



Høgskolen i **Hedmark**

Avdeling for anvendt økologi og landbruksfag

Audun Leistad

Bacheloroppgave

Biogassreaktor tilpasset norske forhold – Utforming, drift og energieffektivisering

Biogas digester designed for Norwegian conditions –
Design, operation and energy efficiency

Landbruksteknikk

2016

Samtykker til utlån hos høgskolebiblioteket JA NEI

Samtykker til tilgjengeliggjøring i digitalt arkiv Brage JA NEI

Forord

Med denne bacheloroppgaven avsluttes min bachelorgrad i landbruksteknikk ved Høgskolen i Hedmark. Det har vært tre lærerike og morsomme år.

Gjennom en landbruksutdanning får man innblikk i mange spennende tema. Å velge emne for bacheloroppgaven var ikke enkelt. Det har fascinert meg hvordan landbruksnæringa i tillegg til å produsere mat og mange andre viktige produkter, også lenge har vært en produsent av fornybar energi. Derfor falt valget på biogassproduksjon, som er en av flere metoder for å utnytte landbrukets energipotensiale.

Jeg vil rette en stor takk til

- Lars Erik Ruud, førsteamanuensis ved Høgskolen i Hedmark for god og motiverende veiledning gjennom hele arbeidet med bacheloroppgaven
- Knut Huseby, teamleder og lærer ved Tomb videregående skole for gjennomgangen av biogassanlegget på Tomb, og mye nyttig informasjon til bacheloroppgaven
- Svein Lilleengen, gründer, tidligere gårdbruker og ingeniør for at jeg fikk komme på besøk til ham på Ørlandet og at han delte sine tanker rundt biogassproduksjon, økologi og bærekraftig landbruk
- John Morken, førsteamanuensis ved NMBU for at vi fikk omvisning på biogasslabben på Ås, og god gjennomgang av den anaerobe nedbrytningsprosessen
- Olav Morten Haug og Elisabeth Rasmussen for at vi fikk besøke dem og se på biogassanlegget deres på Holum gård i Nittedal
- Ragnhild Ulsaker og Per Edvard Leistad for korrekturlesning og gode innspill underveis
- Rune Johan Norum, student ved Høgskolen i Hedmark for godt samarbeid med utferdene vi har vært på

31. mai 2016, Blæstad

Audun Leistad

Innhold

FORORD	2
INNHold	3
FIGURLISTE	5
TABELLISTE	6
1. NORSK SAMMENDRAG	7
2. ENGELSK SAMMENDRAG (ABSTRACT)	8
3. INNLEDNING	9
4. RESULTAT OG DISKUSJON	13
4.1 FRA ORGANISK MATERIALE TIL METAN	13
4.2 MIKROORGANSIMENES LEVEVILKÅR.....	15
4.2.1 <i>Temperaturens innvirkning</i>	15
4.2.2 <i>pH</i>	16
4.2.3 <i>Oksygenets betydning</i>	17
4.2.4 <i>Saltkonsentrasjon</i>	17
4.3 NÆRINGSSTOFFER OG SPORSTOFFER	18
4.4 BIOMASSE	19
4.4.1 <i>Aktuelle substrater</i>	20
4.4.2 <i>Organisk belastning</i>	21
4.5 BIOGASSANLEGGETS KONSTRUKSJON OG VIRKEMÅTE	21
4.6 REAKTORTYPER	23
4.6.1 <i>Porsjonsreaktor, semikontinuerlig- og kontinuerlig substrattilførsel</i>	23
4.6.2 <i>Ett-, to- og flertrinnsprosess</i>	24
4.6.3 <i>Våt og tørr reaktor</i>	25

4.7	NETTO ENERGIPRODUKSJON	25
4.7.1	Valg av reaktortemperatur	25
4.7.2	Omrøring.....	27
4.7.3	Pumpeintervall	28
4.7.4	Valg av forutsetninger for beregninger på fiktiv biogassreaktor	28
4.7.5	Varmetap ved mesofil reaktortemperatur og ulike byggematerialer.....	30
4.7.6	Sammenligning av varmetap ved termofil og mesofil reaktortemperatur	31
4.7.7	Byggemateriale	32
4.7.8	Oppvarming.....	33
4.7.9	Varmeveksler.....	34
4.8	UTFORMING AV BIOGASSREAKTOREN	34
4.8.1	Telemarksreaktoren.....	34
4.8.2	Antec/Ås-reaktoren.....	35
4.8.3	Forholdet mellom høyde og bredde.....	35
4.8.4	Reaktor med eksternt eller internt gasslager.....	36
4.9	ØKONOMISKE VURDERINGER	37
4.9.1	Anbefaling av isolasjonstykkelse	37
4.9.2	Installasjon av varmeveksler	39
4.9.3	Økonomi for reaktor med eksternt gasslager	39
4.10	ALTERNATIV TIL SMÅSKALA GÅRDSBASERT BIOGASSPRODUKSJON	41
5.	OVERORDNET DISKUSJON	42
	LITTERATURLISTE	46

Figurliste

Figur 1. Bakterienes vekst ved ulike temperaturer. Fra Schnürer & Jarvis, 2009, Microbiological Handbook for Biogas Plants. Side 10.	16
Figur 2. Biogassanlegget på Tomb videregående skole, av forfatteren, 2015.	22
Figur 3. Varmetap i stål- og betongreaktor ved ulike isolasjonsmengder (0-45 cm) ved 37°C reaktortemperatur.	31
Figur 4. Transmisjonsvarmetap ved ulik reaktortemperatur (37 og 57°C), og ulike isolasjonstykkelser (0-45 cm).....	32
Figur 5. Varmetapsberegninger for reaktor med eksternt og internt gasslager.	36
Figur 6. Totalkostnad ved ulike isolasjonstykkelser (2-45 cm) i en mesofil betongreaktor (37°C).	38
Figur 7. Totalkostnad ved ulike isolasjonstykkelser (2-45 cm) i en termofil betongreaktor (57°C).	38

Tabelliste

Tabell 1. Ulike temperaturområder for metanproduserende mikroorganismer (Kashyap et al., 2003, side 149; Miller et al., 1988, side 3041).....	15
Tabell 2. Teoretisk potensielt volum biogass per kg organisk tørrstoff, og andel metan i biogassen (Bernesson, Hansson, Robertsson & Thyselius, 1999, side 39).....	18
Tabell 3. Priser på nødvendige byggelementer til eksternt gasslager (inklusive arbeid)	40

Vedlegg

Vedlegg 1.....	52
Vedlegg 2.....	53
Vedlegg 3.....	54
Vedlegg 4.....	55
Vedlegg 5.....	56
Vedlegg 6.....	57
Vedlegg 7.....	58
Vedlegg 8.....	59
Vedlegg 9.....	60
Vedlegg 10.....	61

1. Norsk sammendrag

Det ligger et stort uutnyttet biogasspotensial i husdyrgjødsel og avfallsprodukter fra landbruksnæringa i Norge. Gårdsbasert småskala biogassproduksjon er en av mulighetene som finnes for å utnytte potensialet. Foreløpig er ikke gårdsbasert biogassproduksjon særlig utbredt i Norge. Klima, bruksstørrelser, investeringskostnader og kraftpriser setter begrensninger. Gjennom økte tilskudd og biogassanlegg med høyere netto energiproduksjon kan dette trolig endres.

