

# EXAMENSARBETE ACEX20

En jämförelse av mesofila och termofila biogasanläggningar

Driftserfarenheter och driftsproblem

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Mohamad Taleb Attar

August Sandell



Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för vattenmiljöteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2024

En jämförelse av mesofila och termofila biogasanläggningar

Driftserfarenheter och driftsproblem

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Mohamad Taleb Attar

August Sandell

© MOHAMAD TALEB ATTAR, AUGUST SANDELL 2024

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för vattenmiljöteknik

Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för vattenmiljöteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Biogasanläggning i Sävsjö (återgiven med tillåtelse)

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Göteborg 2024

En jämförelse av mesofila och termofila biogasanläggningar

Driftserfarenheter och driftsproblem

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik*

Mohamad Taleb Attar

August Sandell

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för vattenmiljöteknik  
Chalmers tekniska högskola

## **SAMMANFATTNING**

Dagens samhälle har ett stort fokus på en grön omställning och behovet av att främja den hållbara utvecklingen ökar med tiden. Biogasproduktion är en process där organiska material bryts ner under syrefria förhållanden. Processen utnyttjar olika substrattypen såsom avfall, gödsel, matrester och omvandlar dem till en förnybar energikälla.

Processen kan köras under mesofila förhållanden mellan 35–40 °C eller vid termofila förhållanden mellan 50–55 °C, men den termofila rötningen anses vara mer ostabil och ha fler driftsproblem i jämförelse med den mesofila rötningen. Denna studie syftar till att jämföra driftserfarenheter och driftsproblem mellan mesofila och termofila anläggningar, för att ge underlag för en omställning från mesofil till termofil drift för biogasproduktion vid gårdsanläggningar, samrötningsanläggningar och avloppsreningsverk i Sverige.

Metoden för att utföra detta examensarbete är en kombination av både litteratur- och enkätstudier i form av frågor som tar upp driftserfarenheter och driftsproblem hos de svenska biogasanläggningarna. Data från enkäten samlades in och beräkningar har utförts för att forma resultaten. Resultaten som kan dras efter denna studie påvisar inga stora skillnader mellan att driva anläggningar på termofil och mesofil drift. De termofila anläggningarna hade ett något kortare medelvärde på uppehållstiden och ett något större antal än mesofila anläggningar hade problem med lukt och skumning.

Trots en brist på information i svaren från enkäten till vår jämförelse visar slutsatserna att termofil rötning är en mer effektiv process även om vissa driftsproblem relaterade till lukt och skumning kan uppstå. Termofila anläggningar visade kortare uppehållstid som innebär högre biogasproduktion. Studien visade att övergången från mesofil till termofil rötning är möjligt om processen sker under stabila förhållanden.

Nyckelord: Biogasproduktion, substrattypen, Mesofil rötning, Termofil rötning, Driftserfarenheter, Driftsproblem, Gårdsanläggningar, Samrötningsanläggningar, Avloppsreningsverk,



A comparison of mesophilic and thermophilic biogas plants

Operational experiences and operational issues

*Degree Project in the Engineering Programme  
Civil and Environmental Engineering*

Mohamad Taleb Attar

August Sandell

Department of Architecture and Civil Engineering  
Division of Water Environment Technology  
Chalmers University of Technology

## **ABSTRACT**

Today's society places significant emphasis on a green transition, and the need to promote sustainable development is becoming increasingly urgent. Biogas production is a process where organic materials are decomposed under anaerobic conditions. This process utilizes various types of substrates such as waste, manure, and food scraps, converting them into a renewable energy source.

The process can be conducted under mesophilic conditions at 35–40 °C or thermophilic conditions at 50–55 °C; however, thermophilic digestion is considered more unstable and prone to operational issues compared to mesophilic digestion. This study aims to compare operational experiences and issues between mesophilic and thermophilic plants to provide data for transitioning from mesophilic to thermophilic operations in biogas production at farm plants, co-digestion plants, and wastewater treatment plants in Sweden.

The method used in this thesis combines both literature reviews and survey studies with questions addressing operational experiences and issues among Swedish biogas plants. The survey data was collected, and calculations were conducted to form the results. The results from this study indicate no significant differences between operating plants under thermophilic and mesophilic conditions. Thermophilic plants showed a somewhat shorter average retention time and a few more thermophilic plants than mesophilic plants experienced odor and foaming problems.

Despite a lack of information in the survey responses for our comparison, the conclusions indicate that thermophilic digestion is a more efficient process, even though certain operational issues related to odor and foaming may arise. Thermophilic facilities demonstrated shorter retention times, resulting in higher biogas production. The study revealed that transitioning from mesophilic to thermophilic digestion is feasible under stable conditions.

Key words: Biogas production, Types of substrates, Mesophilic digestion, Thermophilic digestion, Operational experiences, Operational issues, Farm plants, Co-digestion plants, Wastewater treatment plants

# Innehållsförteckning

FÖRORD	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Frågeställningar	1
1.3 Avgränsningar	2
2 BAKGRUND	3
2.1 Biogasproduktion	3
2.2 Avloppsrening	4
2.2.1 Mekanisk rening	4
2.2.2 Biologisk rening	4
2.2.3 Kemisk rening	5
2.2.4 Slambehandling	5
2.3 Rötning	7
2.3.1 Hydrolys	8
2.3.2 Fermentering	8
2.3.3 Anaerob oxidation	8
2.3.4 Metanbildning	9
2.3.5 Mesofil rötning	9
2.3.6 Termofil rötning	10
2.3.7 Övergång från mesofil- till termofil temperatur	10
2.4 Processparametrar	11
2.4.1 pH	11
2.4.2 Temperatur	12
2.4.3 TS och VS	14
2.4.4 Uppehållstid	14
2.4.5 Substrat	15
2.4.6 Utrötningsgrad	16
2.5 Driftsproblem	17
2.5.1 Lukt	17
2.5.2 Skumning	18
3 METOD:	20
3.1 Litteraturstudier	20
3.2 Enkätundersökning	20
4 RESULTAT & DISKUSSION	21
4.1 Driftserfarenheter	21
4.2 Driftsproblem	30

4.3	Metoddiskussion	33
5	SLUTSATS	34
6	REFERENSER	35
	APPENDIX A: SKICKAT MEJL & ENKÄT	36



## **Förord**

Detta är ett examensarbete på Samhällsbyggnadsteknikprogrammet på Chalmers tekniska högskola. Arbetet är på 15 högskolepoäng och handledare under arbetet har varit Oskar Modin.

Vi vill börja med att tacka Oskar Modin för en bra och effektiv handledning under arbetets gång.

Vi vill även tacka Ola Fredriksson från Envidan för hjälpen med formulering av frågor i enkäten, kandidatgruppen med samma ämne för gott samarbete vid utformande av enkäten, samt alla företag och privatpersoner som har tagit sin tid för att svara på vår enkät och andra frågor.

Göteborg Maj 2024

Mohamad Taleb Attar  
August Sandell

## Begreppslista

- **Biogas** – En slutprodukt av rötningsprocessen och består till en stor del av metan och koldioxid. Den kan användas till värme & elproduktion.
- **Mesofil rötning** – Rötning vid driftstemperaturer mellan 35–40 °C.
- **Termofil rötning** - Rötning vid driftstemperaturer mellan 50–55 °C.
- **TS** - TS eller torrsubstanshalten är det kvarvarande ämnet när vatten har avlägsnats från slammet i en ugn med temperaturen 105 °C.
- **VS** - VS eller Volatile Solids kallas på svenska glödförlust är en materialparameter som anger den del av torrsubstansen i slammet som är förbränningsbart vid 550 °C.
- **Substrat** - Materialet som pumpas in i röt-kammaren under biogasprocessen.
- **Utröttningsgrad** - Den procentuella halten av det organiska materialet som under en bestämd tid har brutits ner och omvandlats till biogas.
- **Uppehållstid** - Den tid som behövs till ersättandet av hela materialvolymen i en röt-kammare.
- **Rötrest** - Produkt som bildas efter rötning av organiskt material och som innehåller vatten, icke nedbrutet material, näringsämnen och mikroorganismer.
- **Skumning** – Ett driftsproblem som uppstår när skum bildas på ytan av reaktorn.
- **Röt-kammare** – En behållare där organiskt material bryts under anaeroba förhållanden.
- **Slamavvattning** - Slutavvattningen är den delprocessen där den största volymminskningen uppnås genom eliminering av vatten.

# 1 Inledning

Dagens samhälle har ett stort fokus på en grön omställning. Den gröna omställningen handlar inte enbart om att allt nytt som produceras ska ha noll utsläpp, utan även att samhällets restprodukter utnyttjas till sin fulla potential (Bannbers, o.a., 2021). Biogas är ett förnybart bränsle som produceras med hjälp av organiskt avfall. Beroende på anläggning kan biogas produceras med bland annat avloppsslam, matavfall och biomassa, och restprodukten från biogasproduktion kan ofta användas som gödsel i jordbruket (Klackenberg, Energigas Sverige, 2023).

I Sverige bedrivs biogasproduktionen vanligtvis vid mesofil temperatur, dvs, i spannet 35–40 °C. Den låga temperaturen gör att processen kan drivas stabilt, inte är känslig för störningar i temperatur eller pH, och sägs inte ha problem med lukt. Den låga temperaturen leder dock till att tiden för produktionen är väldigt lång, samt att skadliga bakterier och sjukdomar överlever processen och kommer kanske där med tillbaka ut i naturen. På en minoritet av anläggningar i Sverige bedrivs rötningen i spannet 50–55 °C, så kallad termofil rötning. Att temperaturen är högre leder till en snabbare process, större biogasutbyte, men även att bakterier och sjukdomar avdödas i processen (Avfall Sverige, 2019).

I framtiden förväntas nya krav på avdödning av sjukdomar och bakterier i det organiska avfallet som släpps ut i naturen (Svensk Vatten, 2021). Att samhället ständigt växer kommer leda till en ökning av avfall till biogasanläggningar. Dessa ändringar hade gynnats av en omställning till termofil drift, som både kan hantera avfallet snabbare och rena avfallet (Avfall Sverige, 2019).

Idag bedriver majoriteten av biogasanläggningarna i Sverige sin produktion på mesofil temperatur. Detta examensarbete ska undersöka drifterfarenheter mellan mesofila och termofila anläggningar, för att ge underlag för en omställning från mesofil till termofil drift. Arbetet kommer genomföras med hjälp av en enkät, och ska svara på om det finns skillnader i att driva anläggningarna vid mesofil eller termofil temperatur.

## 1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka vilka olika drifterfarenheter svenska mesofila biogasanläggningar har och jämföra dem med de termofila. Ytterligare kommer olika parametrar såsom uppvärmning och driftsproblem såsom lukt och skumning att undersökas och jämföras mellan anläggningstyperna.

## 1.2 Frågeställningar

Nedan presenteras två olika frågor som rapporten kommer behandla

1. Vilka olika drifterfarenheter har de mesofila och termofila biogasanläggningarna?
2. Vilka olika driftsproblem har de mesofila och termofila biogasanläggningarna?

### **1.3 Avgränsningar**

Arbetet avgränsar sig till att enbart behandla upplevda erfarenheter från biogasanläggningar, och kommer ej att innefatta egna experiment eller laborationer för att besvara frågeställningen. Arbetet kommer inte undersöka om eventuella driftproblem beror på val av substrat, storlek på anläggningen, eller andra eventuella skillnader som kan finnas mellan anläggningarna.

## 2 Bakgrund

### 2.1 Biogasproduktion

Biogas är en gas bestående av främst koldioxid och metan (60–70 %), som bildas när mikroorganismer bryter ned organiskt avfall utan tillgång till syre, i så kallade anaeroba miljöer. Detta sker naturligt i magen på kor och i sumpmarker (Jordbruksverket, 2006).

Vid produktion av biogas bryts det organiska avfallet ner av mikroorganismer i en rötchamber, som är en tank bestående av stål eller betong. Olika anläggningar använder olika organiskt avfall, som till exempel gödsel, slam från vattenreningsverk, matavfall eller restprodukter ifrån livsmedelsindustrin (Klackenberg, Energigas.se, 2023). Tanken rörs om kontinuerligt och håller en jämn temperatur under hela rötningsprocessen. Vilken temperatur som används skiljer sig från de olika anläggningarna, men vanligtvis är det mesofil temperatur, som ligger mellan 35-40°C eller termofil temperatur som ligger mellan 50-55°C. De två temperaturspannen beror på att de mikroorganismer som används trivs bäst i dessa temperaturer (Avfall Svergie, 2019) (Jordbruksverket, 2006). Oavsett vilken temperatur som används i anläggningen, är det viktigt att temperaturen hålls jämn och inte varierar mer än  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , för att uppnå bästa resultat (Schnürer & Jarvis, 2008).

Rötningsprocessen börjar med att mikroorganismer i rötchambren bryter ner avfallet till socker och aminosyror. Det börjar sedan jäsa vilket bildar fettsyror, vätgas och olika typer av alkohol. Sedan bearbetar en unik grupp mikroorganismer dessa produkter för att bilda biogas bestående av främst metan och koldioxid (Klackenberg, Energigas Svergie, 2023).

Hur länge avfallet befinner sig i rötchambren skiljer sig beroende på vilket avfall som röts, men även på vilken temperatur som anläggningen producerar på. En vanlig uppehållstid vid mesofil temperatur är 20–25 dagar, vilket betyder att det organiska avfallet ska befinna sig i tanken i 20–25 dagar med förutsättningarna att lika mycket avfall pumpas in som ut (Jordbruksverket, 2006). Efter rötchambren går avfallet till en efterrötningstank, där det får röta färdigt. Efterrötningstanken är tät och samlar upp den biogas som produceras här och motverkar att metan sprids ut i atmosfären. Det material som blir över kallas rötrest och kan användas som biogödsel i jordbruket då det fortfarande innehåller mycket näring (Klackenberg, Energigas.se, 2023) (Jordbruksverket, 2006).

