekräftades också av utrotningsförsöken. Då rötningen i fullskaleförsöken utfördes tillsammans med flera olika substrat (råslam och returprodukter från mejeriindustrin) blir en specifik jämförelse av vassle och vasslepermeat svår att utföra. Många faktorer skiljer sig mellan de olika försöken och då framförallt sammansättningen och flöde av råslam och mejeriretur, som påverkar vilken mängd biogas som produceras. Det var ändå tydligt att både satsvisa försök och fullskaleförsök gav upphov till mer gas med vasslen än med vasslepermeatet.

5.4 BERÄKNINGSMODELL

Syftet med beräkningsmodellen var att skapa en generell och användarvänlig modell för beräkning av biogasproduktion från planerade biogasanläggningar eller från tillsats av ytterligare substrat vid befintliga anläggningar. Med hjälp av ovanstående litteraturstudier, fullskaleförsök, satsvisa utrotningsförsök och tidigare utförda massbalansberäkningar togs en modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktion från planerade eller befintliga biogasanläggningar fram.

Innan modellen diskuteras ytterligare följer här några fördelar och begränsningar med beräkningsmodellen i punktform.

Fördelar:

- Modellen kan användas för flera olika fall (variation i utformning av process och typ av ingående substrat) utan att behöva konstrueras om, då den anpassar beräkningarna utifrån vilka indata som förs in med hjälp av logiska uttryck (om-satser).
- Presentationen av resultatet är tydlig och visar ingen överflödig information som t.ex. mellanliggande beräkningar.
- Schablonvärdestabellen med värden från litteraturstudien och utrotningsförsöken ger en möjlighet att utföra beräkningar av biogas- och rötrestproduktion innan några utförliga utvärderingar av olika substrat gjorts.
- Som följd av föregående punkt blir det även möjligt att uppskatta hur mycket substrat som behöver samlas in/tas emot för att uppnå en viss biogasproduktion och därmed lönsamhet för anläggningen.
- I modellen kan nedbrytningsgraden i rötkammaren styras för att i sin tur styra gasproduktionen. Nedbrytningsgraden varieras för att efterlikna effekter av olika förbehandlingsmetoder och ändringar i rötkammarens miljö som påverkar gasproduktionen.
- Modellens utformning tillsammans med schablonvärdestabellen gör att det snabbt går att beräkna ett approximativt resultat som kan presenteras för intressenter.

Begränsningar:

- De konstanter som används i modellen kommer till största del från satsvisa utrotningsförsök. Där är förhållandena för nedbrytningen optimala och i de flesta fall ger sådana undersökningar en högre gasproduktion än vad som sker i

fullskaleanläggningar. Resultat från utrotningsförsök kan också variera mellan olika försök beroende på sammansättningen av just det provet som rötas.

- Modellen begränsas också av att den inte beräknar de effekter som samrötningen av olika substrat kan ha, utan modellen adderar bidraget från de olika substraten utan ta hänsyn till deras påverkan sinsemellan. Vid samrötning av flera substrat kan deras individuella påverkan på miljön i rötningstanken leda till ett förhöjt gasutbyte som till och med är högre än det teoretiskt beräknade, se avsnitt 2.4.6.

Värden beräknade med hjälp av modellen är som nämnts tidigare medelvärden av det förväntade resultatet (biogasproduktion, rötrestmängd m.m.). Beroende på kvaliteten på indata varierar kvaliteten på utdata och generellt ska det sägas att utdata från modellen endast är en fingervisning om hur stor t.ex. gasproduktionen kan bli. Bäst resultat ger modellen om indata för aktuella substrat tas fram genom laboratorieförsök på just det substratet.

Biogasproduktionen är som beskrivits ovan en komplex process som påverkas av många olika faktorer. Detta inte minst beroende på att nedbrytningsprocessen, som producerar biogasen, utförs av levande organismer som måste trivas för att gasproduktionen skall kunna fortgå.

Alla de faktorer som pH, temperatur, substratsammansättning, processbetingelser, samrötningseffekter m.m. som beskrivits tidigare och som påverkar biogasproduktionen är svåra att ta hänsyn till i en modell och resulterar i att många förenklingar måste göras. I modellen tas några av dessa parametrar med i beräkningen genom att nedbrytningsgraden kan varieras. Hur mycket nedbrytningsgraden skall ändras beror på hur stor påverkan olika förbehandlingsmetoder bedöms ha på nedbrytningsprocessen. Sådana bedömningar blir inte exakta bland annat för att effekterna av olika förbehandlingsmetoder kan variera från fall till fall. Det är därför viktigt att notera osäkerheten i bedömningen av nedbrytningsgraden.

För att jämföra beräkningsmodellen med resultat från en biogasprocess i full skala användes resultaten från fullskaleförsöken. Medelvärden på producerad mängd biogas totalt och metangas totalt från fullskaleförsökets 20 sista dagar jämfördes med medelvärden beräknade med hjälp av modellen. Att endast värden från de 20 sista dagarna av fullskaleförsöken användes beror på att resultatet skall ge en så rättvis bild av vilken gasproduktion som substratet ger upphov till som möjligt. Initialt i fullskaleförsöken har nedbrytningen inte riktigt kommit igång. Mikroorganismerna kan vara ovana vid det nya substratet och behöver därför lite tid att vänja sig och komma igång med nedbrytningen och gasproduktionen. Jämförelsen av resultaten visade att de beräknade värdena ligger inom standardavvikelsen för värdena från fullskaleförsöken. Det ska dock sägas att inte allt för stora slutsatser om beräkningsmodellens riktighet kan dras av denna jämförelse. En av orsakerna är att det i beräkningen användes uppmätta värden på råslammets parametrar från fullskaleförsöken istället för från schablonvärdestabellen. Detta gjordes på grund av avsaknad av uppmätta värden av flödet på de komponenter som ingår i råslammet. Resultatet blir då att de beräknade värdena inte är helt teoretiska. I verkliga fall kommer dock modellen med stor sannolikhet att användas med en blandning av både uppmätta indata från det aktuella fallet och litteraturvärden. En annan orsak till osäkerheten i jämförelsen mellan värden beräknade från modellen och värden från fullskaleförsök är de faktorer som påverkar modellen i allmänhet och som beskrivs ovan. Jämförelsen visar trots allt att beräkningar från modellen ligger i

någorlunda paritet med värden från fullskaleanläggningar och dessutom ger modellen lägre värden än fullskaleförsöken. Det innebär att modellen inte verkar överskatta resultatet. Eftersom modellen endast jämförts med två verkliga fall och endast gasproduktionen jämfördes kan inte allt för stora slutsatser dras av beräkningsmodellens riktighet. Ingen jämförelse gjordes t.ex. av näringsinnehållet i rötresten.