Denne bacheloroppgaven tar for seg hvordan små gårdsbaserte biogassreaktorer kan få økt netto energiproduksjon. Det ses hovedsakelig på hvordan anleggets interne energiforbruk kan senkes og hvordan metanproduksjonen kan økes.

Gjennom litteratursøk og beregninger er det kommet fram anbefalinger om hvordan driften av biogassanlegget og energieffektiviserende tiltak kan øke netto energiproduksjon. Litteratursøket viser at god drift av reaktoren og samrætning av ulike substrater, kan øke metanproduksjonen vesentlig. Det er gjort ulike beregninger på en 150 kubikkmeter (m^3) stor biogassreaktor. God isolering kan forminske transmisjonsvarmetapet gjennom reaktorens overflate. I beregningene gjort for den aktuelle biogassreaktoren, kommer det fram at en isolasjonstykkelse på 10-15 centimeter (cm) var kostnadsoptimalt ved mesofil driftstemperatur. Ved termofil driftstemperatur var en isolasjonstykkelse på rundt 15-20 cm kostnadsoptimalt. Det var ikke lønnsomt å installere varmeveksleren som ble sett på i denne oppgaven til en reaktor på 150 m^3 . Mange tiltak kan gjøres for å øke netto energiproduksjon, men det er forskjell på om de er lønnsomme eller ikke.

2. Engelsk sammendrag (abstract)

The agricultural sector in Norway has a large unutilized energy potential. Livestock manure and agricultural residues can be converted to biogas through anaerobic digestion. The biogas potential can be utilized using farm biogas-plants. At this time, there are few agricultural biogas digesters in Norway. The agricultural sector is facing some challenges in achieving a larger scope of biogas production: the cold climate, small sizes of Norwegian livestock farms, investment costs and energy prices. To achieve better economy for small-scale agricultural biogas production, the solution might be a combination of increased subsidies and more energy efficient biogas plants.

This bachelor thesis investigates how small biogas digesters can achieve increased net energy production. The thesis investigates two themes: how the biogas plants internal energy loss can be decreased and how the methane production can be increased.

To be able to recommend how net energy production could be increased, calculations and a literature study was done. The literature study shows that the methane production can be increased significantly through co-digestion of various organic substances. It can also be increased through efficient operations. It has been made calculations for a fictional reactor of 150 cubic meters. These calculations were made to determine surface heat loss, insulation needs, energy loss from heating substrate and profitability by making energy conservation measures. Calculations showed that insulating the reactor with 10-15 centimetres was advantageous when the reactor operated at a mesophilic temperature. When operating at a thermophilic temperature, the cost optimal insulation thickness was 15-20 centimetres. The calculations also showed that installation of a tube heat exchanger would give negative profitability. A lot can be done to increase net energy production of small scale farm biogas digesters, but whether these measures raise or lower the profitability differs.

3. Innledning

Forbruket av ikke-fornybar energi har steget dramatisk siden den industrielle revolusjon. Over 80 % av verdens energiforbruk baserer seg på fossilt brensel. Det globale energiforbruket er stadig økende (IEA, 2015, side 25 og 38). Biogass kan erstatte noe av de fossile brenslene. 1 m³ råbiogass bestående av 60% metan har et energiinnhold på rundt 6 kWh. Dette tilsvarer om lag seks desiliter diesel (Løvaas, 2009; Hofstad, 2015). I 2009 satte regjeringen som mål at 30 % av all husdyrgjødsel skal behandles i biogassanlegg før år 2020 (Landbruks- og matdepartementet, 2009, side 123). Skal dette målet nås, må det skje drastiske forandringer på økonomien i gårdsbasert biogassproduksjon.

Biogass er en metanholdig gassblanding som blir dannet ved anaerob nedbrytning av organisk materiale, for eksempel husdyrgjødsel, matavfall eller slakteriavfall. Biogass dannes naturlig i myrer, våtmarker, under havbunnen og i vomma til drøvtyggere (Løvaas, 2009; Jørgensen, 2009, side 5). Ubehandlet kan biogass brukes til varmeenergi eller produksjon av strøm. For å unngå korrosjon renses ofte gassen før bruk, og vannet fjernes. Dersom gassen i tillegg oppgraderes, kan den brukes som drivstoff i forbrenningsmotorer (Petersson & Wellinger, 2009, side 5 og 6).

Når forholdene ligger til rette, vil gårdsbasert biogassproduksjon trolig gi gårdbrukeren bedre agronomi, økonomi, økt grad av selvforsyning samt redusere landbrukets klimabelastning (Bondelaget, s.a., side 19). Produksjonen kan også gi samfunnet flere goder, som færre søppelfyllinger, bedre tilgang på energi, mindre lukt ved husdyrgjødselspredning og redusert bruk av ikke-fornybar energi (Fjørtoft, Morken & Gjetmundsen, 2014, side 9; Ellingsen & Filbakk, 2014, side 5). Biogassprosessen utnytter biomassen godt, og kan ha så mye som 94% termisk virkningsgrad (Kashyap, Dadhich & Sharma, 2003, side 148). Biogassproduksjon med biprodukter fra landbruket skaper en mer helhetlig sirkel i næringas vareflyt. Det gjør også landbruket mindre avhengig av eksterne innsatsfaktorer som kunstgjødsel og energi (Jørgensen, 2009, side 30). Kort og godt gir det landbruket flere bein å stå på inn mot en uforutsigbar framtid.

Flere agronomiske fordeler oppnås med biogassproduksjon. Gjennom biogassprosessen synker gjødselens innhold av organisk tørrstoff. Tyntflytende gjødsel trekker fortere ned i jorda, og har mindre næringstap (Fjørtoft et al., 2014, side 9). Biogassprosessen endrer forholdet mellom organisk bundet nitrogen og nitrogen i ammoniumform (Jørgensen, 2009, side 30).