Hur mycket av materialet som är nedbrytbart kallas ”VS” (Volatile Solids), eller ”glödförlust” på svenska, skiljer sig mellan olika typer av material. VS halten är en andel av TS- halten (torrsubstanshalten), och räknas ut med att subtrahera askhalten från TS-halten. Genom att samrötning, det vill säga röta olika material med olika VS-halter tillsammans, går det att öka metanutbytet (Jordbruksverket, 2006).

Den biogas som produceras har många olika användningsområden, och beror bland annat på storleken på biogasanläggningen. Biogasen kan kopplas till en gaspanna som värmer upp vatten, som sedan används till uppvärmning av bostäder. I Tyskland och Danmark är det vanligt att biogasen används för att producera kraft och värme. Gasen kan även uppgraderas, det vill säga ta bort koldioxiden för att få fram en biogas

bestående av främst metan, som sedan kan användas som fordonsbränsle (Jordbruksverket, 2006).

## **2.2 Avloppsrening**

Reningsstegen av avloppsvatten kan delas i mekanisk, biologisk och kemisk rening. Resultatet av de tre reningstegen blir ett slam som behandlas i biogasanläggningar (Modin, 2018).

### **2.2.1 Mekanisk rening**

Med den mekaniska reningen eller så kallad primär rening är huvudmålet att rensa avloppsvattnet från fasta material och grova partiklar. Processen börjar med ett rensgaller med 15–75 mm öppningar vars uppgift är att avskilja och ta bort grova material som har strömmats med avloppet. Att ha ett högt flöde igenom gallret är viktigt för att en stabil process ska uppnås, då det inte bara förhindrar materialsedimentation, utan även att materialen trycks ihop. En flödes hastighet mellan 0,3–1,0 m/s anses vara acceptabel för att säkerställa en effektiv rening i rensgallret (Modin, 2018).

Sedan kommer det så kallad en sedimentationstank eller så kallad sandfång som renar avloppsvattnet från tunga partiklar såsom grus och sand. I det steget är det också viktigt med balanserad flödes hastighet. En hög flödes hastighet fördröjer sedimentationen av tunga partiklar och vid en låg flödes hastighet sedimenteras även de små lätta partiklarna. Lika viktigt som flödes hastigheten är separationen av organiska och inorganiska partiklar vid reningen. Om inte partiklarna separeras finns risken att de ackumuleras i pumpar vilket leder till slitage, som i sin tur försämrar biogasproduktionen (Modin, 2018).

Det sista processen av den mekaniska reningen är försedimenteringen, vilket har en lägre hastighet och längre uppehållstid i jämförelse med sandfånget. En medellängd på uppehållstiden är 1,5–2,5 timmar, skulle den bli längre kan anaeroba förhållanden förekomma och orsaka luktproblem. Primärslam samlas i botten efter sedimentationen, därefter förs slammet till änden av tanken och vidare går till slambehandlingsprocesserna (Modin, 2018).

### **2.2.2 Biologisk rening**

Efter den primära reningen kommer den biologiska reningen vilket också kallas för sekundär rening. Huvudsyftet med reningsprocessen är att skilja bort kväve, fosfor och andra organiska ämnen från avloppsvattnet. Närvarandet av syre är avgörande för att lyckligt effektivisera reningsprocessen, anaeroba förhållanden gör att organiska ämnen oxideras till vatten och koldioxid (Modin, 2018).

Den vanligaste metoden kallas för aktivslammetoden och går ut på föroreningarna som finns i avloppsvattnet bryts ner av växande mikroorganismer i flockar. Det är viktigt att tanken är luftad eller mekanisk omrörd för att upprätthålla anaeroba förhållanden i tanken. En annan viktig faktor är att uppehållstiden för vatten måste vara tillräckligt lång (3–8 timmar), annars blir föroreningarnas nedbrytningsprocess instabil och får inte tillräckligt med tid. Inte bara vattnets uppehållstid utan också slammets uppehållstid är avgörande parameter i reningsprocessen, den brukar vara

längre än vattnets uppehållstid och detta uppnås genom återanvändning av det aktiva slammet (Modin, 2018).

Andra processer som kan ingå i den biologiska reningen är biobäddar som är en aerob process samt Suspenderade biofilmbärare (MBBR). ”MBBR-processen är ett biologiskt reningssteg som kan användas både för BOD och kväverening. En MBBR-process följs vanligtvis av en eftersedimentering” (Modin, 2018).

### **2.2.3 Kemisk rening**

Det sista steget för avloppsvattenrening är kemisk rening där huvudsyftet är att minimera fosforhalten i vatten. Fällningskemikalier i form av till exempel järnklorid tillsätts i syfte för att avskilja partiklarna. Mindre partiklar förs till större aggregat för att genom sedimentering kunna separera dem på ett enklare sätt. Processen för separationen kallas koagulering och flockulering. Fosforeringen sker främst genom bildning av fällningar av fosfatjoner och metalljoner som tillsattes under reningsprocessen (Modin, 2018).

### **2.2.4 Slambehandling**

Efter de tre reningsprocesserna produceras slam. Primärslam bildas till ett resultat av den mekaniska reningen, bioslam bildas som resultat av den biologiska reningen och kemsam bildas under den kemiska reningen. De olika slamtyperna behandlas i slambehandlingsprocesser som har syftet att utvinna energi från slammet, minimera mängden vatten i slammet och reducera slamhalten (Modin, 2018).

Behandlingen består av tre delprocesser som slammet går genom. Dessa kommer översiktligt diskuteras (Modin, 2018):

#### **2.2.4.1 Förtjockning**

Med förtjockningen avses minskningen av andelen vatten i slammet med målet att höja TS-halten, vilket gör att slammet kan stabiliseras på ett effektivare sätt. Att uppnå en högre TS-halt gynnar processen utifrån olika aspekter, såsom ekonomi, miljö och effektivitet. Några fördelar med att slam förtjockas innan den rötas är att den reducerar kostnaderna för uppvärmningen innan rötningen, bidrar till en ökad uppehållstid i kammaren, vilket leder till större biogasproduktion, slamflöden blir mindre och i sin tur minskar elenergiförbrukningen och till sist produceras ett tjockare slam med mindre vattenhalt vilket underlättar och effektiviserar avvattningsprocessen. Vanlig utrustning för förtjockningsprocessen är centrifuger och olika sorts förtjockare såsom skiv- och bandförtjockare (Starberg, Karlsson, Larsson, Moraeus, & Lindberg, 2005) (Modin, 2018).

#### **2.2.4.2 Anaerob rötning**

Efter förtjockningen kommer rötningen. Rötningen sker under syrefria förhållanden och syftet är att både minska mängden slam och utvinna energi i form av biogas. Rötningens processen sker under mesofila förhållanden (35–37 °C) och under termofila förhållanden (50–55 °C). Vid dessa temperaturer trivs de olika bakterierna. Rötningens processen leder till bildning av metan som är en energirik gas men biogasen består också av 30-40 % koldioxid. En god utförd rötningens process förbättrar nedbrytningsprocessen i kammaren vilket i sin tur höjer biogasproduktionen, en god

stabilisering på slammet och minimering av slammängden (Starberg, Karlsson, Larsson, Moraeus, & Lindberg, 2005) (Modin, 2018).

#### **2.2.4.3 Avvattning**

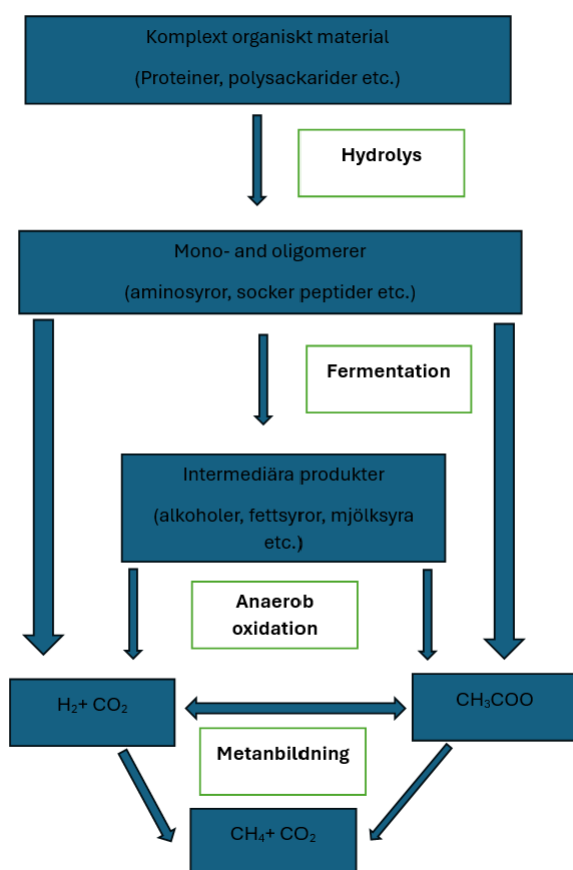
Slutavvattningen är den delprocessen där den största volymminskningen uppnås genom eliminering av så mycket mängd vatten som möjligt. Hur bra resultatet blir här avgörs av effektiviteten och optimeringen av rötningsprocessen där olika faktorer såsom slammets temperatur och slammet nedbrytningsgrad spelar roll. De vanligaste utrustningar för avvattningen är centrifugering eller slampress (Starberg, Karlsson, Larsson, Moraeus, & Lindberg, 2005) (Modin, 2018).

## 2.3 Rötning

Att mikroorganismer bryter ner substrat kallas rötning. I biogasproduktion sker rötningen utan tillgång till syre, i en så kallad anaerob nedbrytning. Rötningen kan se lite olika ut beroende på anläggning, och påverkas främst av temperatur, ammoniakhalt och vilken mångfald av mikroorganismer som finns tillgänglig. Processen kräver en variation av mikroorganismer som tillsammans i fyra olika steg bryter ned det organiska avfallet (Avfall Svergie, 2019) (Schnürer & Jarvis, 2008).

Substrat fungerar som mat, det vill säga en energikälla för mikroorganismer. Olika mikroorganismer lever på olika typer av föda. Detta gör att större variation av substrat kräver en större mångfald av mikroorganismer (Schnürer & Jarvis, 2008). Mångfalden påverkas inte enbart av vilka substrat som finns tillgängligt, utan även miljön där rötningen sker, främst pH-värdet och temperaturen (Schnürer & Jarvis, 2008).

När en mikroorganism bryter ned ett substrat bildas en restprodukt. Mikroorganismer kan inte använda sina egna restprodukter för att utvinna mer energi, däremot kan restprodukten brytas ned av andra mikroorganismer. Detta är något som används vid bildning av biogas, där mikroorganismerna i de fyra olika stegen, hydrolys, fermentation även kallat jäsnings, anaerob nedbrytning och metanbildning, bryter ned varandras restprodukter för att slutligen bilda metan (Schnürer & Jarvis, 2008).



Figur 1: Visar de olika stegen av nedbrytningen av organiska material till biogas. Inspiration till figuren tagen ifrån (Jarvis & Schnurer, 2009).

### **2.3.1 Hydrollys**

I det första steget, som kallas hydrollys, bryts kolhydrater, fetter och protein ner till olika nedbrytningsprodukter. Molekylerna i substratet är till en början för stora för mikroorganismer att bryta ned. För att klara av nedbrytningen utsöndras extracellulära enzymer som klarar av att dela upp molekyler i storlekar som mikroorganismerna kan hantera (Schnürer & Jarvis, 2008).

Enzymerna som utsöndras av mikroorganismer delar olika beståndsdelar av substratet, till exempel socker, fett eller proteiner. Mikroorganismer kan ha en eller flera olika typer av enzymer. De mikroorganismer med en typ av enzym kan enbart bryta ned en beståndsdel, medan de som kan utsöndra olika enzymer kan bryta ned olika beståndsdelar (Schnürer & Jarvis, 2008).

Rotfrukter, frukt, spannmål och grönsaker innehåller socker. Socker består av polysackarider som är olika sockerarter sammansatta i kedjor. Hydrolys av polysackarider använder bakterier och anaeroba svampar som bryter ned sockerkedjorna till cellobios, glukos och olika sockerarter, beroende på vilken typ av polysackarid som bryts ned (Schnürer & Jarvis, 2008).

Likt polysackarider är proteiner sammansatta kedjor av aminosyror. Nedbrytningen av proteiner är viktig då substrat från köttproduktion eller gödsel från höns och grisar används som substrat. Restprodukten vid nedbrytning av protein är aminosyror (Avfall Svergie, 2019) (Schnürer & Jarvis, 2008).

När fett bryts ned bildas restprodukten glycerol och olika typer av fettsyror (Avfall Svergie, 2019). Olika substrat som bryts ned ger olika typer av fettsyror. Vanliga substrat som innehåller fett är restprodukter från köttproduktion samt fettavskiljarslam från reningsverk (Schnürer & Jarvis, 2008).

### **2.3.2 Fermentering**

Nästa steg i rötningen kallas fermentering, eller jäsning, och är den del i rötningsprocessen som använder flest variation av mikroorganismer, även flera som var aktiva under hydrolysfasen (Schnürer & Jarvis, 2008). Jäsningen sker genom flera olika reaktioner, som varierar beroende på vilka mikroorganismer och substrat som är tillgängliga. Substraten som används i jäsningen är restprodukterna från hydrolysen, förutom fettsyror som bryts ned under den anaeroba oxidationen (Schnürer & Jarvis, 2008).