Trots alla förenklingar och osäkerheter uppfyller modellen syftet med att snabbt och enkelt kunna ta fram riktvärden för både biogas och rötrestproduktion. Dessa riktvärden visar ungefär hur mycket substrat som behöver samlas in/tas emot för att biogasproduktionen skall ligga på en nivå som gör anläggningen ekonomiskt hållbar.

5.5 SAMMANFATTANDE DISKUSSION

Ett ökande intresse för biogas gör att både behovet av nya produktionsanläggningar och av att utöka och effektivisera befintliga anläggningar ökar. Större efterfrågan har gjort att flera nya substrat blivit aktuella för rötning och anläggningar som tidigare endast rötade avloppsrenings slam utökar till att röta flera substrat samtidigt. Att fler anläggningar använder sig av samrötning beror troligen på att marknaden för biogas ökar och samrötning är ett sätt att öka befintlig gasproduktion och därigenom öka lönsamheten. Är de ingående substraten av tillräckligt god kvalitet (REVAQ och SPCR 120, avsnitt 2.5.7) leder det också till att rötresten kan användas som gödsel på odlingsmarker och mer näring kan föras tillbaka till jorden. Att sälja rötresten som biogödsel är också det ett sätt för biogasanläggningarna att ytterligare öka lönsamheten. En negativ aspekt med samrötning av just avloppsrenings slam med andra substrat är att slammet i vissa fall kan innehålla sådana mängder föroreningar att rötresten ej får användas som gödsel. Då är ett bättre alternativ att röta de ”rena” substraten för sig och på så sätt kunnat använda rötresten till gödning. Den ökade efterfrågan av nya biogasanläggningar och substrat samt utökning till samrötning har lett till ett större behov av planering för sådana projekt. Här kommer arbetet med beräkningsmodellen in i bilden.

Genom litteraturstudier av biogasprocessen och substrat tillsammans med olika rötningförsök har detta arbete lett fram till skapandet av en modell för beräkning av biogas- och rötrestproduktion från befintliga och planerade biogasanläggningar. Med hjälp av modellen och bakomliggande fakta från litteraturstudien, utrötningförsöken och fullskaleförsöken kan värden på producerad mängd biogas och rötrest snabbt tas fram för att utgöra en del i ett beslutsunderlag för planerade biogasanläggningar samt även vid utökning av befintliga anläggningar. De värden som beräknas med hjälp av modellen ger p.g.a. faktorer som diskuterats ovan ingen absolut sanning utan beräkningarna är tänkta som riktlinjer för en ungefärlig gasproduktion från olika substrat.

Biogasproduktion är, som diskuterats ovan, en process som påverkas av en mängd faktorer. För att kunna beräkna biogasproduktionen mer exakt genom att ta hänsyn till alla faktorer som påverkar krävs mer avancerade beräkningsmodeller som kan hantera ett större antal inparametrar och variabler. Dessa modeller kräver också förmodligen ett mer kraftfullt programmeringsspråk än Microsoft Excel. En bättre tillgång till information om ingående substrat framtagna från försök i full skala eller från kontinuerliga rötningförsök krävs också för att förbättra beräkningarnas säkerhet.

6 SLUTSATSER

De slutsatser som kunde dras av detta arbete var följande:

- Utifrån tidigare utförda massbalansberäkningar, litteraturstudier, utrotningsförsök och fullskaleförsök togs en beräkningsmodell fram för beräkning av biogas- och rötrestproduktion från befintliga och planerade biogasanläggningar.
- För att komplettera beräkningsmodellen togs en schablonvärdestabell med fakta om olika substrat fram. Tabellen togs fram genom litteraturstudier och utrotningsförsök.
- Genom jämförelse av beräkningsmodellen med försök i full skala konstaterades att modellen beräknar värden som ligger i paritet med värden från en fullskaleanläggning. Fler jämförelser behövs dock för att kunna dra några riktigt säkra slutsatser.
- I både beräkningsmodellen och värdena i schablonvärdestabellen finns en viss osäkerhet. På grund av osäkerheten kan värden beräknade med hjälp av beräkningsmodellen ej ses som en absolut sanning utan mer som riktvärden.

LITTERATURFÖRTECKNING

Agrigas. (2002). Utveckling av teknik för att utnyttja biogaspotentialen i restprodukter med höga torrhalter - Lägesrapport. Agrigas, Lund.

APHA – Americal Public Health Association, AWWA – American Water Works Association, WEF – Water Environment Federation., (1995). *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, 2540 B – Total Solids Dried at 103-105°C, 2540 E – Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C*. Maryland, USA: United Book Press Inc.

Berglund, M., & Börjesson, P. (2003). *Energianalys av biogassystem*. Institutionen för teknik och samhälle, Lunds universitet, Lund.

Borja, R., Martin, A., Banks, C., Alonso, V., & Chica, A. (1995). A Kinetic studie of anaerobic digestion of olive mill wastewater at mesophilic and thermophilic temperatures. *Environmental Pollution* 88 , 13-18.

Carlsson, M., & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Svenskt gastekniskt centrum. Rapport SGC 200, Malmö.

Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99 , 4044–4064.

del Pilar Castillo, M., & Hansson, M. (2009). *Satsvis rötning av termiskt behandlat slam - Uppdragsrapport MittSverige Vatten*. JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.

Edström, M., & Nordberg, Å. (2004). *Producera biogas på gården-gödsel, avfall och energigrödor blir värme och el*. *JTI-rapport 107*. JTI- Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.

Energimyndigheten. (2008a). *Energiläget i siffror 2008*. Statens energimyndighet, Eskilstuna.

Energimyndigheten. (2008b). *Produktion och användning av biogas år 2006*. ER 2008:02. Statens energimyndighet, Svenska Gasföreningen och Svenska Biogasföreningen, Eskilstuna.

Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Hansen, L., Schmidt, J., Angelidaki, I., Marca, E., la Cour Hansen, J., Mosbaeck, H., o.a. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management, Vol 24* , 393-400.

Hansson, A., & Christensson, K. (2005). *Biogas ger energi till ekologiskt lantbruk*. JO05:22. Jordbruksverket, Jönköping.

Hyeong-Seok, J., Chang-Won, S., Jae-Lim, L., Sang-Hyung, L. & Hang-Sik, S. (2004). Analysis and application of ADM1 for anaerobic methane production. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 27, p. 81-89.

- IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. (2002). Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1). IWA Publishing. Finns att hämta från <http://www.iwapublishing.com/template.cfm?name=isbn1900222787>
- Jarvis, Å., & Schnürer, A. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar. Rapport SGC207*. Avfall Sverige, Malmö.
- Jordbruksdepartementet. (2008). Hämtat från <http://regeringen.se>: <http://regeringen.se/sb/d/11110/a/115795> den 13 11 2009
- Layman. (2000). *Anaerob behandling av mejerispillvatten vid Umeå Mejeri LIFE 00 ENV/S/000854*. Norrmejerier, Umeå.
- Linné, M., Ekstrand, A., Engelsson, R., Persson, E., Björnsson, L., & Lanz, M. (2008). *Den svenska biogaspotentialen från inhemska restprodukter*. Avfall Sverige, Svenska Biogasföreningen, Svenska Gasföreningen, Svenskt Vatten, Lund.
- Liu, Y., & Whitman, W. B. (2008). Metabolic, Phylogenetic and Ecological Diversity of the Methanogenic Archaea. *Annals of the New York Academi of Sciences 1125* , 171-189.
- Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M., & Mattiasson, B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy 31* , 2385-2392.
- Nettmann, E., Bergmann, I., Mundt, K., Linke, B., & Klocke, M. (2008). Archaea diversity within a commercial biogas plant utilizing herbal biomass determined by 16S rDNA and mcrA analysis. *Journal of Applied Microbiology 105* , 1835-1850.
- Nordberg, U. (2006). *Biogas - Nuläge och framtida potential*. Värmeforsk. Service AB projektnummer T5-503, Stockholm.
- Nordberg, U., & Nordberg, Å. (2007). *Torrötning - kunskapssammanställning och bedömning av utvecklingsbehov*. JTI-rapport Lantbruk och Industri, nr. 357.
- Näringsdepartementet. (2009). Hämtat från <http://regeringen.se>: <http://regeringen.se/sb/d/12137/a/132806> den 13 11 2009
- Pariwara, W., Read, J., Mattiasson, B., & Björnsson, L. (2008). Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage. *Biomass and Bioenergy 32* , 44-50.
- Planck, C. (2009). *hippocampus hästar*. Hämtat från <http://hippocampus.slu.se>: http://hippocampus.slu.se/hastens_foder/vaxande_hast/kraftfoder.cfm?Call=foder#24 den 6 11 2009
- Sousa, D. P. (2008). Molecular assessment of complex microbial communities degrading long chain fatty acids in methanogenic bioreactors. *FEMS Microbiology Ecology. 60:* , 252-265.

- Starberg, K., & Ullman, R. (2009). *Rötning av vassle vid Tivoliverket - Förstudie med principförslag*. WSP Sverige AB, Stockholm.
- Svenska Gasföreningen. (2008). *Biogas ur gödsel, avfall och restprodukter - goda svenska exempel*. Svenska Gasföreningen, Stockholm.
- Ullman, R., & Juhlin, A. (2009). *Förstudie - Rötning av vasslepermeat vid Fillanverket*. WSP Sverige AB, Stockholm.
- Vafab Miljö. (2009). *Biogas: Informationsmaterial: Biogasanläggningen*. Hämtat från Vafab Miljö: http://www.vafabmiljo.se/informationsmaterial_s27.html den 17 12 2009
- Verrier, D., Roy, F., & Albagnac, G. (1987). Two-phase Methanization of Solid Vegetable Wastes. *Biological Wastes* 22 , 163-177.
- Xiaoling, L., He, L., Yiyang, C., Guochen, D., & Jian, C. (2008). Effects of organic matter-nitrogen ratio on the bioconversion of volatile fatty acids from sewage sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 83 , 1049–1055.
- Zhang, Y. Z. (2003). Uptake and mass balance of trace metals for methane producing bacteria. *Biomass and Bioenergy* 25 , 427-433.

MUNTLIGA KÄLLOR

Nordberg, Åke. (2009). Forskare JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala. Personlig kontakt

Nyström, Folke. (2009). Utvecklingschef avlopp MittSverige Vatten, Sundsvall. Personlig kontakt.

Schnürer, Anna. (2009). Docent institutionen för mikrobiologi, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala. Personlig kontakt.

Starberg, Katarina. (2009). WSP Sverige AB. Personlig kontakt.

Turesson, Malin. (2009). Processingenjör MittSverige Vatten, Sundsvall. Personlig kontakt.

Ullman, Regine. (2009). WSP Sverige AB. Personlig kontakt.

KÄLLOR TILL SCHABLONVÄRDESTABELLEN

Här motsvarar numreringen av referenserna de siffror som finns i schablonvärdestabelLEN.

1. Basdata om biogas. (2006). Informationsbroschyr sammanställd av SGC. (www.sgc.se)
2. Linné, M., Jönsson, O. (2004). Sammanställning och analys av potentialen för produktion av förnyelsebar metan (biogas och SNG) i Sverige. SGC och BioMil.
3. Berglund, M och Börjesson, P. (2003). Energianalys av biogassystem. Rapport nr 44. Institutionen för teknik och samhälle, Lunds Universitet, Lund.
4. Nordberg, U. (2006), Biogas- nuläge och framtida potential, Värmeforsk, projektnummer T5-503.
5. Steffen, R., Szolar, O., och Braun, R. (1998). Feedstocks for anaerobic digestion. Hämtat från www.adnett.org: http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf den 11 1 2010.
6. Hammar, M. (2002). Organiskt avfall för biogasproduktion i Götene, Lidköping, Skara och Vara kommuner. SLU Institutionen för lantbruksteknik, Uppsala.
7. Nordberg U. och Nordberg, Å. (2007) Torrötning – kunskapssammanställning och bedömning av utvecklingsbehov. JTI-rapport Lantbruk & Industri nr 357, Uppsala.
9. Litorell, O. och Persson, L.A. (2007). Produktion av biogas från fjäderfä gödsel. Rapport. Fjäderfä centrum.
10. Biogasutbyte från olika råvaror. Hämtat från www.bioenergiportalen.se: www.bioenergiportalen.se/ravaror/gasutbyte.
11. Edström, M. och Nordberg, Å. (2004) Producera biogas på gården – gödsel, avfall och energigrödor blir värme och el. JTI-rapport nr 107, Uppsala.
- 12 Murto, M., Björnsson, L. och Mattiasson, B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*. 70: 101-107.
13. Wiberg, H. (2007). Termofil rötning av drankvatten. Examensarbete utfört vid Tekniska Verken i Linköping AB.
14. Cuetos, M.J., Gómez, X., Oterbo, M. och Mórán, A. (2008). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*. 40 99-106.
16. Parawira, W., Read, J.S., Mattiasson, B. och Björnsson, L (2008). Energy production from agricultural residues: high methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*. 32: 44-50.