Ammonium tas direkte opp av plantene (Aarnes, 2012). Organisk bundet nitrogen må frigjøres ved nedbrytning av organiske stoffer før det kan tas opp. Det potensielle tapet av nitrogen gjennom utvasking blir derfor mindre (Jørgensen, 2009, side 30). En kombinasjon av varme og anaerobe forhold gjør at svært lite ugrasfrø er levedyktige etter biogassprosessen (Fjørtoft et al., 2014, side 9; Johansen, Nielsen, Hansen, Andreasen, Carlsgart, Huggard-Nielsen & Roepstorff, 2013, side 809). Flere studier har vist at det er liten sjanse for spredning av ugrasfrø ved bruk av bioest som gjødsel, men det trengs fortsatt mer forskning på området (Hansander, 2012, side 3). Bioestens effekt på moldinnhold i jorda er omdiskutert. Biogassproduksjonen tar bort en del tørrstoff fra gjødsla, samtidig gir økt nitrogenutnyttelse mer plantemasse som kan tilbakeføres som organisk materiale til jorda. Det er påbegynt forsøk på området, men dette tar lang tid å finne ut av, da moldinnholdet i jorda endrer seg sakte (Løes, 2014, side 18).

Biogassanlegg finnes i forskjellige størrelser, hovedsakelig anlegg bygd for husholdningsbruk, industrielle anlegg og gårdsbaserte anlegg (Schnürer & Jarvis, 2009, side 28). For større biogassanlegg, kan strøm- eller drivstoffproduksjon være aktuelt. Ved strømproduksjon kan 25-45% av energien i biogassen omdannes til elektrisk energi. Resten brukes som varmeenergi (Lantz, 2012, side 504). Ved oppgradering blir energiinnholdet i biogassen på høyde med naturgass (Petersson & Wellinger, 2009, side 5). Turbin/motor og oppgraderingsteknologi har imidlertid høye investeringskostnader. For mindre gårdsbaserte anlegg i Norge vil trolig produksjon av varmeenergi ofte være mest aktuelt (Ellingsen & Filbakk, 2014, side 25). Biogassen kan for eksempel brukes til vannbåren oppvarming av driftsbygninger, drivhus eller gassfyrte varmluftstørker. Bare fantasien setter grenser.

Det har til nå vært utfordringer med å få lønnsomhet i gårdsbasert småskala biogassproduksjon. Det er gjort statlige tiltak for å prøve å løse dette. Fra 1. januar 2015 tiltrådte økte tilskudd for bruk av husdyrgjødsel i biogassanlegg. Tilskuddene beregnes etter foretakets dyretall, såfremt all husdyrgjødsel går gjennom biogassanlegget. Det utbetales blant annet et årlig tilskudd på 1660 kr per melkeku, 34 kr per slaktegris og 510 kr per 1000 slaktekylling (Forskrift om tilskudd for levering av husdyrgjødsel til biogassanlegg § 4). Innovasjon Norge kan gi støtte til bygging av biogassanlegg på inntil 45% av byggekostnadene. Det gis også 50% støtte til forstudier inntil 50 000 kr (Innovasjon Norge, 2014, side 7). Tilskudd kan være med på å gjøre småskala biogassproduksjon økonomisk bærekraftig.

Sammenlignet med antall gårdsbaserte biogassanlegg globalt, er det svært få anlegg i Norge (Landbruksdirektoratet, s.a.). Flere faktorer skaper utfordringer med å få lønnsomhet i norsk gårdsbasert biogassproduksjon: barskt klima, små bruk, høye investeringskostnader og lave kraftpriser (Bondelaget, s.a., side 16; Fjørtoft et al., 2014, side 9).

Det gjennomsnittlige husdyrbruket i Norge er relativt lite i global sammenheng. Lavt volum av husdyrgjødsel begrenser naturlig nok størrelsen på tilknyttede biogassanlegg. Større fellesanlegg kan være en løsning. Utfordringen er transporten av store mengder husdyrgjødsel med lavt biogassutbytte (Landbruksdirektoratet, s.a).

Klimaet i Norge er også en flaskehals for gårdsbasert biogassproduksjon. Forsøk viste at biogassanlegget på Tomb videregående skole brukte rundt 47% av produsert energi til å dekke opp internt termisk forbruk. Halvparten til oppvarming av substrat, den andre halvparten til å dekke varmetap fra reaktorer og rørledninger (Fjørtoft et al., 2014, side 5).

Foruten økte tilskudd, kan det å øke biogassanleggets netto energiproduksjon være en måte for å få bedre økonomi i småskala gårdsbasert biogassproduksjon. Dette kan gjøres på to måter: det interne energiforbruket kan senkes, eller metanproduksjonen kan økes. En kombinasjon vil trolig gi det beste resultatet.

Flere faktorer vil ha innvirkning på metanproduksjonen. Faktorer som innvirker er substrat og substratblandinger, reaktortemperatur, temperaturstabilitet, omrøring og pumpeintervaller.

Senkning av biogassanleggets interne energiforbruk vil også være viktig for å øke netto energiproduksjon. Vi kan skille energiforbruket i to sektorer: elektrisk energiforbruk og termisk energiforbruk.

Det elektriske energiforbruket går hovedsakelig til pumping og omrøring. Elektrisk energiforbruk kan reduseres ved å bruke energieffektive røremetoder, senke røring i reaktor til et minimum og legge opp til minst mulig pumping av substrat (Zupančič & Roš, 2003, side 2257; Fjørtoft et al., 2014, side 15).

Det termiske energiforbruket går til oppvarming av substrat, og varmetap i reaktor og røret. Termisk energiforbruk kan reduseres gjennom isolering, bruk av varmeveksler eller ved å senke temperaturkravet til reaktoren (Fjørtoft et al., 2014, side 15). I kontinuerlige og semikontinuerlige anlegg forsvinner mye varmeenergi med gjødsla som pumpes ut av reaktoren (Fjørtoft et al., 2014, side 5).

Det er av vesentlig betydning for totaløkonomien i gårdsbasert biogassproduksjon at anleggene har høyest mulig netto energiproduksjon. En kombinasjonsløsning med økte tilskudd og høyere netto energiproduksjon, vil trolig gjøre småskala biogassproduksjon lønnsomt og utbredelsen i Norge større.

Problemstilling: Denne oppgaven er et litteraturstudie som gjennom faglitteratur og beregninger skal drøfte energieffektivisering, utforming og drift av biogassreaktorer bygd for norske forhold. Bacheloroppgaven har til formål å finne ut hvordan små biogassreaktorer i nordisk klima kan få høyere netto energiproduksjon og om tiltakene gir økonomisk gevinst.

For å begrense oppgaven, er det valgt å se kun på *biogassreaktoren* og ikke andre komponenter i biogassanlegget. Alle beregninger i bacheloroppgaven tar for seg en reaktorstørrelse på 150 m³ der storfe gjødsel og matavfall brukes som substrat.

Det er ikke gjort helhetlige beregninger på totaløkonomien ved biogassproduksjonen, men beregninger for innsparinger og inntjeningsmuligheter med ulike energieffektiviserende tiltak.

Det er skrevet om hvordan driften av biogassreaktoren kan påvirke metanproduksjonen og prosessen generelt. Dette handler i stor grad om strategier for omrøring og pumping, substrater og blandingsforhold, valg av reaktortemperatur og lignende. Bacheloroppgaven tar ikke for seg de økonomiske konsekvensene av dette.