Under jäsningen kan organiska syror, alkoholer, ammoniak och ammonium, koldioxid och väte framställas beroende på substrat, mikroorganismer och miljöförhållanden (Schnürer & Jarvis, 2008) (Avfall Svergie, 2019).

### **2.3.3 Anaerob oxidation**

Anaerob oxidation är olika reaktioner som bryter ner restprodukterna från jäsningen och fettsyror från hydrolysen. Under oxidationen bildas vätgas, acetat och koldioxid (Schnürer & Jarvis, 2008).

De två sista stegen, anaerob oxidation och metanbildning är mycket beroende av varandra. Detta beror på bildningen av vätgas under den anaeroba oxidationen. Bli koncentrationen av vätgas för hög kan inte mikroorganismerna som används vid processen fungera då de inte får tillräckligt med energi, vilket leder till att den anaeroba oxidationen avstannar om inte vätgasen avlägsnas (Schnürer & Jarvis, 2008). Mikroorganismerna som används vid metanbildningen konsumerar vätgas, vilket skapar en balans i rötkammaren, där en tillräckligt låg vätgaskoncentration för att anaerob oxidation ska kunna ske, bibehålls i tanken (Schnürer & Jarvis, 2008).

### **2.3.4 Metanbildning**

Metanbildning, som är det sista steget vid bildning av biogas, sker genom att grupper av mikroorganismer som kallas metanogener, bryter ned substraten som bildas vid anaerob oxidation och bildar biogas bestående främst utav metan och koldioxid (Schnürer & Jarvis, 2008). Till skillnad från de resterande mikroorganismerna i processen, tillhör metanogenerna inte gruppen bakterier, utan gruppen Archaea. Detta leder till att metanogenerna har andra egenskaper, bland annat är de känsligare mot ändringar i miljön än resterande mikroorganismer. Metanbildningen är en viktig del av processen, och sker i stort samband med den anaeroba oxidationen vilket gör att en störning av pH eller temperatur som påverkar metanogenerna negativt, får en stor påverkan på processen (Schnürer & Jarvis, 2008).

Främst bildas metan från vätgas, koldioxid och acetat av grupperna hydrogenotrofer och acetotrofer. Det finns även metanogener som bildar metan av mindre alkoholer, men dessa förekommer i mindre mängd än de övriga metanogenerna som används (Avfall Svergie, 2019).

### **2.3.5 Mesofil rötning**

Mesofil rötning sker vanligtvis i temperaturspannet 35-40°C. Vid denna temperatur överlever många olika sorters mikroorganismer som är användbara vid nedbrytningen av organiskt avfall. Variationen av mikroorganismer leder till att den mesofila rötningen är mindre känsligt för störningar, och ger en större nedbrytning av specifika avfall än vad termofil rötning kan ge. Den låga temperaturen räcker inte för att fullt hygienisera avfallet, vilket leder till att patogena organismer och sjukdomar överlever rötningen. För att bli av med patogena organismer och sjukdomar kan avfallet förbehandlas, genom att värma upp det till 70°C i en timme, och sedan låta det svalna innan rötprocessen påbörjas (Schnürer & Jarvis, 2008).

Den lägre temperaturen kräver att uppehållstiden i anläggningen är relativt lång, jämfört med termofil drift. Detta leder till att anläggningarna blir stora, för att kunna hantera mycket avfall under en längre tid. Däremot kräver mesofila anläggningar mindre energi för uppvärmningen av anläggningen, samt att kvävet som bildas under processen i större utsträckning består utav ammonium, och inte ammoniak (Avfall Svergie, 2019). Mesofil drift är mindre känslig för långa fettsyror, som kan leda till skumning och en sänkning av pH-värdet, än vad termofil drift är (Carlsson & Uldal, Substrathandbok för biogasproduktion, 2009) (Avfall Svergie, 2019).

### 2.3.6 Termofil rötning

Termofil rötning sker i temperaturer mellan 50-55°C. Den högre temperaturen gör att rötningen går snabbare, har en högre nedbrytningsgrad samt producerar mer metan än mesofil rötning. Den snabbare nedbrytningen gör att uppehållstiden i anläggningen är lägre än för mesofil rötning, vilket gör att termofila anläggningar går att bygga mindre än mesofila anläggningar som är byggda för att hantera samma mängd avfall (Schnürer & Jarvis, 2008). Att rötningen går snabbare medför även att andra reaktioner som sker till följd av rötningen sker snabbare under termofil rötning. Exempelvis bildningen av ammoniak som bromsar processen. Ammoniak står i jämvikt med ammonium som bildas under nedbrytningen, men till följd av ökade temperaturer och ett förhöjt pH värde blir det ett överskott av ammoniak (Avfall Svergie, 2019) (Schnürer & Jarvis, 2008).

Temperaturen är så pass hög att patogena organismer och sjukdomar avdödas under rötningen, och ingen förbehandling är nödvändig, men kräver att uppehållstiden i rötkammaren förlängs för full avdödning. Den höga temperaturen ligger nära den maximala temperaturen för vad många mikroorganismer som används klarar av, vilket gör den termofila rötningen känslig för variationer i temperatur, då en liten ökning i temperaturen kan resultera i att stora delar av mikroorganismerna dör (Schnürer & Jarvis, 2008) (Avfall Svergie, 2019). Den höga temperaturen leder inte bara till en lägre mångfald av mikroorganismer i reaktorn, utan även till att mer energi krävs för uppvärmningen av biogasanläggningen. Däremot får avfallet en lägre viskositet och behovet av omrörning i rötkammaren minskar (Avfall Svergie, 2019).

### 2.3.7 Övergång från mesofil- till termofil temperatur

Att mesofil rötning främst sker i temperaturerna 35–40 °C och termofil rötning på 50-55 °C, beror på att mikroorganismerna som används, mesofiler och termofiler, trivs bäst och därmed fungerar bäst i dessa temperaturer. Detta betyder inte att de endast fungerar i dessa spann, utan många termofiler är aktiva under mesofil rötning och vice versa. Det går även att bedriva rötning mellan spannen om det skulle önskas (Avfall Svergie, 2019).

Då det kommer mycket nya krav på att rena biologiskt avfall runt om i världen och termofil rötning generellt är bättre på att avdöda patogena bakterier, har intresset för att övergå från mesofil till termofil rötning ökat. Endast 9% av mikroorganismerna som är aktiva under mesofil rötning är termofiler. Då många av mesofiler inte överlever en ökning i temperatur, kommer en övergång från mesofil till termofil temperatur till en början leda till instabilitet i produktionen, innan stammen av termofiler har växt (Bouskova, Dohanýos, Schmidt, & Angelidaki, 2005).

I en studie användes två CSTR reaktorer med en total storlek på 4,5 L och 2,6 L arbetsvolym, för att testa vilken metod för övergång till termofil temperatur från mesofil temperatur som stabiliserar sig snabbast. Båda reaktorerna drevs på en mix av aktivt slam och primärslam och hölls stabilt på 37 °C i två månader innan studien påbörjades. Studien genomfördes genom att en av reaktorerna, reaktor A, höjde temperaturen stegvis till temperaturerna 42, 47, 51 och 55 °C, och ej höjde

temperaturen ytterligare förens processparametrarna var stabila på den föregående temperaturen, medan i reaktor B höjdes temperaturen till 55 °C direkt från 37 °C. Processparametrarna som togs hänsyn till var främst biogasproduktion i ml/dag samt VFA-innehåll (flyktiga fettsyror). Processen ansågs vara stabil då en variation under 10% i processparametrarna kunde hållas i en vecka (Bouskova, Dohanoyos, Schmidt, & Angelidaki, 2005).

Övergången i reaktor A började med en svag nedgång i biogasproduktion under övergången till 42 °C, följt av en kraftig nedgång under övergången till 47 °C, med en relativt lång återhämtningstid. Den stora nedgången beror på att många mesofiler avdödas av den höga temperaturen, samt att temperaturen är för låg för att många termofiler ska trivas. Övergången till 51 °C och 55 °C drabbas av en nedgång i biogasproduktion och metanbildning men återhämtar sig relativt snabbt. Totala omställningstiden för reaktor A var 70 dagar (Bouskova, Dohanoyos, Schmidt, & Angelidaki, 2005).

Reaktor B övergick från 37 °C till 55 °C i ett steg. Biogasproduktionen sjönk från 1420 ml/dag till 80 ml/dag där den stannade i 5 dagar innan det började återhämta sig. Processen ansågs stabil efter 28 dagar vilket ger slutsatsen att en direkt ökning i temperatur är mest effektiv med hänsyn till biogasproduktionen och metanbildningen (Bouskova, Dohanoyos, Schmidt, & Angelidaki, 2005).

## 2.4 Processparametrar

Rötningen som en process som utförs av levande organismer och påverkas av olika parametrar såsom pH, temperatur, substrathalt och mycket mera. Dessa parametrar bör övervakas för att de inte ska överskrida maximala gränsvärden, detta för att säkerställa att rötprocessen sker stabilt och effektivt (Al Seadi, o.a., 2008). Dessa parametrar kommer att diskuteras i avsnitten nedan.

### 2.4.1 pH

pH värdet kan definieras som ett mått på aktiviteten oxoniumjoner i vatten. pH är en huvudsaklig parameter vid biogasproduktionen och påverkas starkt av det partiella trycket, koldioxid samt halten av sura och alkaliska lösningar i vätskefasen (Al Seadi, o.a., 2008)

Som nämndes innan består biogasproduktionen av 4 olika centrala processer, hydrolys, fermentering, anaerob oxidation och biogasbildning, som innehåller ättiksyrabildning och metanbildning. I dessa skeden deltar olika bakterier med olika optimala pH områden där de trivs som bäst. I de första stegen, dvs hydrolys och fermentering, vill bakterierna hamna i en sur miljö med pH som varierar mellan 4,5–6,3. Dessa hydrolyserande och syrabildande bakterier klarar av att leva under neutrala förhållanden, dock som en konsekvens nedsätts deras aktivitet. Medan vid det sista steget där metanbildningen sker föredrar bakterierna att vara i neutrala förhållanden med pH värde mellan 6,7–7,5 (Ek, 2008)

Det är viktigt att försöka övervaka pH värdet under de olika processer där biogas produceras. När pH värdet sjunker under 6,5 resulterar produktionen av organiska syror i en ytterligare minskning av pH-värde till följd av aktiviteten hos de

hydrolytiska bakterierna och kan potentiellt leda till fullständigt eller delvis avbrott i fermenteringsprocessen. I praktiken upprätthålls pH-värdet inom det neutrala intervallet tack vare naturliga processer i fermentaren. För att säkerställa att den avbrytningen av processen inte sker finns det två buffertsystem. Den starka försurningen kan skapas genom koldioxid eller vätekarbonat buffertsystem. Vid reducerad pH tilläggs mer koldioxid i substratet och vid förhöjd pH bildas joniserad kolsyra tack vare den lösta karbondioxid molekyler. När en svag försurning inträffar undviks den med hjälp av ammoniak-ammonium buffertsystem. När pH sjunker bildas ammoniumjoner, däremot vid förhöjd pH bildas flera ammoniakmolekyler (Deublein & Steinhauser, 2008)

Det finns olika problem som är relaterad till pH ändringar när det gäller biogasproduktion. Både ovannämnda buffertsystem brukar ha ett normalt pH värde på ca 10. Dock kan de bli överbelastade på grund av olika utomstående faktorer såsom inflöde av försurat avloppsvatten, giftiga ämnen, temperaturminskning och hög volymbelastning i reaktorn. Den höga volymbelastningen kan ske genom tillsats av avloppsvatten, som medför ge risker som är förknippade med acetstssyrförgiftning, vilket i sin tur leder till olika konsekvenser som presenteras i Deublein & Steinhauser bok om Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction.

- De oladdade fettsyramolekyler ökar vilket ökar vätehalten i substratet och metanbildning
- Metanbildningen hämmas till följd av ökade oförsurade ämnen som sulfider
- Bromsning av reaktioner på grund av ammoniakförhöjning

När pH värdet sjunker och andelen koldioxid ökar i biogasen tyder detta på ett avbrott i fermenteringsprocessen. För att motverka denna försurning kan man utföra olika åtgärder som kan bidra till förebyggandet av den extrema försurningen. Exempel på dessa åtgärder som Deublein & Steinhauser nämner i sin bok om Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction är:

- Minskandet av den organiska belastningen genom att öka uppehållstiden i tanken.
- Förhindra försörjningen av substratet, på så sätt bryts syran ner av de metanogena bakterier.
- Öka substratets buffertkapacitet, utan att glömma att buffertkapaciteten påverkas av koldioxidborttagning
- Avlägsna syror
- Tillsats av utspätt vatten och neutraliserande ämnen såsom natriumkarbonat eller natriumhydroxid
- Att tömma och starta om fermentern. Användning av speciella kaustiska lösningar för att justera pH-värdet eller tillsats av rengörings- och desinfektionsmedel kan resultera att pH-värden överskrider 10 i biogasreaktorn, vilket i sin tur kan orsaka en icke-omvändbar förlust av bakteriernas aktivitet

## 2.4.2 Temperatur

Temperaturen kan klassas som en av de viktigaste faktorerna vid den anaeroba rötningen. I syrefria biogasprocesserna frigörs bara små mängder värme och för att de ingående mikroorganismerna ska ha en växande miljö samt för bildandet av biogas

krävs det att värme tillförs från en extern källa. En stor del av biogasanläggningarna brukar köra biogas produktionsprocessen vid antingen 37–42 °C (mesofil temperatur) eller vid 52–55 °C (termofil temperatur). Varför det finns olika temperaturvariationer beror på att mikroorganismerna växer som bäst inom dessa temperaturintervaller. Det visar sig genom rötning av energigrödor att möjligheten för en stabil process förekommer även i hela intervallet mellan 35 och 50 °C (Jarvis & Schnurer , 2009).