17. Nordberg, Å., Edström, M. Petterson, C-M. och Thyselius, L. (1997). Samrötning av vallgrödor och hushållavfall. JTI rapport nr 13, Uppsala.
18. Carlsson, M., Uldal, M. (2008). Substrathandbok för biogasproduktion. SGC rapport 200. Svenskt Gastekniskt Center, Malmö.
19. Uldal, M., Olsson, L.E. (2009). Undersökning av metanpotential vid utrötning av primärslam, överskottsslam och fettslam från Henriksdals reningsverk, Stockholm. AnoxKaldness AB, Lund.
20. Davidsson, Å., Gruvberger, C., Christensen, T.H., Hansen, T. L och Jansen J.L. (2006). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. Waste Management. 27 406-414.
21. Edström, M, Jansson, L.E., Lantz, M., Johansson, L.G., Nordberg, U., Nordberg, Å. (2008). Gårdsbaserad biogasproduktion - System, ekonomi och klimatpåverkan. JTI-rapport 42, Uppsala.
22. Richert Stintzing, A., Åkerhielm, H. (2001). Fjäderfärgödsel - En kunskapssammansättning. JTI-rapport 283, Uppsala.
23. Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresource Technology volume 98, issue 4, p: 929-935
24. Hansson, M. (2008). Satsvis rötning av röt-, primär- och bioslam med och utan mekanisk förbehandling. Utfört åt Käppalaförbundet. Uppdragsrapport JTI, Uppsala.
25. Produktfaktablad Arla Foods AB Göteborg. (2009). Permeatvassle 16 %. Hämtat från <http://www.arlafoods.se>:
<http://www.arlafoods.se/upload/arla%20se/foderprodukter/g%C3%B6tene%20permeatvassle%2016%20procent.pdf> den 7/11 2009.
26. Produktfaktablad Arla Foods AB Göteborg. (2009). Koncentrerad ostvassle. Hämtat från <http://www.arlafoods.se>:
<http://www.arlafoods.se/upload/arla%20se/foderprodukter/kalmar%20koncentrerad%20ostvassle.pdf> den 7 11 2009.
27. Duncan, M., Horan, N.J. (2003). Handbook of water and wastewater microbiology. Academic press. Elsevier Ltd.
28. Malgeryd, J. (2006). Hästgödsel - En naturlig resurs. Jordbruksinformation 7. Jordbruksverket, Jönköping.
29. Mellbin, M. (2010). Utveckling av en beräkningsmodell för biogasproduktion samt en studie av olika biogassubstrat. Examensarbete, Uppsala universitet. Uppsala

BILAGA 1 - ORDFÖRKLARINGAR

Acetat = CH_3COO^- , anjonen av ättiksyra (CH_3COOH).

Anaerob = syrefri.

Arkaea = en grupp av mikroorganismer med speciella egenskaper som skiljer sig från bakterier och svampar. Utför bl.a. metanbildningen i biogasprocessen.

Belastning (av röt-kammaren) = Hur mycket organiskt material som tillförs röt-kammaren per tidsenhet och volym.

Biogas = den gas som bildas vid nedbrytningen av organiskt material under syrefria förhållanden. Består till största del av metan och koldioxid.

Fullskaleförsök = Försök med rötning av ett eller flera olika substrat i en biogasanläggning i fullstor skala.

HRT = Hydraulic Retention Time eller hydraulisk uppehållstid är ett mått på hur länge vätskan eller slammet befinner sig i röt-kammaren.

LCFA = Long Chain Fatty Acids, långkedjiga fettsyror, vilka bildas under hydrolys av fetter.

Metanogen = mikroorganism som utför metanbildningen.

Nm^3 = normalkubikmeter. Volym vid 0°C och atmosfärstryck (1,01325 bar).

Patogen = sjukdomsalstrande organism.

pH = ett mått på hur sur eller basisk en vätska är.

Rötrest = den restprodukt som uppstår vid rötning. Innehåller vatten, ej nedbrutet organiskt material, näringsämnen och döda mikroorganismer.

Rpm = varv per minut.

Rötning = nedbrytning av organiskt material i en syrefri miljö.

SRT = solids retention time eller partikulär uppehållstid ett mått på hur länge det fasta materialet, mikroorganismerna, befinner sig i röt-kammaren.

Substrat = organiskt material som används vid rötning.

TS = torrs substans. Det som återstår av ett material efter att allt vatten torkats bort. Brukar ofta anges som procent av våtvikt.

Utrötningsförsök = Satsvisa rötningförsök i mindre skala (ofta ca en liters volym) med ett eller flera olika substrat.

VFA = Volatile Fatty Acids eller lättflyktiga fettsyror.

VS = organiskt material. Anges ofta som procent av TS.

Ymp = organiskt material och mikroorganismer från en rötchammare.

BILAGA 2 - TABELLER

Tabell 15. Beräknade och invägda mängder substrat, ymp och vatten till det satsvisa utrottningsförsöken

Substrat	Beräknad mängd [g]			Tom flaska	Invägd mängd [g]		
	Substrat	Ymp	Vatten		Substrat	Ymp	Vatten
Vassle 1	12,8	194,4	492,7	532,5	12,8	193,5	491,6
Vassle 2	12,8	194,4	492,7	529,7	12,9	193,8	493,0
Vassle 3	12,8	194,4	492,7	532,5	12,9	193,7	494,0
Vasslepermeat 1	14,0	194,4	491,6	531,6	14,2	209,2	497,4
Vasslepermeat 2	14,0	194,4	491,6	528,0	14,0	193,9	490,9
Vasslepermeat 3	14,0	194,4	491,6	532,4	14,0	194,1	491,6
Drav 1	7,1	194,4	498,5	527,6	7,0	194,7	497,6
Drav 2	7,1	194,4	498,5	532,2	7,0	197,7	499,3
Drav 3	7,1	194,4	498,5	527,2	7,1	193,7	498,0
Blekeripressat 1	477,3	194,4	28,3	529,9	476,9	193,5	28,8
Blekeripressat 2	477,3	194,4	28,3	527,1	477,0	194,1	28,5
Blekeripressat 3	477,3	194,4	28,3	528,5	476,8	195,9	27,9
Ymp 1	-	194,4	505,6	529,9*	-	194,1	505,9
Ymp 2	-	194,4	505,6	529,9*	-	193,9	504,6
Ymp 3	-	194,4	505,6	529,9*	-	195,0	504,9

*Vikten är ett medelvärde av övriga invägda flaskor då dessa aldrig vägdes

Tabell 16. Tabell med värden från införsel av vasslepermeat till röt-kammaren i fullskaleförsök A vid Fyllanverket (Nyström 2009, Tuveesson 2009)

Datum	Ink. Råslam [m3/d]	Tillförd permeat [m3/d]	Tillförd org.tank. [m3/d]	Total tillf. volym [m3/d]	UHT [d]	Gasprod. [Nm3/d]	Metanhalt [%]
06-01-2009	63			63	32	773	57
06-02-2009	63			63	32	1054	60
06-03-2009	63			63	32	1194	56
06-04-2009	63			63	32	1383	59
06-05-2009	63			63	32	1055	59
06-06-2009	63			63	32	1024	60
06-07-2009	63			63	32	703	61
06-08-2009	63			63	32	917	62
06-09-2009	63			63	32	1295	62
06-10-2009	63			63	32	1319	62
06-11-2009	63			63	32	1144	61
06-12-2009	63			63	32	1188	60