Det er skrevet et mindre kapittel om hvordan ulike utforminger av reaktoren kan påvirke prosessen og energieffektiviteten.

Oppgaven bygger også på erfaringer fra gårdsbesøk til Tomb, Ørlandet, Nittedal og biogasslabben på NMBU, Ås.

4. Resultat og diskusjon

4.1 Fra organisk materiale til metan

Biogass er et avfallsprodukt fra mikroorganismenes stoffskifte. Den består hovedsakelig av metan, karbondioksid, nitrogengass, oksygen og vann. Biogassen kan også inneholde ammoniakk, hydrogen, hydrogensulfid, karbonmonoksid og andre gasser. Innholdet i gassen avhenger av sammensetningen til substratet (Jørgensen, 2009, side 4; Petersson & Wellinger, 2009, side 5; Rasi, Veijanen & Rintala, 2006, side 1375).

Ulike organiske materialer, som for eksempel storfe gjødsel, har sin særegne bakterieflora. Bakteriefloren i substratet vil være startkulturen ved oppstart av en biogassreaktor. Leveforholdene i reaktoren vil være forskjellig fra mikroorganismenes opprinnelige miljø. De mikroorganismene som er best tilpasset det nye miljøet, etablerer seg og starter den anaerobe nedbrytningen (Schnürer & Jarvis, 2009, side 25). Mange bakterier samspiller i denne kompliserte prosessen. Et avfallsstoff for en bakterie, kan være næring for en annen. Forskjellige bakteriegrupper arbeider i de forskjellige fasene. Hvilke bakterier som arbeider, avhenger av biomassens sammensetning (Jørgensen, 2009, side 4 og 8).

Beskrivelsen av den anaerobe nedbrytningsprosessen varierer med litteraturen. Begrep og figurer som brukes er i liten grad standardiserte. Nedbrytningsprosessen kan deles inn i fire faser: hydrolyse, fermentering, anaerob oksidasjon og metanogenese.

I *hydrolysen* spaltes store organiske molekyler (proteiner, karbohydrater og fett) i reaksjon med vann. På dette stadiet er molekylene for store til at bakteriene kan nyttiggjøre seg dem. Bakterier vil derfor produsere og utskille enzymer i gruppen hydrolaser. Hydrolasene katalyserer spaltingen, og gjør næringsstoffene tilgjengelige for bakteriene (Hauge, 2009; Schnürer & Jarvis, 2009, side 13). Spaltingen skjer ekstracellulært. Det vil si at spaltingen foregår i den omliggende væsken rundt bakteriecellene (Jørgensen, 2009, side 9). Gjennom den ekstracellulære spaltingen kan bakteriene ta inn mindre deler av molekylene til næring (Schnürer & Jarvis, 2009, side 14). Polysakkarider spaltes hovedsakelig til sukker. Cellulose katalyseres gjennom enzymet cellulase og spaltes til cellobiose eller glukose. Stivelse katalyseres av amylase og spaltes til glukose. Hemicellulose og pektin katalyseres henholdsvis av hemicellulase og pectinase, og spaltes til flere forskjellige typer sukker. Proteiner og peptider katalyseres av proteinase og spaltes hovedsakelig til aminosyrer (Schnürer & Jarvis,

2009, side 14). Nedbrytningen av fett katalyseres gjennom enzymgruppen lipaser. Fettet nedbrytes til fettsyrer og glyserol (Schnürer & Jarvis, 2009, side 15; Jørgensen, 2009, side 10).

I *fermenteringen* blir produktene fra hydrolysen substrat for fermenterende bakterier. Mange bakterier er aktive under fermenteringen, og flere av bakteriene er de samme som i hydrolysen. Sukker, aminosyrer og alkoholer kan for eksempel brukes som substrat av fermenterende bakterier. Fettsyrer blir ikke nedbrutt før den anaerobe oksidasjonen. Aminosyrer og sukker nedbrytes hovedsakelig til organiske syrer som eddiksyre, propionsyre, smørsyre, ravsyre og melkesyre. I tillegg blir det dannet alkoholer, ammoniakk, karbondioksid og hydrogen. Hva som dannes, avhenger av biomassens sammensetning og bakteriefloraen (Schnürer & Jarvis, 2009, side 15).

I *den anaerobe oksidasjonen* blir produktene fra fermenteringen ytterligere nedbrutt gjennom anaerobe oksidasjonsreaksjoner. Denne delen av den anaerobe nedbrytningen krever nært samspill mellom mikroorganismer som utfører oksidasjonen, og de metanproduserende arkene (ligner bakterier, men har ulik molekylær oppbygning av cellevegg og cellemembran) (Fossum, 2016). I den anaerobe oksidasjonen produseres hydrogengass. Det vil kun produseres hydrogengass dersom hydrogengassen kontinuerlig fjernes. Opphopning av hydrogengass vil stoppe den anaerobe oksidasjonen, da bakteriene ikke får nok energi til vekst. Heldigvis trengs hydrogengassen til arkenes metanproduksjon. Mens mikroorganismene som utfører oksidasjonen trenger lavt hydrogengasstrykk, har arkene best vekst ved høyt hydrogengasstrykk. For en god biogassprosess trengs det et kompromiss der begge har god vekst (Schnürer & Jarvis, 2009, side 17 og 18). Gjennom den anaerobe oksidasjonen blir fettsyrer og alkoholer hovedsakelig til eddiksyre og karbondioksid (Schnürer & Jarvis, 2009, side 18).

I *metanogenesen* produseres hovedsakelig metan og karbondioksid av arker. Arkenes viktigste substrat er hydrogengass, karbondioksid og eddiksyre, produkter fra den anaerobe oksidasjonen. Arker som livnærer seg på eddiksyre er ofte dominerende i reaktoren. Rundt 70% av biogassen produseres fra eddiksyre. Andre arker kan produsere metan av hydrogengass og karbondioksid. Metanproduserende arker vokser sakte. Det tar 1-12 dager for en arke å doble seg. Utvasking av arker er ofte en begrensning for substratets hydrauliske oppholdstid. Arkene er også ofte de første mikroorganismene som påvirkes av pH-endringer eller giftige komponenter i substratet slik som tungmetaller (Schnürer & Jarvis, 2009, side 18 og 19).

De fire prosessene foregår samtidig i tradisjonelle biogassreaktorer. De ulike mikroorganismene i de forskjellige prosessene kan ikke alle ha optimale levevilkår samtidig. Det er derfor viktig å finne et kompromiss der flest mulig mikroorganismer har gode levevilkår samtidig, slik at prosessen blir stabil og metanproduksjonen høy.