Utifrån den optimala temperaturen för de olika mikroorganismer delas processen i tre olika huvudgrupper. Psykrofiler har en optimal temperatur mellan 0–4 °C, mesofiler växer i temperaturintervall mellan 25–40 °C och till sist så föredrar termofilerna en temperatur som varierar mellan 50–60 °C. Substratet som drivs in i rötkammaren kan behövas värmas upp innan den körs in speciellt under vintern. Däremot så finns det antal anläggningar som hygieniserar substratet vid 70 °C före rötningen och i det speciella fallet behövs substratet kylas ner innan den läggs i rötkammaren. För både mesofila och termofila gäller att hålla temperaturen konstant eller med minimal ändring på  $\pm 0,5$  för att få ett effektivt resultat, men en variation på  $\pm 2-3$  °C kan accepteras om processen är stabil med avseende på andra parametrar såsom alkalinitet och pH. Från alla 4 processer som rötningen består av är det metanbildningen som är mest känslig för temperaturändringar (Jarvis & Schnurer , 2009).

Vilken process bör då väljas? Mesofil eller termofil rötning? Nedan kommer både processerna att analyseras utifrån fördelar och nackdelar med både processerna. Allmänt blir processen snabbare ju högre temperaturen är vilket gör att de mikroorganismerna arbetar effektivare och snabbare och därmed blir det mer material som bryts ner under relativt kort tid. Till följd blir behovet på en stor volym på rötkammaren inte längre nödvändig om samma process skulle ske mesofilt i stället (Jarvis & Schnurer , 2009). Att köra processen termofilt kan på grund av ökat löslighet med stigande temperatur höja aktiviteten av vissa organiska föreningar. På grund av höjd tillgänglighet minskar också viskositeten hos materialen vilket underlättar omrörningen i kammaren. En av de viktigaste fördelar med termofil rötning är när processen körs vid ca 55 °C, då sker det en naturlig hygienisering, med andra ord en effektivt avdödande av patogener och alla andra sjukdomsframkallande bakterier såsom salmonella äger rum (Jarvis & Schnurer , 2009). För att uppnå denna nivå av patogenernas inaktivering krävs att substratet blir kvar längre inne i rötkammaren och detta sker genom minskandet av matningsfrekvensen (Persson & Wiquist, 2011)

Att köra rötningen termofilt har också sina nackdelar. I och med att vid termofil rötning så drivs processen vid högre temperaturer så ökar behovet att värma upp både rötkammaren och substratet, dvs energibehovet ökar (Avfall Svergie, 2019). Det finns också risker relaterande till instabilitet och störningar vid termofila förhållanden, detta på grund av liggandet av optimala temperaturen nära maximal temperaturen där mikroorganismerna inaktiveras. Som tidigare nämnt är det lämpligt att hålla temperaturen konstant under processen, när temperaturen höjs och överskrider den tillåtna gränsen sker en störning i rötningens process. Däremot är sänkningen av temperaturen inte lika avgörande men det skapar ett ojämnt förhållande mellan fermentering och metanbildningen. En till orsak till störningen är att vid termofil rötningen ökar nedbrytningshastigheten vilket gör att de giftiga och sjukframkallande materialen reagerar snabbare. Den mesofila rötningen har ett stort deltagande av mikroorganismer jämfört med den termofila rötningen, detta gör att vid mesofil

rötningen är processen stabilare och det är lättare att göra ändringar (Jarvis & Schnurer , 2009).

Andra problem med termofil rötning är hämningen som ammoniak orsakar. Vid proteinernas nedbrytning av proteiner bildas ammonium och står i jämvikt med ammoniak, jämvikten av ammoniak förskjuts och både pH och temperaturen ökar och processen störs och blir instabil. Dock när rötningen sker mesofilt frigörs mer ammonium än ammoniak. Ammonium har mindre skadepåverkan på mikroorganismerna än ammoniak. Dessutom om rötningen sker under mesofila förhållanden blir den inte lika känslig för de frigjorda långa fettsyror jämfört med termofila förhållanden (Persson & Wiqvist, 2011).

I tabellen nedan visas hur olika egenskaper agerar vid antingen mesofil eller termofil rötning (Schnurer & Jarvis, 2018).

*Tabell 1 visar agerandet hos olika egenskaper vid mesofil och termofil rötning (Schnurer & Jarvis, 2018)*

Egenskap	Mesofil rötning	Termofil rötning
Nedbrytningshastighet	Lägre	Högre
Avdödning av patogener	Lägre	Högre
Viskositet	Högre	Lägre
Biogasproduktion	Lägre	Högre
Risk för instabilitet	Lägre	Högre
Risk för ammoniakhämning	Lägre	Högre
Mikrobiell mångfald	Högre	Lägre

### 2.4.3 TS och VS

TS eller torrsubstanshalten är det kvarvarande ämnet har avlägsnats från allt vatten i en ugn med temperaturen 105 °C. Material som har en låg TS-halt, dvs mindre än 10 % kan användas för förbättringen av de mekaniska egenskaperna genom att späda det tjocka substratet. Material med högre torrsubstanshalt (> 10–15 %) fungerar vanligtvis inte i omrörningstankar eller mottagningssystemet förrän de späds ut (Carlsson & Uldal, Substrathandbok för biogasproduktion, 2009).

VS eller Volatile Solids kallas på svenska för glödförlsut. VS är en materialparameter som anger det förbränningsbara substansinnehållet vid 550 °C. Både TS och VS är användbara för att beräkna det organiska innehållet hos substratet. Allmänt betyder en låg VS-halt i röt-kammaren ett lågt gasutbyte per volymenhet vilket innebär att röt-kammarvolymen inte utnyttjas effektivt. Dock ger hög VS-halt en hög effektivitet på gasutbytet då det bara är en liten organisk del av TS som bryts ned i röt-kammaren och stödjer biogasproduktionen (Carlsson & Uldal, Substrathandbok för biogasproduktion, 2009).

### 2.4.4 Uppehållstid

Med uppehållstiden menas den tid som behövs för att ersätta hela materialvolymen i en röt-kammare. Man brukar dela in uppehållstiden i två olika begrepp, HRT och SRT. HRT står för hydraulic retention time och i biogasprocesser varierar HRT vanligtvis

mellan 15 och 40 dagar men dess längd kan variera beroende på substratets karaktär och de olika processparametrarna. HRT är uppehållstiden hos den organiska vätskefasen i reaktorn. I UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) var mikroorganismerna behålls genom fästning av ett bäramaterial kan HRT till och med vara kortare än 24 timmar. Den långa fästningstiden skapar en förbättrad anpassningsmiljö för mikroorganismerna mot olika ämnen såsom sulfider och ammoniak (Schnurer & Jarvis, 2018).

SRT (Solids retention time) är däremot uppehållstiden för det partikulära materialet. I stora procent av fallen är HRT och SRT lika långa, dock kan ibland SRT vara förlängd i jämförelse med HRT. Detta inträffar till exempel vid rötning av industriella avloppsslam, där en del av rötresten, förtjockat slam inklusive biomassan återförs tillbaka i rötkammaren. Vid avloppsslamrötning har det ingående materialet en hög mängd vatten och det återförda materialet möjliggör en längre tid för mikroorganismerna till nedbrytandet av de ingående organiska materialen (Schnurer & Jarvis, 2018).

De främsta faktorerna som avgör längden på uppehållstiden är rötningens temperatur och substratets sammansättning. Ett exempel där HRT blir relativt kort är vid processer där hydrolys är inte nödvändig som till exempel fallet vid industriellt avloppsvatten som bara består av lösligt organiskt material där mikroorganismerna klarar att bryta ned på kort tid. Dock kan det vara lämpligt att mikroorganismerna får en längre tid för att attackera och bryta ner de växtmaterialen som är rika med cellulosa. I den processen är det inte metanbildningen som klassas som den hastighetsbegränsande steget utan hydrolysen (Jarvis & Schnurer, 2009).

På grund av ökningen av den mikrobiologiska aktiviteten till följd av höjd temperatur kan termofila processer köras vid lägre uppehållstid i jämförelse med mesofila processer. En vanlig uppehållstid för en mesofil process är ca 15 dygn i rötkammaren, medan det kan fungera med 12 dygn för en termofil process. De flesta biogasanläggningar i Sverige kör processerna vid längre uppehållstider mellan 25–40 dygn, kortare eller längre uppehållstider kan förekomma (Jarvis & Schnurer, 2009).

## **2.4.5 Substrat**

Substrat kan definieras som materialet som pumpas in i rötkammaren under biogasprocessen. Typ av substrat och dess kvalitet påverkar hur effektiv biogasprocessen blir i form av den slutproducerande biogasen. En annan faktor som förbättrar hur biogasen rötas samt hur mycket energi utnyttjas är väljandet av rätt material (Jarvis & Schnurer, 2009).

Det finns olika organiska material som kan användas som substrat, men de mest populära som används idag i biogasanläggningar är avloppsslam, matavfall, gödsel och industriellt avfall. Andra material som rötas i samröttningsanläggningar är fett från fettavskiljare, läkemedelsindustrin och mycket annat (Jarvis & Schnurer, 2009).

Det finns olika faktorer som påverkar vilket substrat som används i rötkammaren. Exempel på dessa faktorer är processparametrarna som används i processen såsom pH, temperatur och uppehållstid. En annan avgörande faktor är närvarandet av giftiga komponenter som stör röttningsprocessen. För att säkerställa en robust produktion av

biogas är substratets sammanställning av stor betydelse. Substratets innehåll är viktigt då den måste bestå av olika energikällor såsom vitaminer som ansvarar för att aktivera enzymsystemet hos mikroorganismerna. C/N-kvoten är en kvot som visar förhållandet mellan kol och kväve. Det är att den kvoten har ett balanserat värde som inte är alldeles för låg eller för hög, är kvoten för låg där halten kväve överskrider halten kol kan processen störas på grund av ammoniakhämmning. Är kvoten däremot för hög och halten kol överskrider halten kväve, kan det uppstå kvävebrist för de deltagande bakterier i processen. Ett vanligt värde på C/N-kvoten i biogasprocess är mellan 10–30. Utspädningen av substratet bör också tas hänsyn till under rötningsprocessen, om substratet är vattenrik i jämförelse med organiskt substrathalt uppstår en risk för mikroorganismernas urtvättning ur processen (Jarvis & Schnurer , 2009).

#### **2.4.5.1 Matavfall**

Generellt är matavfall ett lämpligt material för rötning på grund av dess innehåll av olika näringsämnen såsom kolhydrater, fett och proteiner. Det är viktigt med en varierad blandning av näringsämnen i matavfallet. Skulle substratet innehålla för mycket proteiner i relation till andra ämnen kan problem relaterade till ammoniakinhibering uppstå, är fett eller kolhydratskoncentrationen hög i relation till proteinhalten kan skumningsproblem och problem relaterade till ackumulering av flyktiga fettsyror uppstå (Avfall Svergie, 2019).

#### **2.4.5.2 Gödsel**

Olika djurs gödsel har också en variation i näringsämnen och därför klassas det som ett lämpligt substrat i biogasprocesser. Beroende på TS-halt, indelas gödsel både i en fast fas och en flytande fas. Den flytande gödsel har en lägre TS halt, mer kväve och mindre kolhalt i jämförelse med den fasta gödsel. Dessa egenskaper gör den flytande gödsel mer passande för rötningsprocessen än den fasta gödseln (Jarvis & Schnurer , 2009).

#### **2.4.5.3 Slakteriavfall**

Avfall från slakteri har också en god sammanställning av näringsämnen med höga fett- och proteinhalter och klassas som energiriksubstrat som har stora möjligheter när det kommer till biogasproduktion. Substratet från slakteriavfall har en hög C/N-kvot men när den rötas i samrötningsanläggningar kan den bli möjligt att använda i processen utan att orsaka allvarliga problem (Jarvis & Schnurer , 2009).

#### **2.4.5.4 Avloppsslam**

Avloppsslam klassas som den allra största källan för biogasproduktion. Det finns många avloppsreningsverk i Sverige som producerar biogas utifrån det slam som återstår efter reningen av avloppsvatten. Avloppsslammet kan innehålla olika kemiska ämnen såsom metaller och andra föroreningar som kan hämma och störa processen, men genom olika förbehandlings blir slammet lättare att bryta ner och potentialen för att producera biogas av hög kvalitet blir bättre (Jarvis & Schnurer , 2009).

### **2.4.6 Utrötningsgrad**

Utrötningsgrad är en enhetslös parameter som anger den procentuella halten av det nedbrutna organiskt material och som under en bestämd tid har omvandlats till biogas (Jarvis & Schnurer , 2009).

I allmänhet så ökar möjligheterna för metanproduktion vid efterlagringen ju lägre utröttningsgraden är. Eftersom metan är en växthusgas som inte bör släppas ut i atmosfären så är det viktigt att efterlagringsprocess sker i slutna behållare i syfte att förhindra läckage av metangasen till utemiljön. Utröttningsgraden bör vanligtvis ligga mellan 50–70 % i en stabil biogasprocess, men beroende på substratets karaktär så kan de hamna i intervallet mellan 30–90 % (Schnurer & Jarvis, 2018).