Datum	Ink. Råslam [m3/d]	Tillförd permeat [m3/d]	Tillförd org.tank. [m3/d]	Total tillf. volym [m3/d]	UHT [d]	Gasprod. [Nm3/d]	Metanhalt [%]
06-14-2009	57			57	35	935	60
06-16-2009	57			57	35	1464	59
06-17-2009	81	0,5		82	25	1389	60
06-18-2009	81	0,5		82	25	1370	59
06-19-2009	81	0,5	2,7	84	24	1309	60
06-20-2009	81	0,5	2,7	84	24	1376	61
06-21-2009	66	0,5	2,7	69	29	853	62
06-22-2009	81	0,5	3	85	24	1096	63
06-23-2009	75	0,5	3	79	25	1324	62
06-24-2009	72	0,5	5	78	26	1670	71
06-25-2009	72	1	4	77	26	1554	62
06-26-2009	72	1	5	78	26	1675	61
06-27-2009	72	1	2,7	76	26	1462	59
06-28-2009	76	1	2,7	79	25	1192	59
06-29-2009	76	1	2,7	79	25	1004	59
06-30-2009	76	1	4	81	25	1051	59
07-01-2009	75	1	4,5	80	25	1352	59
07-02-2009	74	1	4,5	80	25	1381	59
07-03-2009	74	2	4	80	25	1483	58
07-04-2009	74	1,3	2,7	78	26	1367	58
07-05-2009	89	1,3	2,7	93	21	1262	58
07-06-2009	4	1,3	2,7	8	254	1333	57
07-07-2009	82	2	2	86	23	1269	56
07-08-2009	81	2	2	85	23	1231	56
07-09-2009	74	2	3	79	25	1359	55
07-10-2009	74	2	2	78	26	1402	53
07-11-2009	74	2	2,7	78	26	1324	55
07-12-2009	71	2	2,7	76	26	1454	55
07-13-2009	71	2	2,7	76	26	1578	55
07-14-2009	80	2	2	84	24	1487	54
07-15-2009	81	2	2	85	24	1289	54
07-16-2009	81	3	1	85	24	1195	49
07-17-2009	81	3	2	86	23	1343	52
07-18-2009	81	3	2	86	23	1366	53
07-19-2009	84	3	2	89	22	1380	52
07-20-2009	82	3	2	87	23	1420	51
07-21-2009	76	3	2	81	25	1374	51

Datum	Ink. Råslam [m3/d]	Tillförd permeat [m3/d]	Tillförd org.tank. [m3/d]	Total tillf. volym [m3/d]	UHT [d]	Gasprod. [Nm3/d]	Metanhalt [%]
07-23-2009	73	4	2	79	25	1438	51
07-24-2009	73	4	2	79	25	1437	51
07-25-2009	73	3,8	2,3	79	25	1602	51
07-27-2009	74	3,8	2,3	80	25	1691	52
07-28-2009	74	3,8	3	81	25	1494	52
07-29-2009	76	4	3	83	24	1422	53
07-30-2009	76	5	3	84	24	1470	52
07-31-2009	76	4	2	82	24	1422	51
08-01-2009	76	6	4	86	23	1642	52
08-02-2009	77	4	2,5	84	24	1613	52
08-03-2009	77	4	2,5	84	24	1644	53
08-04-2009	77	4	3	84	24	1708	53
08-05-2009	76	4	2	82	24	1576	53
08-06-2009	76	5	3	84	24	1450	53
08-07-2009	76	0	2	78	26	1244	54
08-08-2009	76	0	2	78	26	1197	55
08-09-2009	73	0	2	75	27	1313	56
08-10-2009	73	0	2	75	27	1251	55
08-11-2009	73	0	2	75	27	1557	55
08-12-2009	73	0	2	75	27	1526	53
08-13-2009	73	0	2	75	27	1405	53
08-14-2009	73	0	2	75	27	1066	53
08-15-2009		0				1158	53
08-16-2009		0				1036	51
08-17-2009		0				1107	52
08-18-2009		0				1163	52
08-19-2009		0				1360	53
08-20-2009		0				1365	54
08-21-2009		0				1142	54
08-22-2009		0				1257	53
08-23-2009		0				1379	54
08-24-2009		0				987	55
08-25-2009		0				1062	53
08-26-2009		0				1204	52

Tabell 17. Tabell med värden från införsel av vassle till rötkammaren i fullskaleförsök B vid Fillanverket (Nyström 2009, Tuveesson 2009)

Datum	Org. mjölk [m ³ /d]	Inpumpad vassle [m ³ /d]	VS råslam [% av TS]	TS röt. [%]	Biogas [m ³ /d]	Metanhalt [%]	Metan [Nm ³ /d]
2009-09-01	5,3	0,0	70,3		1 083,3		
2009-09-02	4,6	0,0	70,3		1 343,5		
2009-09-03	3,3	0,0	70,3		1 208,0		
2009-09-04	4,1	0,0	70,3		1 093,8		
2009-09-05	2,9	0,0	70,3		1 131,0		
2009-09-06	2,9	0,0	70,3		1 296,5		
2009-09-07	2,9	0,0	75,0	1,8	1 393,9		
2009-09-08	2,9	0,0	75,0		983,9		
2009-09-09	4,1	0,0	75,0		1 020,2		
2009-09-10	3,8	0,0	75,0		1 100,5		
2009-09-11	4,1	0,0	75,0		1 196,7		
2009-09-12	4,1	0,0	75,0		1 035,2		
2009-09-13	4,1	0,0	75,0		868,0		
2009-09-14	4,1	0,0	75,0	1,7	859,5		
2009-09-15	2,1	2,0	75,0	1,7	1 208,1		
2009-09-16	4,0	2,0	75,0	1,7	1 146,1		
2009-09-17	3,9	2,0	75,0	1,7	1 223,6		
2009-09-18	0,9	2,0	75,0	1,6	1 242,1		
2009-09-19	2,4	2,0	75,0		1 273,6		
2009-09-20	2,4	2,0	75,0		1 439,3		
2009-09-21	2,4	2,0	76,8	1,6	1 082,7		
2009-09-22	3,1	2,0	76,8		1 397,1	51,4	717,6
2009-09-23	3,5	3,0	75,0	1,7	1 449,7	58,7	851,4
2009-09-24	3,4	3,0	75,0		1 259,5	59,4	747,8
2009-09-25	2,5	3,0	74,6	1,6	1 417,9	60,5	858,0
2009-09-26	2,8	3,0	74,6		1 472,1	61,7	908,1
2009-09-27	2,8	3,0	74,6		1 358,4	61,1	829,5
2009-09-28	2,8	3,0	75,0	1,7	1 313,3	59,9	787,2
2009-09-29	1,7	4,0	75,0		1 452,7	60,3	875,7
2009-09-30	3,1	4,0	75,0		1 438,4	60,7	873,3
2009-10-01	3,1	4,0	75,0		1 397,2	58,4	816,1
2009-10-02	2,9	3,0	76,5	1,7	1 407,1	59,0	830,5
2009-10-03	3,0	4,3	76,5		1 478,0	58,9	870,7
2009-10-04	3,0	4,3	76,5		1 409,1	56,1	790,8
2009-10-05	3,0	4,3	66,9	1,7	1 596,5	56,2	897,2
2009-10-06	0,3	5,0	66,9		1 397,7	58,8	822,3