4.2 Mikroorganismenes levevilkår

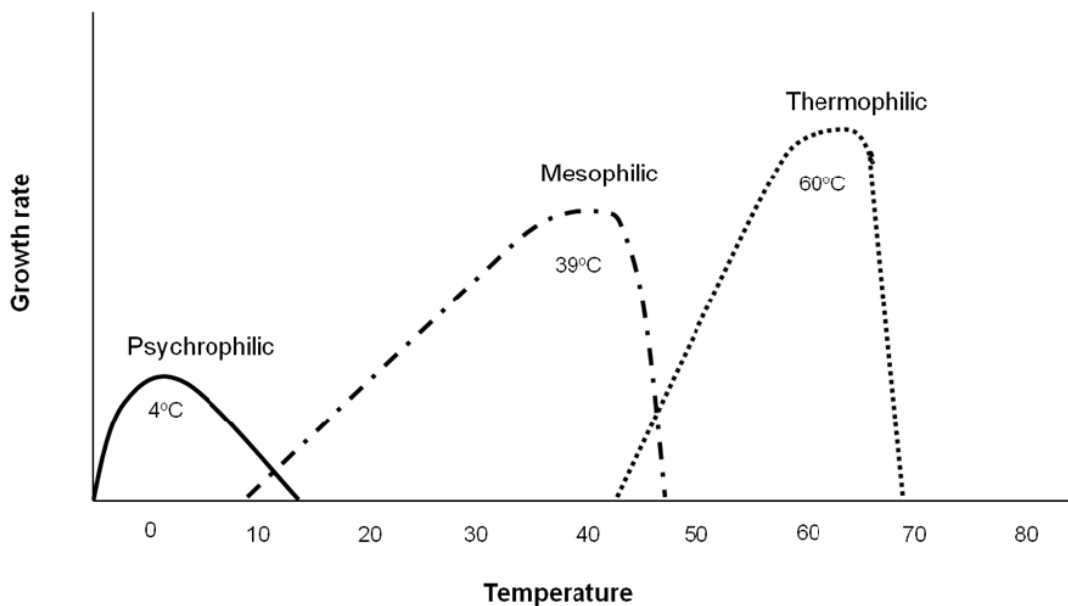
Mikroorganismene har visse krav til miljøet de lever i. Veksten deres avhenger blant annet av temperatur, pH, oksygenkonsentrasjon og saltkonsentrasjon (Schnürer & Jarvis, 2009, side 6).

4.2.1 Temperaturens innvirkning

Ulike arter av metanproduserende mikroorganismer kan leve ved forskjellige temperaturer. Den optimale temperaturen der mikroorganismene vokser fortest og jobber mest effektivt, varierer fra art til art. Metanproduksjon kan foregå fra 0°C opptil 98°C ved høyt trykk (Kashyap et al., 2003, side 149; Miller, Shah, Nelson, Ludlow & Clark, 1988, side 3041; Schnürer & Jarvis, 2009, side 9). Temperaturen har betydning for bakterievekst, bakteriekultur og nedbryningshastighet. Den kan kategoriseres i fire temperaturområder etter hvilke mikroorganismer som trives i temperaturområdet: psykrofil, mesofil, termofil og hypertermofil (Schnürer & Jarvis, 2009, side 33; Kashyap et al., 2003, side 149). I litteraturen kategoriseres temperaturområdene noe ulikt.

Tabell 1. Ulike temperaturområder for metanproduserende mikroorganismer (Kashyap et al., 2003, side 149; Miller et al., 1988, side 3041)

Temperaturområde	Temperatur (°C)
Psykrofil	0-20
Mesofil	20-45
Termofil	45-60
Hypertermofil	60-98



Figur 1. Bakteriernes vekst ved ulike temperaturer. Fra Schnürer & Jarvis, 2009, *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Side 10.

En stabil temperatur er viktig for mikroorganismenes vekst (figur 1). Temperaturområdene med høyest bakterievekst (4, 39 og 60°C) ligger alle nært en temperatur der mange mikroorganismer dør grunnet inaktivering av bakteriecellenes organeller (Schnürer & Jarvis, 2009, side 10). Metanproduserende mikroorganismer tolererer ofte temperatursvingninger dårlig (Schnürer & Jarvis, 2009, side 30). Det vil være ugunstig å bruke en reaktortemperatur på for eksempel 45°C, da dette er en temperatur der både mesofile og termofile bakterier har dårlig vekstrate. En mer ideell temperatur vil for eksempel være 39 eller 60°C. Helst bør ikke temperaturen variere mer enn $\pm 0,5^\circ\text{C}$, men prosessen kan tolerere $\pm 2-3^\circ\text{C}$ (Schnürer & Jarvis, 2009, side 30). Temperaturøkning påvirker prosessen mer enn temperaturreduksjon. For å ha en buffersone opp til skadelig høye temperaturer, brukes i praksis gjerne en temperatur på rundt 37°C i mesofil prosess.

4.2.2 pH

pH i reaktoren har mye å si for metanproduksjonen. De fleste mikroorganismer foretrekker en nøytral pH rundt 7 - 7,5. De fleste biogassprosesser har en pH på 7 - 8,5 (Schnürer & Jarvis, 2009, side 88). Dersom bakteriene ikke klarer å ta unna fettsyrene, kan det oppstå en forsuring

i reaktoren. Dette hemmer prosessen og kan i verste fall føre til at metanproduksjonen stopper (Jørgensen, 2009, side 13).

4.2.3 Oksygenets betydning

Biomassen som pumpes inn i reaktoren kan ha med seg oksygen. Oksygen kan også slippe inn hvis reaktoren ikke er tilstrekkelig tett. De fleste metanproduserende mikroorganismer tolererer ikke oksygen (Schnürer & Jarvis, 2009). Det finnes noen mikroorganismer som lever både med og uten oksygen. Disse kalles fakultative mikroorganismer. De bruker oksygen i sitt stoffskifte, og hjelper dermed mikroorganismer som ikke tolererer oksygen (Jørgensen, 2009, side 11). Mange av fermenteringsbakteriene er fakultative. Når oksygen er tilgjengelig, bruker bakteriene det i sitt stoffskifte. Når det er slutt på oksygenet, begynner bakteriene fermenteringen. Ulempen med de fakultative mikroorganismene er at de kan bruke opp organisk materiale som kunne blitt til metan under anaerobe forhold (Schnürer & Jarvis, 2009, side 26). Da alternativet er at prosessen hemmes eller stopper på grunn av for høy oksygenkonsentrasjon, er litt redusert metanutbytte en lav pris å betale. Selv om fakultative mikroorganismer skaper en buffersone for oksygeninnslipp, bør biogassreaktorer være så tette som overhodet mulig.