Det finns flera anledningar till att man ska sikta efter en hög utröttningsgrad. För de första så blir biogasproduktionen högre med ökad utröttningsgrad, för de andra så hjälper en hög utröttningsgrad att upprätthålla en viss stabiliseringsnivå av röttningsprocessen. Dessutom så är en hög utröttningsgrad en viktig faktor för att behandla olika avloppsvatten (Schnurer & Jarvis, 2018).

## 2.5 Driftsproblem

### 2.5.1 Lukt

Lukt är ett problem som är förekommande vid rötning av biogas. Varför luktproblem uppstår kan ha olika anledningar beroende på vilket typ av substrat som rötas och vilken typ av anläggning som används. I biogasanläggningarna kan det finnas olika orsaker till lukttörningar. Enligt tidigare gjorda och utförda studiebesök hos avloppsanläggningar kan lukten bero på att det finns lättomsättbara föroreningar som bryts ner till flyktiga och illaluktande ämnen på kort tid under processens olika skeden. En annan orsak är att lukten orsakas av mottagandet av avfall vid behandlingsstationerna. En till anledning kan vara den korta behandlingstiden och att den dåliga lukts källa är icke färdigkomposterat material (Berg, 2001).

När det kommer till själva rötningen är processen anaerob, dvs processen äger rum i en syrefri miljö. Rötningen sker i ett slutet rum och luktobehag kan förekomma från till exempel avvattning av rötresten. Transport och spridning kan också skapa dåliga lukter men också vissa bakterier kan bidra till den oangenäma lukten genom producerandet av illaluktande ämnen (Berg, 2001).

Kemiska ämnen som förekommer vid röttningsprocessen har också en avgörande roll i den dåliga lukten. Exempel på dessa gaser är svavelväte, ammoniak och dikväveoxid (Deublein & Steinhauser, 2008)

- $H_2S$  (Svavelväte): Vätesulfid är en oundviklig komponent i biogasen, trots att den närvarar i små halter. Dess lukt som beskrivs som ruttet ägg, och om koncentrationen av gasen blir för hög kan den vara giftig (Deublein & Steinhauser, 2008).
- $NH_3$  (Ammoniak): Gasen är känd för dess starka lukt. Organiska ämnens sönderdelning resulterar i kväve av ammoniumform i själva substratet. Den uppkommer på grund av pH ökningen under syrornas nedbrytning och temperaturförhöjningen i lagringsbehållaren som orsakas av den höga processtemperaturen i reaktorn. På så sätt frigörs höga koncentrationer flyktig ammoniak (Deublein & Steinhauser, 2008).

- $N_2O$  (Dikväveoxid): Dikväveoxid kallas också för lustgas och luktar svagt sött. Dess kända påverkningar är skratt, förgiftning samt hallucinationer. Dikväveoxid utvecklas vid ammoniumoxidation under aeroba förhållanden. En annan orsak till dess uppkomst i höga halter är när nitrit och nitrat bryts ner vid anaeroba förhållanden (Deublein & Steinhäuser, 2008).

### 2.5.1.1 Luktreducerade tekniker och deras effektivitet enligt tidigare studier

- Biofilter: Den klassas som en av de allra vanligaste och billigaste metoderna för att reducera lukt från biogasanläggningarna. Hur effektivt denna metod är beror på hur man sköter upp de faktorerna som behövs för att biofiltret ska funka som den ska. För att uppnå detta behövs den behandlade luften vara uppfuktad och särskilt på vinter på grund av den låga relativa luftfuktigheten, dessutom behövs ett utbyte av bärarmaterialet vid jämna intervaller och installationen av en skubbreaktor är också meriterande för att kunna fukta upp luften före passagen genom filtret (Berg, 2001).
- Skrubberanläggning: Den används i några anläggningar för att dämpa den dåliga lukten från processer och mottagningshallar. Speciella plastmaterial används för att skapa en större kontaktyta mellan den behandlade luften och det cirkulerande vattnet. När bioskrubbern är den enda använda luktreducerande metoden i en anläggning är den inte tillräcklig, detta kan bero på att den plasttyp som används är inte kompatibel med etableringen av en mikrobiologisk aktivitet. Därför rekommenderas att kombinera denna metod med andra metoder för att säkerställa effektiviteten (Berg, 2001).
- Katalytisk avbränning: Det är en ovanlig metod och erfarenheten bakom dess effektivitet att fungera som en metod för att minska illaluktande ämnen är ganska begränsad. En nackdel med denna metod är dess höga investeringskostnad, inte bara det utan att man behöver en kompletterande energirik gas till de ämnen som ska oxideras (Berg, 2001).
- Övriga metoder: Övriga metoder är till exempel membrankomposteringsanläggningar, ventilationsluft från upplagringsbassänger samt jonisator (Berg, 2001).

### 2.5.2 Skumning

Skum kan definieras som ett tjockt, mörkbrunt lager av gas-vätskeemulsion som består av mer än 90 % gas och bildas ofta i biogasreaktor. Det finns flera olika orsaker till skumning, men den främsta orsaken till skumning i avloppsanläggningar är den organiska överbelastningen och ättiksyraackumulering. En hög halt av lipider och proteiner i substratet kan också bidra till skumning (Kougias, Thong, Angelidaki, Kristensen, & Boe, 2014). Andra orsaker till skumning är dålig omblandning och omrörning samt en hög koncentration av dåligt nedbrytbara material i substraten (Schnurer & Jarvis, 2018).

Skumning kan orsaka flera konsekvenser som kan negativt påverka rötningsprocessen. Driftsproblem relaterade till de inkapslade partiklarna i skummet

kan förekomma, vilket i sin tur leder tillpumpkollaps. En dålig eller otillräcklig omblandning kan leda till skapandet av så kallade döda zoner och minskningen av reaktorns totala volym. Dessutom så minskas biogasproduktionen till följd av skumning under korta eller lite längre perioder. Skumning kan också orsaka ekonomiska konsekvenser då det kan komma inkomstförluster, övertidsutbetalning för personal samt reparations och underhållskostnader. Miljömässiga problem kan också orsakas på grund av skumning i form av översvämningar av rötchammaren (Kougias, Thong, Angelidaki, Kristensen, & Boe, 2014).

Åtgärdsmetoder till att motverka skumningsproblem kan vara genom tillsättningen av skumdämpnings medel. Om problemet är stort så kan det vara bra att lösa problemet från källan. Till exempel minskningen av den organiska belastningen, effektivare blandning eller att minska mängden lignin i substratet är alla skumreducerande tekniker som kan tillämpas beroende på orsaken till skumproblemet (Schnurer & Jarvis, 2018).

## **3 Metod:**

### **3.1 Litteraturstudier**

Litteraturstudien utgör en avgörande del för den inledda bakgrundsdel där information, kunskap och tidigare forskningar om det berörda ämnet inhämtas och sammanställs. Relevanta sökord såsom biogas, rötning, mesofil, termofil och temperatur har samlats för att söka efter betydelsefulla källor för ämnet från till exempel akademiska artiklar, vetenskapliga böcker, rapporter. Databaser såsom Google Scholar och Scopus har använts för att plotta in sökorden och hitta tidigare publicerade vetenskapliga Review artiklar.

Efter insamling av källorna granskas och utvärderas dem, med syfte att bedöma deras trovärdighet och relevans för rapporten. Med hjälp av de samlade information kan författarna formulera hypoteser och utveckla deras kunskap och teori om ämnet ännu mer.

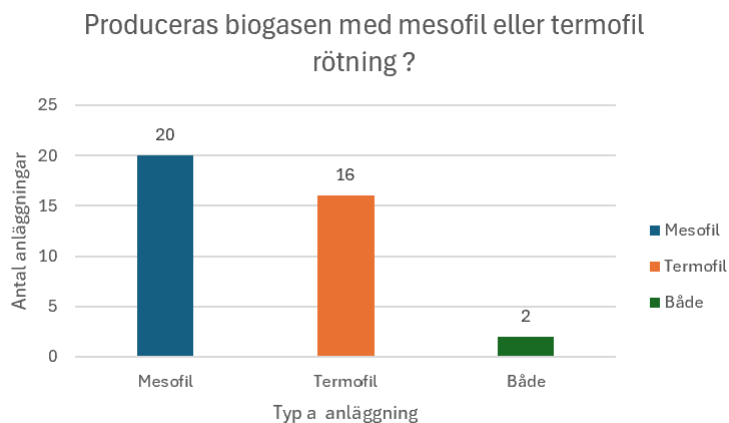
### **3.2 Enkätundersökning**

Den huvudsakliga metoden för att besvara frågeställningarna är att genomföra en enkätstudie. För att få en översiktlig bild över vilka frågor som är relevanta och bör vara med i enkäten tog hjälp från handledaren Oskar Modin på Chalmers och Ola Fredriksson på Envidan. Lämpliga frågor som rör grunddata, uppvärmning & energi samt drift har valts med olika typer av svarsalternativ såsom flervalsalternativ och fritextsvar för att bäst kunna infånga den informationen som behövs för att besvara frågeställningarna. Enkäten utfördes via Microsoft Formulär som är ett enkelt verktyg och är multifunktionell.

Målgruppen som enkäten har skickats till är 61 gårdsanläggningar, samrötningsanläggningar och avloppsreningsverk. Enkäten har skickats via epost till olika chefer, processingenjörer och driftsexperter efter att de har blivit förstahandskontaktade där de fick en kort presentation om ämnet och syftet med enkäten.

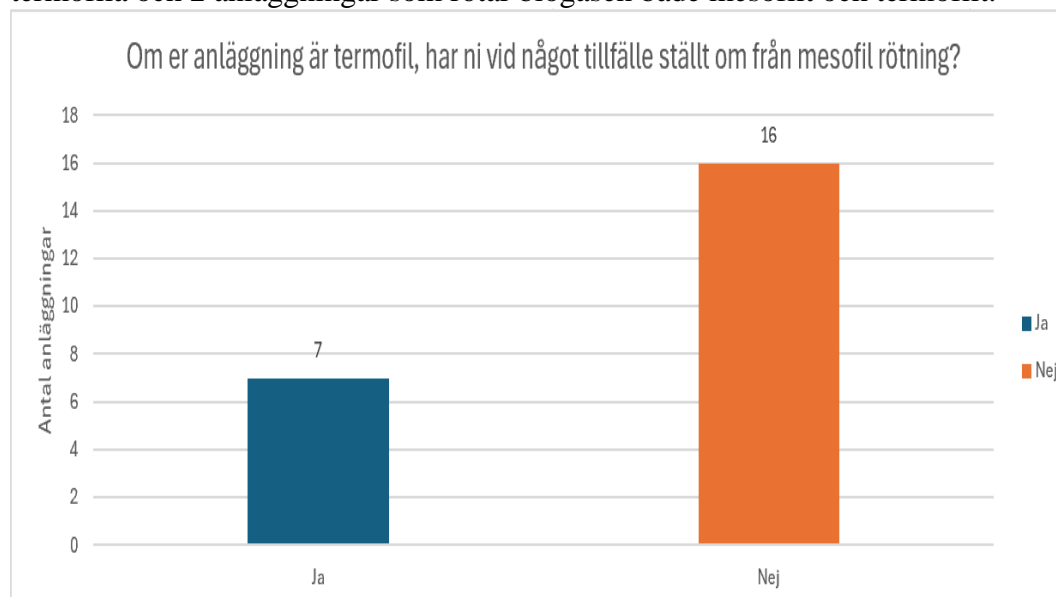
## 4 Resultat & Diskussion

### 4.1 Driftserfarenheter



Figur 2: Ett stapeldiagram som visar antalet anläggningar som producerar biogasen mesofilt, termofilt eller med båda typer.

Totalt så besvarades enkäten av 38 anläggningar. Av dessa 38 är det 20 mesofila, 16 termofila och 2 anläggningar som rötar biogasen både mesofilt och termofilt.



Figur 3: Ett stapeldiagram som illustrerar omställningen av mesofila anläggningar till termofila anläggningar

Figur 3 visar att av de 16 termofila anläggningar så är det endast 7 av dem som har ställt om från mesofil rötning till termofil rötning.