Datum	Org. mjölk [m³/d]	Inpumpad vassle [m³/d]	VS råslam [% av TS]	TS röt. [%]	Biogas [m³/d]	Metanhalt [%]	Metan [Nm³/d]
2009-10-07	2,6	3,0	66,9		1 460,9	57,7	843,1
2009-10-08	3,1	5,0	74,7	1,7	1 492,1	56,1	836,5
2009-10-09	4,3	5,0	74,7		1 595,8	57,5	916,9
2009-10-10	3,0	4,3	74,7		1 499,0	59,4	891,2
2009-10-11	3,0	4,3	74,7		1 382,0	59,7	824,4
2009-10-12	3,0	4,3	76,2	1,7	1 117,3	51,0	570,1
2009-10-13	2,7	6,0	76,2		1 700,1	60,7	1032,7
2009-10-14	3,1	5,0	76,2		1 604,0	62,6	1003,4
2009-10-15	3,6	6,0	78,0	1,6	1 684,4	62,2	1047,7
2009-10-16	3,7	5,5	78,0		1 703,4	61,4	1045,6
2009-10-17	3,7	5,5	78,0		1 548,7	60,7	939,9
2009-10-18	3,7	5,5	78,0		1 567,0	61,6	965,6
2009-10-19	3,7	5,5	82,0	1,7	1 629,5	60,2	981,0
2009-10-20	3,6	6,0	82,0		1 761,0	60,8	1071,1
2009-10-21	3,8	6,0	80,2		1 766,7	61,9	1092,9
2009-10-22	3,7	7,0	79,5		1 763,8	62,5	1103,1
2009-10-23	3,7	6,0	78,8		1 837,9	62,4	1147,7
2009-10-24	3,5	6,0	78,1		1 740,4	62,0	1079,1
2009-10-25	3,5	6,0	77,4		1 824,4	62,2	1134,4
2009-10-26	3,5	6,0	76,7		2 137,6	62,9	1344,1
2009-10-27	3,7	8,0	76,9		2 195,6	62,2	1365,2
2009-10-28	3,7	8,0	77,0		2 138,0	60,6	1295,4
2009-10-29	3,7	9,0	77,2		2 187,2	60,7	1328,6
2009-10-30	3,7	8,0	77,4		1 988,6	61,3	1219,1
2009-10-31	3,6	8,0	77,6		2 177,3	61,5	1338,0
2009-11-01	3,6	0,0	77,7		1 445,7	63,9	923,1
2009-11-02	3,6	0,0	77,9		1 525,3	66,4	1012,9
2009-11-03	3,6	11,0	78,1		2 240,4	62,6	1401,6
2009-11-04	3,8	11,0	78,7		2 128,5	59,3	1261,4
2009-11-05	4,1	11,0	79,3		2 232,5	58,7	1310,4
2009-11-06	3,5	10,0			2 311,6	58,3	1348,1
2009-11-07	3,2	12,0			2 435,3	58,5	1425,5
2009-11-08	3,2	12,0			2 838,4	59,8	1697,4
2009-11-09	3,2	4,0			2 617,5	62,6	1637,9
2009-11-10	3,7	10,0			2 520,7	63,3	1595,6
2009-11-11	3,7	3,0			1 933,4	62,0	1197,9
2009-11-12	0,0	0,0			1 512,0	65,9	996,6
2009-11-13	0,0	0,0			1 584,8	67,6	1072,0

Tabell 18. Schablonvärdestabell med värden från litteraturstudien och utröttningsförsöken

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Metan halt [%]	Nedbrytningsgrad [% av VS]	Nm3 gas [CH4/ton VS]	Nm3 gas [biogas/ton VS]	N_{tot} [% av TS]	P_{tot} [% av TS]	K_{tot} [% av TS]	Referens
Blekeri-pressat	0,8	57	45		348	652				29
Boss och agnar	87	90			250					7
Bröd	61	87	61		350	574				18
Citrusskal	21	95	58		300	517				18
Deg	67	90	61		290	475				18
Djupströ, får	30	80			250					5
Djupströ, nöt	30	80			250					6
Djurfett	90	92				1000				5
Drank	8	93	45		323	606	4			2,6,13,18
Drav	31	96	47		416	772				29
Ensilage (helsädes)	40	90			300		4			7,15
Fettavskiljar slam	4	95			682					3,6
Fettslam	6	96	70		950					19
Fiskrens	42	98	71		930	1310				18
Fjädrar	45	98	74		180	243				18
Frityrfett	90	100			757					6,10
Frukt- och grönsaksavfall	15	95		91	666					7,18,11
Glycerol	100	100	65		380	579				18
Gödsel, nötfast	8	86	57		185		3	1	3	21
Gödsel, nötflyt	9	80	65	35	213	327	4	1	4	1,3,5,6,10,11,21,25
Gödsel, svinflyt	8	80	65	46	268	414	6	2	4	1,3,5,10,11,12,21
Halm	78	91	70		207	400				3,6,5,7
Hundmat (torrfoder)	91	91	64		615	970				18
Hästgödsel	30	80			170					6,7
Höns gödsel	42	76			247		2	1	1	2,5,7,9,12,22
Jordärtskocka	22									10

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Metan halt [%]	Nedbrytningsgrad [% av VS]	Nm3 gas [CH4/ton VS]	Nm3 gas [biogas/ton VS]	N_{tot} [% av TS]	P_{tot} [% av TS]	K_{tot} [% av TS]	Referens
Kaffesump	28	92	63		300	476				18
Kletgödsel, svin	16	84			300		2			6
Källsorterat matavfall, grossist/handel	15		59				3	1	1	1,4,23
Källsorterat matavfall, hushåll	33	85	63		461	735	2,2 – 3,1	0,3-0,6	0,8-1,3	1,2,3,4,10,14,17,20
Källsorterat matavfall, hushåll, kvarnat & spätt	10	80	65		470	723				18
Källsorterat matavfall hushåll, pressat & spätt	13	92	67		600	896				18
Källsorterat matavfall, restauranger	27	87	63		506	807	3	1	1	1,4,6,23
Källsorterat matavfall, storkök	13	92	59		720	1220	3	1	1	18,23
Majs	30	90	56		351	633	1	0	1	1,4,7,10,21
Melass	85	88	70		422	606	2	0		8,18
Minkgödsel	68	71	66		220	333				18
Park-trädgårdsavfall	60	60			250					7
Potatis	25	95	53		411	782	2			4,6,10,16
Potatisblast	15	80	56		317	571				4,7
Potatisgröt	15	93	60		300	500				18
Potatismjöl	86	100	55		350	636				18
Primärslam	5	65	60		435		3	2	0	19,24,27
Returprodukt (mejeri)	20	95	67		520	776				18
Slakteriavfall, mag/tarm-innehåll	16	83	63		434	690				1,4,5,6