4.2.4 Saltkonsentrasjon

Alle mikroorganismer trenger salt. Salt inneholder blant annet natrium, kalium og klor, som er viktige byggesteiner for mikroorganismene. Salt finnes naturlig i mange aktuelle biogassubstrat, og behøver ikke tilsettes. Det kan derimot oppstå problemer dersom saltkonsentrasjonen blir for høy. Avfall fra for eksempel næringsmiddel- og fiskeindustrien kan inneholde for mye salt. Høye saltkonsentrasjoner har en konserverende effekt, og hemmer bakteriell vekst. Høye saltkonsentrasjoner tvinger mikroorganismenes celler til å pumpe ut vann slik at de mister sin funksjon (Schnürer & Jarvis, 2009, side 12). For høye saltkonsentrasjoner er vanligvis ikke et problem. I de tilfellene der det er et problem, kan husdyrgjødsels utvannende effekt virke positivt.

4.3 Næringsstoffer og sporstoffer

Mikroorganismene i biogassreaktoren livnærer seg på spaltinger av fett, karbohydrat og protein. Videre livnærer de seg på hverandres avfallsstoffer. Som det siste leddet i næringskjeden, omdanner arkene blant annet hydrogengass, karbondioksid og eddiksyre til metan. Det er en del forskjell på hvor mye biogass de ulike næringsstoffene gir, og hvor stor andel av biogassen som blir til metan (tabell 2).

Tabell 2. Teoretisk potensielt volum biogass per kg organisk tørrstoff, og andel metan i biogassen (Bernesson, Hansson, Robertsson & Thyselius, 1999, side 39).

	Teoretisk potensielt volum biogass per kg organisk tørrstoff (m³)	Andel metan i biogassen (%)
Fett	1,44-1,54	70-72
Protein	0,59-0,98	50-84
Karbohydrat	0,75-0,89	50

Det er viktig å påpeke at dette er et teoretisk biogasspotensial. Metanutbyttet vil i virkeligheten avhenge av temperatur, pH, omrøring, hydraulisk oppholdstid og andre forutsetninger for mikroorganismenes levevilkår.

Fett er et næringsstoff som gir godt metanutbytte. Fettet har et teoretisk potensial til å omdannes til 1,44 – 1,54 m³ biogass/kg organisk tørrstoff. Rundt 70-72% av biogassens volum nedbrutt fra fett er metan (Bernesson et al., 1999, side 39). Fettrike substrat tar lang tid å bryte ned (Vidal, Carvalho, Méndez & Lema, 2000, side 238).

Protein gir også mye metan. Rundt 68% av biogassens volum nedbrutt fra protein er metan, men litteraturen varierer mellom 50-84% (Bernesson et al., 1999, side 39). Ved nedbrytning av protein dannes ammoniakk. Allerede ved lave konsentrasjoner av ammoniakk, hemmes bakteriene noe. Ved gradvis tilvenning kan bakteriene tåle noe høyere konsentrasjoner

(Jørgensen, 2009, side 13). Forholdet mellom karbon og nitrogen i det organiske materialet har derfor betydning for prosessen. Det er viktig at det ikke inneholder for mye nitrogen i forhold til karbon. Samtidig bør ikke nitrogeninnholdet bli for lavt, da dette kan føre til nitrogenmangel hos mikroorganismene (Schnürer & Jarvis, 2009, 45).

Karbohydrat brytes raskere ned enn fett, men gir lavere metanutbytte (Vidal et al., 2000, side 231) Rundt 50% av biogassens volum nedbrutt fra karbohydrat er metan (Bernesson et al., 1999, side 39).

I likhet med andre levende vesener, har mikroorganismene i reaktoren også behov for sporstoffer. Sporstoffene har innvirkning på prosessens stabilitet og metanproduksjon (Demirel & Scherer, 2011, side 992). Mikroorganismene kan ha behov for sporstoffer, som jern, kobolt, nikkel, sink, molybden, wolfram, bor, kalsium, krom, kopper, magnesium, mangan, bly, svovel og selen (Schattauer, Abdoun, Weiland, Plöchl & Heiermann, 2010, side 58). De seks første er spesielt viktig for prosessens stabilitet og biogassproduksjonen (Demirel & Scherer, 2011, side 995). Underskudd av sporstoffer er mest vanlig i biogassanlegg som bruker en høy andel energivekster (vekster som plantes eller sås til bioenergiformål) (Schattauer et al., 2010, side 57; Mæhlum & Rosvold, 2009).

4.4 Biomasse

De fleste organiske stoffer kan nedbrytes til biogass. Unntaket er lignin som ikke kan nedbrytes anaerobt. Flere aspekter bør tas hensyn til ved valg av biogasssubstrat: biogassutbytte, tørrstoffinnhold, organisk tørrstoffinnhold, næringsinnhold, biorestens kvalitet, nedbrytbarhet, behov for forbehandling, fare for mekaniske problem, fare for mikrobiologiske problem og luktproblemer (Carlsson & Uldal, 2009, side 3).

Blanding av ulike organiske materialer kan være fordelaktig. Det kan gi komplekse sammensetninger, som i større grad inneholder komponentene som trengs for mikrobiell vekst (Schnürer & Jarvis, 2009, side 50). Et forsøk gjort i Sverige, viste at poteter og betetopper hver for seg produserte metan tilsvarende henholdsvis 2,5 og 2,1 kWh/kg organisk tørrstoff. Da de to substratene ble råtnet sammen, tilsvarte metanproduksjonen 3,9 kWh/kg organisk tørrstoff, en økning på nesten 60% (Parawira, Read, Mattiasson & Björnsson, 2007, side 47). Zhang, Xiao, Peng, Su & Tan (2012, side 172) melder at samråtning av matavfall og storfe gjødsel kan øke metanproduksjonen med 41,1%. Riktignok ikke per kg organisk

tørrstoff, men regnet i total biogassproduksjon i dette forsøket. Samråtning kan være en effektiv metode for å øke metanproduksjonen. Dersom to eller flere ulike substrater disponeres, kan dette også være et praktisk styringsverktøy for mengden biogass som skal produseres. Mange av energiforbrukene som gårdsbasert biogass er aktuell for, har ikke samme energibehov gjennom hele året. Siden noen substrater gir høyere biogassutbytte enn andre (eksempelvis matavfall og husdyrgjødsel), kan man gjennom mengde tilført matavfall styre produsert mengde biogass. Slik styres biogassproduksjonen på Tomb videregående skole. På vinterhalvåret da fyringsbehovet er størst, tilsettes omtrent 20% matavfall. På sommeren da fyringsbehovet er mindre, reduseres tilført mengde matavfall (personlig kommunikasjon, Knut Huseby, 14. desember 2015).

4.4.1 Aktuelle substrater

Storfegjødsel er et substrat som finnes i store kvanta i landbruket. Storfegjødsel inneholder mange nærings- og sporstoffer som utnyttes i biogassprosessen. I tillegg gir den en bufferkapasitet som stabiliserer pH i reaktoren (Fjørtoft et al., 2014, side 9). Et lavt tørrstoffinnhold gjør at storfegjødsel har en utvannende effekt på andre substrater. Man slipper dermed å tilsette vann til substrater med høyt tørrstoffinnhold.