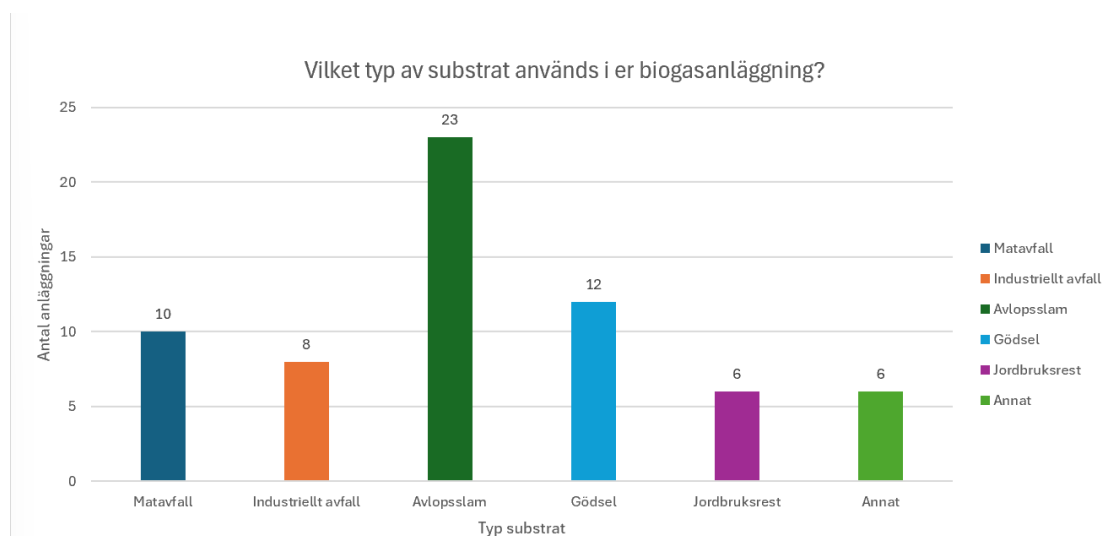
Tabell 2 visar ett medel rötningstemperatur med dess variation hos de olika anläggningarna

Typ av anläggning	Medeltemperatur [°C]	Standardavvikelse [°C]
Mesofil 1	33,5	±1
Mesofil 2	37	±1

Mesofil 3	37,4	±2
Mesofil 4	37	±2
Mesofil 5	41	±3
Mesofil 6	38,5	±1
Mesofil 7	36,5	±0,5
Mesofil 8	44	±2,5
Mesofil 9	38	±1
Mesofil 10	36	±2
Mesofil 11	37	±1
Mesofil 12	40	±2
Mesofil 13	37,5	±2,9
Mesofil 14	37	±3
Mesofil 15	37	±2
Mesofil 16	37	±0,5
Mesofil 17	32,5	±0,5
Mesofil 17	37	±2
Mesofil 18	-	-
Mesofil 19	39,5	±1
Mesofil 20	35	±2
Termofil 1	52	±0,5
Termofil 2	50	±1
Termofil 3	53	±1
Termofil 4	54	±1,25
Termofil 5	49,5	±0,5
Termofil 6	56	±2
Termofil 7	52	±0,5
Termofil 8	52,5	±2,5
Termofil 9	50	±2
Termofil 10	52,5	±1
Termofil 11	55	±1
Termofil 12	53,7	±0,2
Termofil 13	49	±3
Termofil 14	55	±3
Termofil 15	53,5	±1,5
Termofil 16	55	±1
Både	40 mesofilt och 55 termofilt	0
Både	37 mesofilt och 55 termofilt	0

Tabellen illustrerar ett medel rötningstemperatur hos de biogasanläggningarna med standardavvikelsen på temperaturen. Rötningstemperaturens medelvärde hos de mesofila anläggningar var 37,44 °C medan för de termofila anläggningarna hamnade medelvärdet på 52,67 °C, och som nämndes innan brukar biogasanläggningarna köra produktionsprocessen vid antingen 37–42 °C (mesofil temperatur) eller vid 52–55 °C (termofil temperatur) vilket stämde med resultatet. För de mesofila och termofila anläggningarna hamnade den varierade standardavvikelsen på medeltemperaturen mellan 0,5–3 °C, medan för de biogasanläggningar som är både mesofila och termofila var variationen på rötningstemperaturen lika med 0.

Enligt teorin är temperaturerna 37°C respektive 55°C för mesofil och termofila anläggningar, de mest optimala för att utföra rötningsprocessen. Enligt vår undersökning är medeltemperaturerna 37,5°C och 52,9°C, vilket ligger nära de optimala temperaturerna. Däremot var majoriteten av anläggningarnas standardavvikelse i temperatur mellan 1-3°C där det optimala standardavvikelsen bör ligga mellan ± 0-0,5°C. Enbart 24% av anläggningarna låg i den optimala spannet för avvikelser som är önskvärd för en stabil rötningsprocess. Det gör att 76% av anläggningarna är i behov av att andra parametrar som påverkar rötningsprocessen, såsom pH-värde och alkalinitet mm. hålls stabilt till en stor grad för att säkerställa en stadig biogasproduktion.



Figur 4: Ett stapeldiagram som visar hur många anläggningar som använder respektive substrattyp

Som det visas i figuren ovan dominerar avloppsslam som substrattyp i 23 anläggningar. Därefter kommer gödsel, matavfall, industriellt avfall samt jordbruksrest och andra typer substrat i respektive ordning.

Tabell 3 visar uppehållstiden hos de olika biogasanläggningar

Typ av anläggning	Uppehållstid [dagar]
Mesofil 1	30
Mesofil 2	17
Mesofil 3	22
Mesofil 4	25
Mesofil 5	28
Mesofil 6	30–35
Mesofil 7	24
Mesofil 8	54
Mesofil 9	25
Mesofil 10	12
Mesofil 11	40
Mesofil 12	50
Mesofil 13	42
Mesofil 14	28

Mesofil 15	15–25
Mesofil 16	19
Mesofil 17	-
Mesofil 18	21
Mesofil 19	27
Mesofil 20	30
Termofil 1	21
Termofil 2	25
Termofil 3	28
Termofil 4	28
Termofil 5	18
Termofil 6	25
Termofil 7	30–40
Termofil 8	14
Termofil 9	10
Termofil 10	27–28
Termofil 11	5
Termofil 12	25
Termofil 13	18–21
Termofil 14	16
Termofil 15	16
Termofil 16	17
Både	15
Både	26

För de mesofila anläggningarna varierade uppehållstiden mellan 12–54 dagar där 12 anläggningar ligger nära det intervallet mellan 15–40 dagar. Å andra sidan varierade uppehållstiden mellan 5–40 dagar för de termofila anläggningarna. Ett medelvärde på uppehållstiden hos de mesofila anläggningar har beräknats till 29 dagar och 21 dagar för de termofila.

Teorin säger att den högre temperaturen för termofila anläggningar gör att uppehållstiden generellt sett är lägre än vad mesofila anläggningar klarar av. Detta stämmer överens med vårt resultat, där medelvärdet av uppehållstiden för de termofila anläggningarna låg på 21 dygn medan för de mesofila så låg det på 29 dygn. En snabbare rötningsprocess resulterar i större mängd producerad biogas vilket stämmer med tabell 4 som visar den årliga biogasproduktion och där medelvärdet för årlig produktion per volym blev högre för de termofila anläggningarna. På grund av ökningen av den mikrobiologiska aktiviteten till följd av höjd temperatur kan termofila processer köras vid lägre uppehållstid i jämförelse med mesofila processer, detta förklarar varför de termofila anläggningar hade kortare uppehållstid än de mesofila.

*Tabell 4 visar volymen på anläggningen/rötkammaren samt det årliga biogasproduktion hos de olika biogasanläggningarna*

Typ av anläggning	Sammanlagd volym [m <sup>3</sup> ]	Årlig biogasproduktion [GWh/år]	Årlig produktion per volym [GWh/år/m <sup>3</sup> ]
-------------------	------------------------------------	---------------------------------	---

Mesofil 1	2000	5,24	0,0026
Mesofil 2	3300	12,36	0,0037
Mesofil 3	1250	3,31	0,0026
Mesofil 4	2100	5,87	0,0028
Mesofil 5	<b>15 000</b>	36	0,0024
Mesofil 6	<b>19 000</b>	60	0,0032
Mesofil 7	1000	0,385	0,0004
Mesofil 8	<b>7000</b>	19,5	0,0028
Mesofil 9	500	2,91	0,0058
Mesofil 10	2000	2,1	0,0011
Mesofil 11	1200	3,02	0,0025
Mesofil 12	<b>11 300</b>	50,02	0,0044
Mesofil 13	<b>11 000</b>	23	0,0021
Mesofil 14	<b>12 000</b>	80	0,0067
Mesofil 15	1050	3,61	0,0034
Mesofil 16	2300	4,42	0,0019
Mesofil 17	450	1,16	0,0026
Mesofil 18	350	1,16	0,0033
Mesofil 19	550	0,94	0,0017
Mesofil 20	1000	-	-
Termofil 1	3000	12	0,0039
Termofil 2	1200	3,02	0,0035
Termofil 3	<b>4200</b>	15	0,0036
Termofil 4	<b>9000</b>	28	0,0031
Termofil 5	522	2,87	0,0055
Termofil 6	6400	23,27	0,0036
Termofil 7	<b>8600</b>	41	0,0048
Termofil 8	400	1,7	0,0043
Termofil 9	1700	9,1	0,0054
Termofil 10	4800	15	0,0031
Termofil 11	12 400	-	
Termofil 12	2300	46,86	0,0204
Termofil 13	2077	6,33	0,0030
Termofil 14	3300	8,73	0,0036
Termofil 15	250	1,36	0,0054
Termofil 16	1700	5,99	0,0035
Både	1500	1,52	0,0010
Både	<b>5800</b>	29,09	0,0050

Tabellen ovan visar att ju större volym som anläggningen/rötkammaren har desto större är kapaciteten att producera mer biogas. De fetmarkerade värden står för anläggningar som har gödsel eller matavfall som substrattyp och dessa anläggningar har mycket större volym jämfört med anläggningar som har andra substrattyper vilket gör att på grund av den större volymen produceras större mängder biogas. Dock visade det sig att medelvärdet för mängden producerad biogas per volym var 0,003 GWh/år/m<sup>3</sup> samt 0,005 GWh/år/m<sup>3</sup> för respektive mesofila och termofila anläggningar. De mesofila anläggningar hade större medelvolym men trots detta hade de termofila anläggningar större potential att producera biogas. Denna avvikelse kan orsakas på grund av att olika anläggningar besvarade frågan om volymstorlek på olika

sätt, vissa tolkade frågan som storleken på anläggningsvolym medan andra svarade om volymen på endast rötkammarna.

*Tabell 5 visar genomsnittlig substrat-belastning till anläggningen, utgående rötrest från anläggningen samt beräknad procentuellt TS uttröttningsgrad*

Typ av anläggning	Genomsnittlig substrat-belastning till anläggningen [kgTS/dag]	Utgående rötresten från anläggningen [kgTS/dag]	Utröttningsgrad-TS [ %]
Mesofil 1	90	70	22,22
Mesofil 2	7,6	4,2	44,74
Mesofil 4	3798	2135	43,79
Mesofil 7	1750	1050	40
Mesofil 11	2250	1500	33,33
Mesofil 14	350	150	57,14
Mesofil 16	4502	2636	41,45
Termofil 1	7250	4000	44,83
Termofil 3	18 000	12 000	33,33
Termofil 4	30 000	12 500	58,33
Termofil 6	16 000	8756	45,28
Termofil 11	6500	3700	43,08
Termofil 13	4500	3850	14,44
Termofil 16	4000	2500	37,50
Både 1	8700	5600	35,63
Både 2	7200	4613	35,93

Dessvärre kunde vi inte utnyttja värden från alla anläggningar då vissa anläggningar inte beräknar substrat-belastning eller utgående rötrest i deras anläggningar. Datan sammanställdes och TS-utröttningsgraden har beräknats utifrån 7 mesofila, 7 termofila och 2 anläggningar som kör både mesofil och termofilrötning. Den ekvationen som användes för att beräkna TS-utröttningsgraden visas nedan.

$$\frac{\text{Substrat belastning}(in) - \text{Rötrest}(ut)}{\text{Substratbelastning}(in)} * 100 [\%] \text{ (Jarvis \& Schnurer , 2009).}$$

Ett medelvärde på TS utröttningsgrad var 40,38 % för de mesofila anläggningar och 39,54% för de termofila vilket inte visar en stor skillnad.

När det kommer till hur mycket substrat man kan belasta anläggningarna med, visade jämförelsen att termofila anläggningar generellt hade större kapacitet än vad mesofila anläggningar har. Detta resultat tar dock ingen hänsyn till vilket substrat som används, eller volymen på anläggningen, och därför kan den högre kapaciteten för de termofila anläggningarna inte direkt kopplas till den högre temperaturen.

Tabell 6 visar genomsnittlig substrat-belastning till anläggningen, utgående rötrest från anläggningen, beräknad procentuellt TS utrottningsgrad, normal VS halten som går till rötammaren i procent av TS, normala VS halten som går utifrån rötammaren i procent av TS samt beräknad VS-utrottningsrad

Typ av anläggning	Normala VS halten som går till rötammaren i procent av TS[%]	normala VS halten som går utifrån rötammaren i procent av TS [%]	Genomsnittlig substrat-belastning till anläggningen [kgTS/dag]	Utgående rötrest från anläggningen [kgTS/dag]	Utröttningsgrad-VS [%]
Mesofil 1	3,3	2,6	90	70	38,72
Mesofil 2	3,83	2,14	7,6	4,2	69,12
Mesofil 4	79	62	3798	2135	55,88
Mesofil 7	70	56	1750	1050	52
Mesofil 14	10,4	10,4	350	150	57,14
Termofil 6	74	61	16 000	8756	54,89
Termofil 11	75	60	6500	3700	54,46
Termofil 16	80	80	4000	2500	37,50
Både 1	73,4	62	8700	5600	45,63
Både 2	70	55	7200	1432	84,37

Här blev det också lite brist på information där bara 5 anläggningar av varje typ kunde ge den informationen som behövs för att beräkna Vs-utrottningsgraden. Den ekvationen som användes för att beräkna TS- utrottningsgraden visas nedan.

$$\frac{VS (in) * Substratbelastning - VS (ut) * Rötrest}{VS (in) * Substratbelastning} * 100 \text{ [%]} \text{ (Jarvis \& Schnurer , 2009).}$$

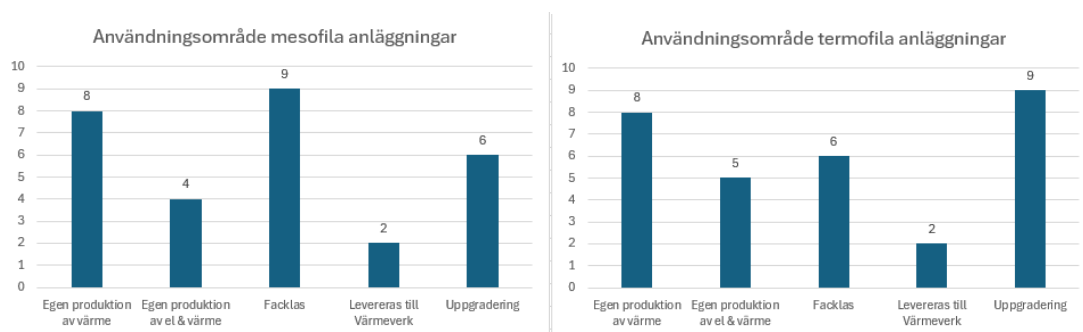
Där  $VS_{in}$  står för den normala VS halten som går till rötammaren i procent av TS och  $VS_{ut}$  står för den normala VS halten som går utifrån rötammaren i procent av TS. Ett medelvärde på VS utrottningsgrad var 54,58 % för de mesofila anläggningar och 55,37 % för de termofila vilket inte visar en märkbar skillnad.