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Metan halt [%]	Nedbrytn ingsgrad [% av VS]	Nm3 gas [CH4/ ton VS]	Nm3 gas [bioga s/ton VS]	N_{tot} [% av TS]	P_{tot} [% av TS]	K_{tot} [% av TS]	Referens
Slakteriavf. mjukdelar	30		68							1,4,14
Slakteriavf. slam från slakteriets reningsverk	16		63							1,4,12
Slakteriavf. spillblod	10	95	63		547	877				4,5
Sockerbeta	25	94	53	93	413	787	1			1,4,7,10,11
Sockerbeta, blast	17	79			337		3			1,3,6,7,16
Spannmål	86	97			400		2	0		1
Urin, svin	1	55			200					6
Vassle	17	91	49		455	910		1	2	26,29
Vassle- permeat	16	92	46		368	765		1	3	25,29
Vall	33	88	56	64	300	542	3		3	1,4,7,10,11,2 1
Vete	86	98	53		390	742	2	0	1	4,7,10,21
Ägg	27	92				970				5
Äggmassa	17	94	70		520	743				18
Äggskal	82	9	72		300	417				18
Överskotts- slam	5	67	65		270					19,24

BILAGA 3 - EKVATIONER

Beräkning av total mängd producerad biogas

$$\begin{aligned} & \text{Mängd tillfört organiskt material} \left[\frac{\text{ton VS}}{\text{dygn}} \right] \times \text{nedbrytningsgrad} [\%] \times \\ & \text{biogasutbyte} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg VS nedbrutet}} \right] = \text{biogasproduktion} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{dygn}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Beräkning av total mängd metangas

$$\text{biogasproduktion} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{dygn}} \right] \times \text{metanhalt} [\%] = \text{metanproduktion} \left[\frac{\text{Nm}^3 \text{ CH}_4}{\text{dygn}} \right] \quad (\text{A.2})$$

Beräkning av mängd organiskt material i rötrest

$$\begin{aligned} & \text{Mängd tillfört organiskt material} \left[\frac{\text{ton VS}}{\text{dygn}} \right] \times (100 - \text{nedbrytningsgrad} [\%]) = \\ & \text{org. mtrl. i rötrest} \left[\frac{\text{ton VS}}{\text{dygn}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Beräkning av näringsinnehåll i rötrest

$$\begin{aligned} & \text{Mängd tillförd torrs substans} \left[\frac{\text{ton TS}}{\text{dygn}} \right] \times \text{andel näringsämne} [\%] \times (100 - \\ & \text{nedbrytningsgrad} [\%]) \times \text{andel näringsämne i lösning} [\%] = \\ & \text{mängd löst näringsämne} \left[\frac{\text{kg näringsämne}}{\text{dygn}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Där *andel näringsämne i lösning* [%] är en antagen konstant

$$\begin{aligned} & \text{Total mängd näringsämne} \left[\frac{\text{kg näringsämne}}{\text{dygn}} \right] - \text{mängd löst näringsämne} \left[\frac{\text{kg näringsämne}}{\text{dygn}} \right] \\ & = \text{mängd fast näringsämne} \left[\frac{\text{kg näringsämne}}{\text{dygn}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

BILAGA 4 - BERÄKNINGSMODELLEN

Givna värden från tabell

1. Primärslam	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	65,0 [% av TS]
Ntot	2,5 [% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	1,6 [% av TS]
P	[kg P/d]
K	0,4 [% av TS]
K	[kg K/d]

2. Överskottsslam	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	66,7 [% av TS]
Ntot	[kg N/d]
Ntot	[kg N/d]
P	[kg P/d]
P	[kg P/d]
K	[kg K/d]
K	[kg K/d]

3. Avvattnings	
Q	[m ³ /d]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]

4. Fällfällning	
Q	[m ³ /d]
TS ut	[l TS/d]
VS ut	[l VS/d]
Avsk-grad	65,0 [%]

5. Fällfällning	
Q	[m ³ /d]
TS ut	[l TS/d]
VS ut	[l VS/d]
Avsk-grad	66,7 [%]

6. Avvattnings	
Q	[m ³ /d]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]

7. Blandslam	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

8.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

9.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

10.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

11. Matavfall (hushåll)	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,6 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	85,0 [% av TS]
Ntot	2,7 [% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	0,5 [% av TS]
P	[kg P/d]
K	1,1 [% av TS]
K	[kg K/d]

12. Totalt	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

13. Fettslam	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,6 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	95,9 [% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

14.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

15.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

16.	
Q	[m ³ /år]
Q	[m ³ /d]
TS	5,0 [%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
P	[% av TS]
P	[kg P/d]
K	[% av TS]
K	[kg K/d]

18. Spjöldning med vatten	
Q	[m ³ /d]

17. Spjöldning med rejektvatten	
Q	[m ³ /d]
N-tot	[kg N/d]
VS	[kg VS/d]
K	[kg K/d]

19. Fjäll till rökammare	
Q	[m ³ /d]
Q	[m ³ /h]
TS	[%]
TS	[l TS/d]
VS	[%]
VS	[l VS/d]
N tot	[kg N/d]
P tot	[kg P/d]
K tot	[kg K/d]

20. Jämförelsevärden	
Q gas tot	[Nm ³ / d]
CH ₄ produktion tot	[Nm ³ CH ₄ / d]

21. Resultat gasproduktion	
Q gas tot	[Nm ³ / d]
CH ₄ produktion tot	[Nm ³ CH ₄ / d]
sp gasprod medel	[Nm ³ / kg VS _{in}]
Energinnehåll	[kWh / d]
CH ₄ genomsnitt	[%]

22. Gasproduktion	
Totalt gasproduktion	[Nm ³ / d]
Totalt	[Nm ³ / d]
Primärslam	[Nm ³ / d]
Överskottsslam	[Nm ³ / d]
Matavfall (hushåll)	[Nm ³ / d]
Fettslam	[Nm ³ / d]
CH ₄ produktion	[Nm ³ CH ₄ / d]
Totalt	[Nm ³ CH ₄ / d]
Primärslam	[Nm ³ CH ₄ / d]
Överskottsslam	[Nm ³ CH ₄ / d]
Matavfall (hushåll)	[Nm ³ CH ₄ / d]
Fettslam	[Nm ³ CH ₄ / d]