Storfe har et svært effektivt fordøyelsessystem. Mye av det organiske materialet som ikke kan brytes ned i vomma, kan heller ikke brytes ned i biogassreaktoren. Maksimalt er det cirka 40% av det organiske tørrstoffet fra storfegjødsel som er nedbrytbart for biogassreaktoren (Wilkie, 2005, side 307). Sammenlignet med annen husdyrgjødsel, og generelt andre aktuelle substrater, er biogasspotensialet i storfegjødsel lavt (Liu, Tang, Matsui, Morimura, Wu & Kida, 2008, side 56).

Biogassproduksjon med matavfall er en attraktiv metode for avfallsbehandling. Den gir energi i form av biogass, reduserer avfallsvolumet og gir en næringsrik biorest. Matavfall har et høyt biogasspotensiale (Fjørtoft et al., 2014, side 19; Liu et al., 2008, side 56). Det er som oftest nødvendig å samråtne matavfall med annet substrat. Opphopning av langkjeda fettsyrer kan føre til en forsuring i reaktoren. Råtning av matavfall alene, kan derfor by på utfordringer (Zhang et al., 2012, side 170). El-Mashad & Zhang (2010, side 4027) anbefaler 60% matavfall innblandet i storfegjødsel. Fjørtoft et al. (2014, side 37) har vist at det er mulig med innblanding av så mye som 85% matavfall.

Matavfall er et substrat som kan gi utfordringer ved råtning alene, men ved samråtning med husdyrgjødsel fungerer det svært godt og gir høy metanproduksjon. Storfegjødsel er alene et substrat med lavt biogassutbytte per volumenhet, men det store kvantumet og gjødselas egenskaper gjør det til et veldig aktuelt grunns substrat.

4.4.2 Organisk belastning

Den *organiske belastningen* måler hvor hardt mikroorganismene belastes med nytt substrat. Den benevnes med kg organisk tørrstoff tilført per m³ reaktorvolum og dag (kg VS/m³ · dag) eller i mange tilfeller g/l·dag (Fjørtoft et al., 2014, side 25). Den organiske belastningen bør ikke endres brått. Maksimalt 10-15% økning eller reduksjon av tilført substrat per uke (Schnürer & Jarvis, 2009, side 35). Flere har rapportert at ved råtning av husdyrgjødsel og matavfall, bør den organiske belastninga ikke overstige 6 g/l·dag (Fjørtoft et al., 2014 side 37; Liu, 2008, side 56).

Den organiske belastningen påvirkes i stor grad av den hydrauliske oppholdstiden. *Hydraulisk oppholdstid* er antall dager det tar før volumet av det utskiftede substratet tilsvarer reaktorens volum. Dersom reaktoren for eksempel rommer 150 m³ substrat, og det tilføres 6 m³ substrat hver dag, vil den hydrauliske oppholdstida være 25 dager ($6 \text{ m}^3 \cdot 25 = 150 \text{ m}^3$). Ved lengre oppholdstid blir mer av tørrstoffet biogass, og bioresten får økt gjødselkvalitet. Ved kortere oppholdstid kan anlegget totalt behandle mer substrat og biogassproduksjonen effektiviseres, inn til en viss grense. For kort oppholdstid kan føre til utvasking av viktige mikroorganismer (Fjørtoft et al., 2014, side 25). Ofte trengs lengre oppholdstid ved mesofil temperatur sammenlignet med termofil (Schnürer & Jarvis, 2009, side 38).

4.5 Biogassanleggets konstruksjon og virkemåte

Biogassanlegg kan være utformet på mange måter. Det er vanskelig å gi en generell forklaring på biogassanleggets funksjon og virkemåte. Derfor har jeg valgt å gi en kort beskrivelse av funksjonen og virkemåten til biogassanlegget på Tomb videregående skole.



Figur 2. Biogassanlegget på Tomb videregående skole, av forfatteren, 2015.

Biogassanlegget på Tomb består av et pumpehus, en fortank for storfe gjødsel (130 m^3), teknisk rom, et lager for matavfall (55 m^3), to nedgravde reaktorer (170 m^3 hver) og et sluttlager.

- Fra fjøset pumpes storfe gjødsel gjennom pumpehuset inn til fortanken.
- Biogassanlegget tar imot hygienisert matavfall som lagres i et forlager.
- Fra fortanken og matavfallstanken pumper ei dreiestempelpumpe (fortrengningspumpe) matavfall og storfe gjødsel inn i reaktorene.
- Reaktorene er oppholdsstedet for den anaerobe nedbrytningen. De er utstyrt med ei varmesløyfe i bunnen, en propell til omrøring og en vannlås i toppen rundt kanten. Toppen av reaktoren er dekket av en duk, laget i polyvinylklorid (PVC). Duken og det resterende volumet over substratet fungerer som et gasslager.
- Biogassen ledes til og brennes fortløpende i en gassbrenner. Varmeenergien brukes til å varme opp vann. Varmt vannet brukes til oppvarming av internatet gjennom et fjernvarmeanlegg og til forbruksvann. I tillegg går det varmesløyfer til oppvarming av reaktorene og fortanken.
- Den ferdig råtnede bioresten pumpes med den samme dreiestempelpumpa til sluttlageret. Det brukes en hydraulisk oppholdstid på 22-23 dager.

4.6 Reaktortyper

Nedenfor er de vanligste typene reaktorer beskrevet. I litteraturen kategoriseres sjelden reaktorene ut i fra form og fasong, men i større grad ut i fra virkemåte og funksjon. De kan deles inn etter: 1) hvor ofte substrat tilføres, 2) hvor mange reaktorer biogassprosessen går over, 3) tørrstoffinnhold i substratet.

4.6.1 Porsjonsreaktor, semikontinuerlig- og kontinuerlig substrattilførsel

I første omgang kan reaktorene beregnet for pumpbart organisk materiale deles inn i tre typer etter hvor ofte substratet tildeles reaktoren: porsjonsreaktor, semikontinuerlig substrattilførsel og kontinuerlig substrattilførsel.

I en *porsjonsreaktor* fylles reaktoren med biomasse, og råtningsprosessen går sin gang. Det blir ikke tilført eller fjernet noe biomasse. Når metanproduksjonen avtar, tømmes reaktoren og ny biomasse fylles oppi (Schnürer & Jarvis, 2009, side 28; Ward, Hobbs, Holliman & Jones, 2008, side 7929). Uten en lånt startkultur fra allerede opererende biogassreaktor, vil biogassprosessens bakterier måtte etableres på nytt for hver gang reaktoren tømmes. Metanproduksjonen er ofte høyest i starten når de riktige mikroorganismene har etablert seg. I porsjonsreaktoren har mikroorganismene god tid til å bryte ned substratet. Metoden utnytter det organiske materialet godt, men er trolig den minst effektive metoden med tanke på biogassutbytte.