Tabell 7 visar median och medelvärde på normal metanhalt i biogasen hos de olika anläggningarna

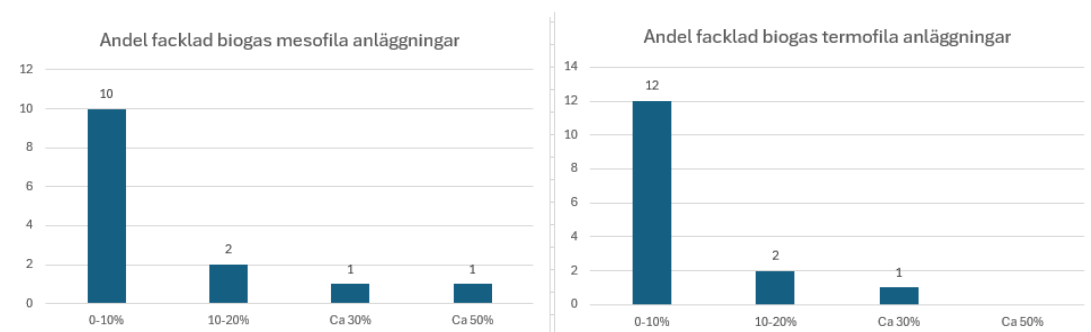
	Normal metanhalt i biogasen [%]
Medelvärde alla anläggningar	62,45%
Median alla anläggningar	62,5%
Medelvärde termofila anläggningar	61,91%
Median termofila anläggningar	62,25%
Medelvärde mesofila anläggningar	63,17%
Median mesofila anläggningar	63%

Tabellen ovan visar att metanhalten i biogasen ligger inom det vanliga intervallet (60–70 %) hos både mesofila och termofila anläggningar. Det fanns ingen stor signifikant

skillnad i metanhalten mellan de mesofila och termofila anläggningarna, vilket påvisar att rötningstemperaturen inte har en påverkan på biogasens renhet.

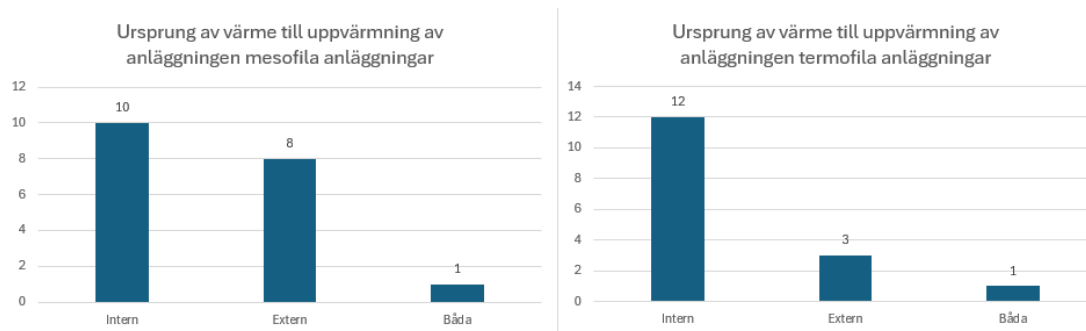


Figur 5: Ett Stapeldiagram som beskriver användningsområdena för biogasen.

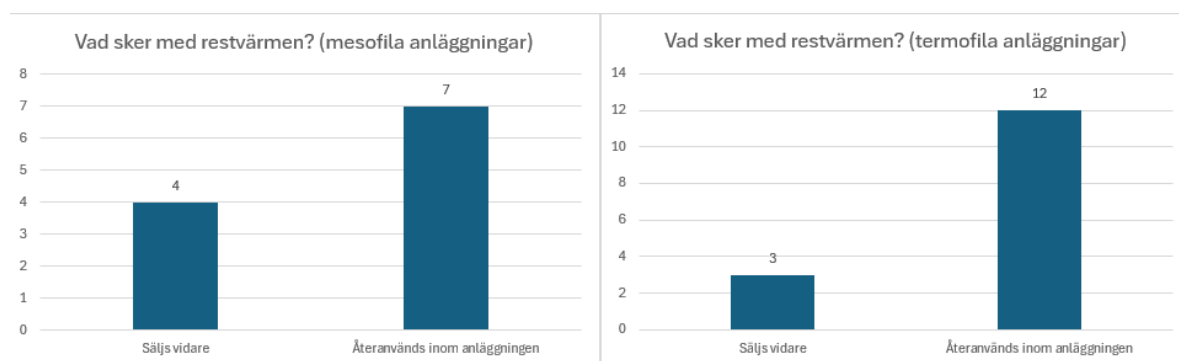


Figur 6 beskriver hur stor andel av den producerade biogasen som facklas.

Figur 5 visar ett stapeldiagram över användningsområdena för biogasen som produceras hos anläggningarna. Många av anläggningarna har flera användningsområden för biogasen, och diagrammet tar ingen hänsyn till hur stor andel biogas som går till respektive användningsområde, utan presenterar endast vilka alternativ som används. Figur 6 visar andelen av biogas som facklas, dvs. att överskottsvärme bränns. Bilderna visar tillsammans att många anläggningar facklar biogas, men majoriteten av anläggningarna facklar mellan 0-10% av den producerade biogasen. I svaren om användningsområde och andel facklad biogas finns ingen märkbar skillnad mellan anläggningar som bedriver mesofil eller termofil rötning. Något som avviker är dock att de tre anläggningarna som facklar störst andel biogas, är avloppsreningsverk med en mindre rötkammare, upp till 1050 m<sup>3</sup>, med avloppsslam som substrat. Samtidigt finns det flertalet anläggningar i enkäten med liknande egenskaper som de tre tidigare nämnda som facklar mellan 0-20% av biogasen.



Figur7: Beskriver vart värmen som värmer upp anläggningen kommer ifrån.



Figur8 beskriver vart eventuellt värmeöverskott från uppvärmningen tar vägen.

Majoriteten av anläggningarna som tillfrågades värmer upp anläggningen internt, där den vanligaste metoden är en gaspanna som bränner biogas som produceras på anläggningen. Några av anläggningarna som värmer upp med internvärme har tillgång till externvärme, vanligast i form av fjärrvärme, för att klara att hålla i gång anläggningen under vintern. Överskottsvärmen går vanligtvis till att värma upp lokaler i anläggningen, men några anläggningar säljer den vidare eller har ingen metod för att kunna hantera restvärmen.

Tabell 7: Energiåtgång för uppvärmning av rötchammaren i GWh/år samt MWh/(år\*m<sup>3</sup>).

	Mesofil	Termofil
Medel investerad energi	3,2 GWh/år	1,48 GWh/år
Medel producerad energi	30,34 GWh/år	12,1 GWh/år
Medel volym på anläggningen	8360 m <sup>3</sup>	2575,3 m <sup>3</sup>
Producerad energi per investerad energi och anläggningsvolym	1,131 MWh/(år*m <sup>3</sup> )	3,169 MWh/(år*m <sup>3</sup> )

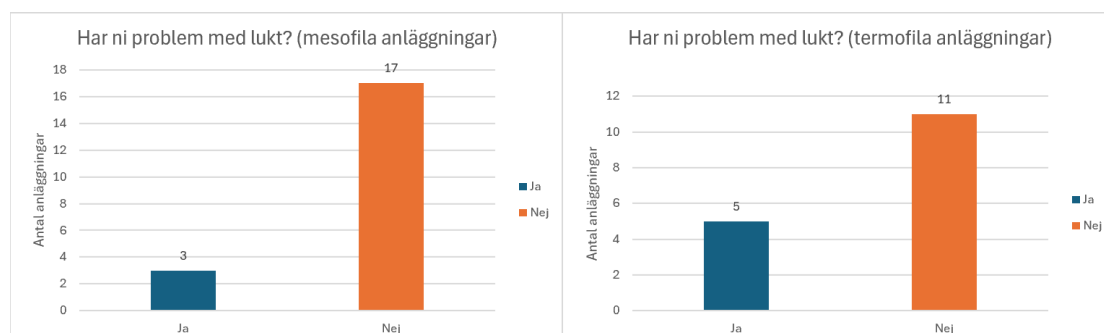
Tabell 7 visar årsförbrukningen av energi, i GWh/år, som gick åt för att värma upp rötchammaren i olika anläggningar. Tabellen nedan visar en förenklad uträkning på hur mycket energi en anläggning får ut i form av biogas i förhållande till investerad energi i uppvärmning av rötchammaren och anläggningarnas medelvolym.

Beräkningen antar att all biogas uppgraderas till 97% metan, vilket gör att 1 Nm<sup>3</sup>

biogas ger 9,67 kWh energi, utifrån data från Energigas Sverige (Energigas Sverige, 2023). Beräkningen tar inte hänsyn till skillnader i substrat, uppehållstid eller användningsområde för biogasen.

I energiberäkningen som jämför den investerade energin jämfört med producerad energi mellan de båda typerna av biogasanläggningarna visar en tre gånger högre energiproduktion för de termofila anläggningarna. Denna beräkning bygger dock på ett antagande om att biogasen uppgraderas till en metanhalt på 97%. Detta är inte fallet för majoriteten av anläggningarna i studien. För att få fram ett exakt svar hade en noggrann beräkning med många olika metanhalter krävts, vilket inte fanns möjlighet att utföra i detta arbete. Resultatet bör därför inte generaliseras utan kan tas som ledning inför framtida forskning.

## 4.2 Driftsproblem

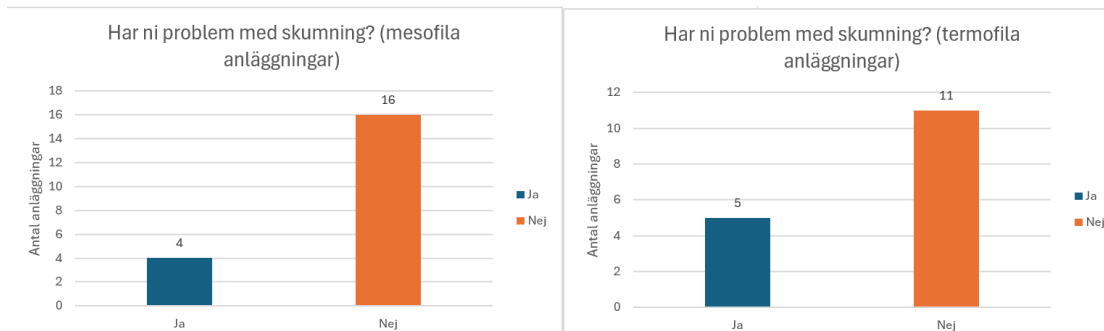


Figur9 visar ett stapeldiagram över de anläggningar som drabbas av luktproblem

Av 38 anläggningar var det enbart 8 st som har luktproblem av olika grader i sina anläggningar. Av de 8 anläggningar var 3 mesofila och 5 termofila. De anläggningar som har omställt från mesofil till termofil rötning upplever inte alls något luktproblem. De anledningar bakom lukten som anläggningarna nämner är bland annat på grund av offgasen från uppgraderingen, slamplattan och koncentrationen svavelväte. De vanligaste metoderna för att hantera luktproblem och som nämndes i enkäten är bland annat:

- Kompositfilter (Mesofila och termofila anläggningar)
- Hålla substratet inomhus med stängda portar (Termofila anläggningar)
- All ventilationsluft passerar ett biofilter innan det släpps ut i luften (Termofila anläggningar)
- Användandet av plasmateknik som reducerar  $H_2S$  och kolfilter innan det går upp i skorstenen (Mesofila anläggningar)
- Byggandet slamsilo för att minska luktproblem i framtiden (Termofila anläggningar).

Användandet av varierande metoder för att hantera luktproblem tyder på att det finns olika lösningar och utvecklingsmöjligheter som de både anläggningarna och särskilt de termofila kan använda för att minska eller behandla luktproblem.



Figur 10 visar ett stapeldiagram över de anläggningar som drabbas av skumningsproblem

Av 38 anläggningar var det enbart 9 st som har skumningsproblem av olika grader i sina anläggningar. Av de 9 anläggningarna var 4 mesofila och 5 termofila. Här också fanns inte stor skillnad mellan anläggningarna vilket påpekar att skumningsproblem kan vara oberoende av vilket temperatur som biogasen rötas i. Det visade sig att skumningsproblem är mer hanterbara än luktproblem hos både anläggningar då det är fler metoder som används för att åtgärda skumningen. För att kunna dra en bättre slutsats om resultatet hade en större jämförelse krävts med en större mängd anläggningar som upplever dessa typer av problem behövs genomföras. Detsamma gäller för resultatet med luktproblem.