23. Rötning	
Rötkammarevolym	[m ³]
Vrötning	[m ³]
Frigjordvolym	[m ³]
HRT	[d]
Org belastn	[kg VS/m ³ d]
Nedbrytningsgrad:	
Primärslam	50,0 [%]
Överskottsslam	55,0 [%]
Matavfall (hushåll)	65,0 [%]
Fettslam	85,0 [%]
N tot	[kg N/d]
VS	[kg VS/d]
K tot	[kg K/d]
Nedbrgr genomsnitt	[%]

24. Gaskonstanter	
Sp. gasprod.	[Nm ³ /kg VS nedbrutet]
Primärslam	[Nm ³ /kg VS nedbrutet]
Överskottsslam	[Nm ³ /kg VS nedbrutet]
Matavfall (hushåll)	[Nm ³ /kg VS nedbrutet]
Fettslam	[Nm ³ /kg VS nedbrutet]
Metanhalt	[%]
Primärslam	[%]
Överskottsslam	[%]
Matavfall (hushåll)	[%]
Fettslam	[%]
Medelvärde:	[%]

29. Fällfällning	
Q gas tot	[Nm ³ / d]
Q gas tot	[Nm ³ CH ₄ / d]
CH ₄ produktion tot	[Nm ³ CH ₄ / d]

25. Fjäll från rökammare	
Q	[m ³ / d]
TS	[%]
TS	[l TS/d]
VS	[l VS/d]
VS	[% av TS]
Ntot	[% av TS]
Ntot	[kg N/d]
N tot fast	[% av TS]
N tot fast	[kg N/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[% av TS]
Ptot	[kg P/d]
Ptot fast	[% av TS]
Ptot fast	[kg P/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[% av TS]
Ktot	[kg K/d]
K tot fast	[% av TS]
K tot fast	[kg K/d]
K tot	[kg K/d]

26. Avvattnings rötslam	
TS ut	[%]
TS ut	[l TS/d]
VS ut	[kg / d]
Avsk-grad	[%]

27. Rejektvatten	
Q	[m ³ / d]
TS	[%]
TS	[l TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[l VS/d]
N tot	[% av TS]
N tot	[kg N/d]
N fast	[% av TS]
N fast	[kg N/d]
N tot	[kg N/d]
P tot	[kg P/d]
P fast	[% av TS]
P fast	[kg P/d]
P tot	[kg P/d]
K tot	[% av TS]
K tot	[kg K/d]
K fast	[% av TS]
K fast	[kg K/d]
K tot	[kg K/d]

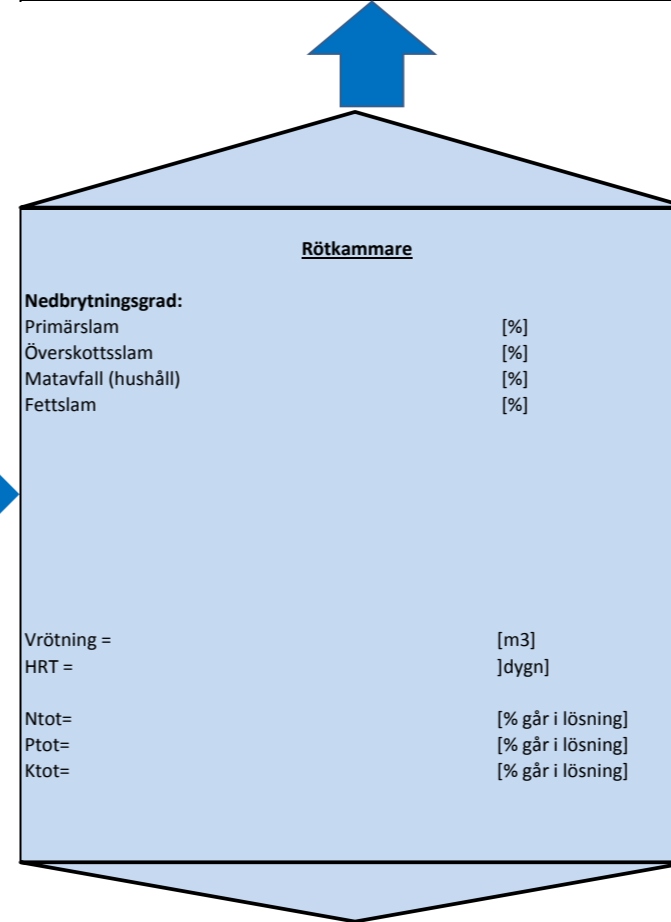
28. Fast rötslam	
Q	[m ³ / d]
TS	[%]
TS	[l TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[l VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Phot	[kg P/d]
Ntot	[kg K/d]

29. Flytande rötslam	
Q	[m ³ / d]
TS	[%]
TS	[l TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[l VS/d]
N tot	[kg N/d]
N fast	[% av TS]
N fast	[kg N/d]
Ntot	[kg N/d]
P tot	[kg P/d]
P fast	[% av TS]
P fast	[kg P/d]
P tot	[kg P/d]
K tot	[kg K/d]
K fast	[% av TS]
K fast	[kg K/d]
K tot	[kg K/d]

Substrat	Flöde [m3/d]	TS [t TS/d]	VS [t VS/d]	Ntot [kg N/d]	Ptot [kg P/d]	Ktot [kg K/d]
Primärslam						
Överskottsslam						
Matavfall (hushåll)						
Fettslam						

Flöde till röt-kammare	
Q	[m3/d]
TS	[t TS/d]
VS	[t VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[kg K/d]

Resultat gasproduktion	
Gasproduktion totalt	[Nm3 / d]
Gasproduktion totalt	[Nm3 / år]
Metanproduktion totalt	[Nm3 CH4/ d]
Metanproduktion totalt	[Nm3 CH4/ år]
Specifik gasproduktion mede	[Nm3 / kg VSin]
Energiinnehåll	[kWh / d]
Energiinnehåll	[kW]
Jämförelsevärden	
Q gas tot	[Nm3 / d]
CH4 produktion tot	[Nm3 CH4/ d]
Förändring	
Q gas tot	[Nm3 / d]
Q gas tot	[%]
CH4 produktion tot	[Nm3 CH4/ d]
CH4 produktion tot	[%]



Flöde från röt-kammare	
Q	[m3/d]
TS	[t TS/d]
VS	[t VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[kg K/d]

Fast rötrest	
Q	[m3 / d]
TS	[%]
TS	[t TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[t VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[kg K/d]
N löst=	[kg N/d]

Rejektvatten	
Q	[m3 / d]
TS	[%]
TS	[t TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[t VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[kg K/d]
N löst=	[kg N/d]

Flytande rötrest	
Q	[m3 / d]
TS	[%]
TS	[t TS/d]
VS	[% av TS]
VS	[t VS/d]
Ntot	[kg N/d]
Ptot	[kg P/d]
Ktot	[kg K/d]
N löst=	[kg N/d]

Polymerförbrukning	
Pol-förbr	[kg / d]