De vanligaste metoder för att hantera skumning:

- Dosering av skumdämpande medel innan uppfodringen (Mesofila och termofila anläggningar)
- Undvika hög slamålder och tillväxt av *Microthrix* i reningsverket (Termofila anläggningar)
- Minska inpumpning av organiskt/fett (Mesofila anläggningar)
- Förvärmningen av slurrylagret för att upprätthålla hydrolys av långa fettmolekyler innan röt-kamrarna (Termofila anläggningar)
- Doseringen av bikarbonat för att reglera alkaliniteten (Termofila anläggningar)
- Vatten som sprutas ner på ytan för att "slå ner" skummet (Termofila anläggningar)
- Hantera nivån i bufferttankarna (Mesofila och termofila anläggningar)
- Minska matning eller ändra substrattyp (Mesofila anläggningar).



*Figur 11: Ett pajdiagram som visar anläggningarnas upplevelse av instabila processförhållanden.*

En övervägande majoritet av både mesofila och termofila biogasanläggningar upplever inte instabila processförhållanden. Enbart sex av anläggningarna svarar att de har problem med instabila processförhållanden. Av de sex anläggningar som upplever instabilitet är tre av dem termofila, två av dem mesofila och en anläggning som driver två rötkammare, där den första är termofil och sedan övergår slammet till en mesofil rötkammare.

Två av anläggningarna svarar att instabiliteten beror på ostabil temperatur, som i sin tur beror på feldimensionerade värmeväxlare, smuts, eller att värmeväxlaren inte klarar av tillräckligt högt flöde eller TS halter. Andra orsaker till instabilitet som nämns är överbelastning av VS-halt, brist på substrat under vissa perioder på året, och att gasflödet varierar beroende på belastning. Ingen skillnad i svar kan ses beroende på substrat eller storlek på anläggningarna.

*Tabell 8: Visar uträknat medelvärde och median på anläggningarnas TS-halt i procent av avvattnat slam för samtliga anläggningar och jämför mesofila anläggningar med termofila anläggningar.*

	Andel TS i avvattnat slam
Medelvärde alla anläggningar	23,7%
Median alla anläggningar	25%
Medelvärde termofila anläggningar	24,0%
Median termofila anläggningar	26,0%
Medelvärde mesofila anläggningar	23,4%
Median mesofila anläggningar	22,5%

TS-halten i procent av avvattnat slam hade ett medelvärde bland anläggningarna låg på 23,7% och medianen låg på 25%. Den lägsta andelen låg på 6% och den högsta på 31%. Medelvärdet och medianen för de termofila anläggningarna visar sig vara högre än för de mesofila anläggningarna.

### 4.3 Metoddiskussion

Den huvudsakliga använda metoden för att genomföra arbetet var både litteraturstudier och enkät som består av blandade frågor kopplat till driftserfarenheter samt driftsproblem som var riktat till både mesofila och termofila anläggningar. För att kunna säkerställa att så många svar som möjligt kan fås från anläggningarna, har det valts att kombinera både öppna och slutna frågor, där de öppna frågorna är mer av frisvarstyp utan de slutna frågorna består mer av flervalfrågor.

Vi fick ungefär lika många svar från de båda typerna av anläggningar. Trots en bra mängd svar skiljde sig i antalet besvarade frågor vilket gjorde att en del resultat är framtaget från en minoritet av anläggningarna och därför finns möjligheten att resultatet inte är representativt för alla anläggningar. Orsaken till de icke besvarade frågor kan vara en feltolkning av frågorna från respondenterna eller att vi kandidater kunde ha utformat de öppna frågorna lite mer specifikt. I beräkningsfrågorna kunde en del av resultaten inte utnyttjas då vissa värden var orimliga eller svaren var enhetslösa. Detta kan också bero på att respondenterna har misstolkat frågorna eller att frågorna var lite otydliga. Däremot kunde en bättre förståelse fås i de öppna frågorna där respondenterna kunde fritt uttrycka sina åsikter och anger sina svar. Denna typ av frågor användes mest i driftsproblem delen där det frågades om vad som orsakar lukt och skumningsproblem samt vilka åtgärder som används för att motverka och förebygga dessa problem.

Enkäten har skickats till individuella personer som har olika roller inom anläggningarna. Exempel på dessa roller är driftstekniker, processingenjör och anläggningenschef. Att enbart vissa personer har svarat på enkäten gjorde att det är svårt att få större perspektiv speciellt på de öppna frågorna som handlar om driftsproblem då svaren kunde ha baserats på personliga åsikter av respondenter.

Att använda en annan metod i form av ett experiment som undersöker driftsparametrar och driftsproblem hos minst en mesofil och en termofil biogasanläggning, och kombinera det med enkätundersökning skulle ha varit ett bättre sätt att få tydligare svar samt man skulle ha kunnat utföra en bättre jämförelse av både typ anläggningar.

## 5 Slutsats

Slutsatsen som kan dras efter denna studie påvisar en liten effektivitetsskillnad hos de termofila anläggningarna jämfört med de mesofila. Termofila anläggningar påvisade kortare uppehållstid för rötningsprocessen, vilket innebär en ökad biogasproduktion. Alla andra undersökta driftsparametrar såsom temperatur, TS-utrötningsgrad, VS-utrötningsgrad samt metanhalten i den producerade biogasen stämde till en stor del med teorin och visade inte stora skillnader mellan de mesofila och termofila av anläggningar.

Jämförelsen i driftsproblem var inte representativt då enbart 21 % av anläggningarna hade problem med lukt och skumning. Problemen förekom hos båda typer av anläggningar, där lukt och skumningsproblem var något vanligare hos de termofila anläggningarna. Många av problemen som upplevs beror på andra faktorer såsom gamla anläggningar, feldimensionerade värmeväxlare eller att vi i Sverige inte har stora erfarenheter av att bedriva rötningsprocessen termofilt. Detta visar att rötningstemperatur inte är den huvudsakliga orsaken till dessa problem.

Övergången från mesofil till termofil rötning kan därför klassas som möjligt om dessa problem kan åtgärdas, driftsparametrar såsom pH och temperatur kan stabiliseras och närvarandet av faktorer som tillåter att röttningsprocess körs stabilt och med högre effektivitet. Detta kommer att resultera i produktion av mer biogas som kan utnyttjas som förnybar källa genom att säljas vidare eller att användas internt inom anläggningarna.

I framtida studier kan det vara mer lönsamt att utföra mer experimentell metod som närmare undersöker driftsparametrar såsom pH, alkalinitet, utrötningsgrad och dess påverkan på röttningsprocessens stabilitet. Att köra en kombination av både experiment som stöts av litteraturstudier kan resultera i en bättre och bredare jämförelse mellan mesofila och termofila anläggningar.

## 6 Referenser

- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10.
- Avfall Sverige. (2019). *Termofil eller mesofil rötning av matavfall - Vad är bäst?* Avfall Svergies Utvecklingsatsning.
- Bannbers, H., Berglund, M., Fag, B., Granström, K., Hermansson, C., Johansson, H., . . . Sjöholm, H. (2021). *Effektivare resurshantering på gård*. Europiska jordbruksfonden för landsbyggsutveckling.
- Berg, J. (2001). *Undersökning av luktreducerande system och deras effekter i storskaliga biogasoch komposteringsanläggningar i Europa*. Uppsala: Jordbrukstekniska institutet.
- Biond. (den 15 April 2020). Hämtat från Biond: <https://www.biond.se/nyheterpress/alla-nyheter/utokad-kapacitet-for-biogas-pa-anlaggningen-i-savsjo/>
- Bousřkova, A., Dohańnyos, M., Schmidt, J., & Angelidaki, I. (2005). *Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors*. Water Research.
- Carlsson, M., & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Svensk Gastekniskt Center.
- Carlsson, M., & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Svenskt Gastekniskt Center.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction*. Tyskland: Wiley-VCH.
- Ek, F. (2008). *Produktion av biogas på gården*. Helsingfors: Bioenergirådgivning i Svenskfinland.
- Energigas Sverige. (den 13 04 2023). Hämtat från Vad är energiinnehållet i naturgas, biogas och fordonsgas?: <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/faq-om-biogas/vad-ar-energiinnehallet-i-naturgas-biogas-och-fordonsgas/>
- Jarvis, Å., & Schnurer, A. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. SGC.
- Jordbruksverket. (2006). *Gårdsbaserad biogasproduktion - en möjlighet för det ekologiska lantbruket*. Jordbruksverket.
- Klackenberg, L. (den 01 11 2023). *Energigas Sverige*. Hämtat från Energigas Sverige: <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/produktion-och-distribution/>
- Klackenberg, L. (den 1 11 2023). *Energigas.se*. Hämtat från Energigassverige: <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/vad-ar-biogas/>
- Kougiás, P., Thong, S., Angelidaki, I., Kristensen, L., & Boe, K. (2014). Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: a survey on causes and solutions. *ResearchGate*, s. 8.
- Modin, O. (2018). AVLOPPSVATTENRENING . i O. Modin, *Om Vatten* (s. 14). Göteborg.
- Persson, P.-E., & Wíqvist, W. (2011). *TERMOFIL ELLER MESOFIL RÖTNING AV MATAVALL - Vad är bäst ?* Malmö: Avfall Sverige.
- Schnurer, A., & Jarvis, Å. (2018). *Microbiology of the biogas process*.
- Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2008). *Microbiology of the biogas process*. Avfall Sverige.
- Starberg, K., Karlsson, B., Larsson, J.-E., Moraeus, P., & Lindberg, A. (2005). *Problem och lösningar vid processoptimering av rötkamardriften vid avloppsreningsverk*. Uppsala: Svenskt Vatten AB.
- Svensk Vatten. (2021). *Avloppsteknik 3 Slamhantering*. Svenskt vatten.

## Appendix A: Skickat mejl & enkät

Vi är två studenter som läser sista året på samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola. Nu under våren skriver vi vårt examensarbete som handlar om skillnaderna mellan att driva en biogasanläggning med mesofil och termofil temperatur. Målet med vårt projekt är att sammanställa information om drifterfarenheter från termofila anläggningar och jämföra med mesofila anläggningar.

Vi undrar om ni skulle kunna hjälpa oss genom att fylla i en enkät om er biogasanläggning. Ni finner den bifogade enkäten nedan. Vi uppskattar om ni kan svara senast den 1 april för att vi ska kunna använda resultaten i vårt examensarbete.

För eventuella frågor och funderingar tveka inte att kontakta oss

Tack för att ni lägger ner tid för att svara på den här enkäten.

MVH August och Mohammad

De frågorna som inte innehåller bokstäver som flervalsoalternativ är öppna frågor där respondenterna kunde fritt ange sina svar.

Även på de slutna frågorna (flervalsofrågor) så kunde respondenterna ange en fritextsvar om de väljer alternativet annat.

### Grunddata:

1. Vilket företag och vilken anläggning är du från?
2. Produceras biogasen med termofil eller mesofil rötning?
  - a. Termofil
  - b. Mesofil
  - c. Både
  - d. Annat
3. Om er anläggning är termofil, har ni vid något tillfälle ställt om från mesofil rötning?
  - a. Ja
  - b. Nej
4. Vad är temperaturen på rötningen och hur mycket varierar den?
5. Vilket typ av substrat används i er biogasanläggning?
  - a. Matavfall
  - b. Industriellt avfall
  - c. Avloppsslam
  - d. Gödsel
  - e. Jordbruksrest
  - f. Annat
6. Vilken uppehållstid har slammet i er sammanlagda rötningsvolym?

Exempel på enhet: dagar

7. Vad är anläggningens sammanlagda volym?
8. Hur mycket biogas producerar ni per år?

Exempel på enhet: nm<sup>3</sup> eller MWh/år

nm = normalmeter

9. Vilken är den genomsnittliga substrat-belastningen till anläggningen?

Exempel på enhet: kgTS/dag

TS = torrsubstans

10. Vad är den normala VS halten som går till röt-kammaren i procent av TS?

VS = våtsubstans

11. Hur mycket rötrest går ut från anläggningen?

Exempel på enhet: kgTS/dag

12. Vad är den normala VS halten som går ut från röt-kammaren i procent av TS?

13. Vilken är den normala metanhalten i biogasen? Svara gärna i procenthalt

## Uppvärmning:

14. Hur används biogasen?
  - a. Uppgradering
  - b. Egen produktion av el & värme
  - c. Facklas
  - d. Egen produktion av värme
  - e. Levereras till värmeverk
  - f. Annat
15. Hur stor andel av biogasen facklas?
16. Om ni har restvärme, vad gör ni med den?
  - a. Säljs vidare
  - b. Återanvänds inom anläggningen
  - c. Annat

17. Varifrån kommer grundvärmen till anläggningen?

Skriv om värmen är:

- Helt extern; inköpt värmekälla i form av fjärrvärme
- Helt intern; producerad värme såsom gaspanna, oljepanna

18. Hur mycket värme används för att värma upp rötkamrarna?

## **Drift:**

19. Har ni problem med lukt?

20. Om ni har ställt om från rötning vid mesofila temperaturer till termofila, upplever ni att lukten förändrats?

21. Har ni problem med skumning?

22. Vilka metoder använder ni er av för att hantera skumning och lukt?

23. Har ni problem med instabila processförhållanden?

24. Om ni avvattnar ert avloppsslam, vad är TS halten på det avvattnade slammet i procent?

25. Har ni andra typer av driftsproblem?

Om ja, vilken typ och hur ofta?

## **Övrigt:**

26. Finns det annan information som ni tänker är relevant för vår analys?

27. Skulle ni vilja ställa upp på en intervju?

28. Om ja på föregående fråga, hur vill ni bli kontaktade?