Med *semikontinuerlige substrattilførsel* er det utskifting av substrat med jevne mellomrom (Ward, et al., 2008, side 7929). Sammenlignet med porsjonsreaktoren, vil denne metoden gi mer effektiv produksjon av biogass. Med semikontinuerlig substrattilførsel oppnås en jevn og enhetlig tilførsel av næring til mikroorganismene. Dette hjelper samspillet mellom ulike mikroorganismer, og holder produksjonen av biogass på et jevnt nivå. Det reduserer også risikoen for at mikroorganismene blir overbelastet av for mye substrat på en gang (Schnürer & Jarvis, 2009, side 27).

Med *kontinuerlig substrattilførsel* er det en jevn tilførsel av substrat hele tiden. Dette brukes gjerne der organisk materiale har tørrstoffinnhold under 5%, for eksempel til behandling av kloakk-slam (Schnürer & Jarvis, 2009, side 27). Sjansen for utvasking av metanproduserende mikroorganismer er større i reaktorer med kontinuerlig tilførsel av substrat. Ofte brukes et

bærermateriale som mikroorganismene skal kunne vokse i klynger på. Dette kan for eksempel være granuler, plast, glass, biofilm eller strå.

Porsjonsreaktorer har ustabil produksjonsmengde av biogass. Mange av energiforbrukene (for eksempel drivhus eller oppvarming av grisehus) som er aktuelle i landbruket, skal ofte innvirke i andre biologiske prosesser eller tørking av biologiske produkter. Dette krever en sikker og stabil biogassproduksjon og gjør porsjonsreaktoren mindre aktuell. Skal derimot biogassanlegget brukes som et selvforsynt ugrasbekjempelsesanlegg, er porsjonsreaktoren enkel og på mange måter driftssikker. Semikontinuerlig substrattilførsel gir en jevn biogassproduksjon og har liten sjanse for utvasking av mikroorganismer. Semikontinuerlig tilførsel er derfor svært aktuelt i biogassanlegg som skal forsyne energiforbrukene i landbruket.

4.6.2 Ett-, to- og flertrinnsprosess

Videre kan reaktorene deles inn i ett-, to- og flertrinnsprosess.

I en *ettrinnsprosess* skjer hydrolysen, fermenteringen, den anaerobe oksidasjonen og metanogenesen i en og samme reaktor. Metoden er enkel, funksjonell og har den laveste investeringskostnaden, men vil trolig gi mindre biogass enn en tottrinnsprosess (Schnürer & Jarvis, 2009, side 28; Ward et al., 2008, side 7929).

I en *tottrinnsprosess* deles biogassprosessen i to. For eksempel kan hydrolysen og fermenteringen skje i en reaktor (disse to prosessene kan fint operere sammen). Deretter pumpes substratet til en annen reaktor, der den anaerobe oksidasjonen og metanogenesen skjer. Disse to prosessene fungerer også godt sammen. Nedbrytningsprosessen deles i to fordi hydrolysen/fermenteringen og anaerob oksidasjon/metanogenese fungerer optimalt i ulike miljø (Ward et al., 2008, side 7929).

I en *flertrinnsprosess* deles prosessen ytterligere inn i tre eller fire separate prosesser. En flertrinnsprosess kan korte ned den hydrauliske oppholdstida, og øke metaninnholdet i biogassen (Kim, Park, Kim, Cho, Chun, Lee, Lee, Park, Park, 2000, side 738). Ulempen med en flertrinnsprosess er hovedsakelig investeringskostnadene.

Skal det lønne seg å investere i to- eller flertrinnsprosess for småskala biogassproduksjon, må det økte biogassutbyttet kunne dekke opp for investeringskostnadene. En ettrinnsprosess vil i mange tilfeller være godt nok for små gårdsbaserte biogassanlegg.

4.6.3 Våt og tørr reaktor

I våtreaktorer behandles organisk materiale med under 15% tørrstoff (Schnürer & Jarvis, 2009, side 29). Ofte samrâtnes husdyrgjødsel eller avløpsvann med substrater med høyt innhold av tørrstoff. Bufferkapasiteten og den utvannende effekten til grunnsubstratene gjør at pH holdes stabil, og at opphopning av langkjeda fettsyrer og ammoniakk unngås. Med lavt innhold av tørrstoff kommer også noen ulemper. Mye vann må varmes opp. En våtreaktor har et vesentlig høyere energibehov enn en tørr reaktor. I tillegg må reaktorvolumet bygges større for å få samme biogassutbytte.

Biogassproduksjon av organisk materiale med over 15% tørrstoff kan gjøres på to måter: materialet kan kvernes og blandes med vått organisk materiale, eller materialet kan nedbrytes i en tørr reaktor. I tørre reaktorer brukes gjerne en batch-prosess der organisk materiale byttes en gang i måneden. Noe av det råtnede materialet legges igjen eller pumpes inn på nytt som startkultur for det nye substratet. For å opprettholde god mikrobiell aktivitet bør tørrstoffinnholdet ikke overstige 35% (Schnürer & Jarvis, 2009, side 29 og 30). Et substrat med høyt tørrstoffinnhold vil naturlig nok ikke ha det samme oppvarmingsbehovet som et substrat med lavt tørrstoffinnhold. Biogasspotensialet er som regel også høyt, ettersom substrat som er rike på tørrstoff ofte har høyt biogasspotensial.

Valget mellom våt eller tørr reaktor avhenger av hvilket substrat man har tilgang til og dets tørrstoff. Våtreaktorer er desidert mest utbredt, men tørre reaktorer er et godt alternativ med flere fordeler.

4.7 Netto energiproduksjon

Den totale netto energiproduksjonen er av vesentlig betydning for totaløkonomien på gårdsbaserte småskala biogassanlegg. Flere aspekter har betydning for biogassreaktorens energiutbytte: valg av reaktortemperatur, omrøring, pumping, transmisjonsvarmetap, oppvarming av nytt substrat, type substrat og substratblandinger. Valg av byggematerialer og utforming av reaktoren har noe mindre innvirkning på energieffektiviteten.

4.7.1 Valg av reaktortemperatur

Flere ting må tas hensyn til ved valg av reaktortemperatur: oppvarmingsbehov av nytt substrat, transmisjonsvarmetap, biogassutbytte, gjødselkvalitet og biogassprosessens stabilitet. Selv om

metan kan dannes fra 0-98°C, brukes i praksis mesofil og termofil driftstemperatur mye på gårdsbaserte biogassanlegg. Begge driftstemperaturer har både fordeler og ulemper.

Mesofile biogassanlegg bruker ofte en temperatur på 30-40°C (Levén, Erikson, & Schnürer 2007, i innledning). Den største fordelene med en mesofil driftstemperatur er at den har lavere oppvarmingsbehov av substrat, og lavere transmisjonsvarmetap gjennom reaktorens overflate, sammenlignet med termofil driftstemperatur (Zupančič & Roš, 2003, side 2257). I en reaktor med mesofil driftstemperatur, finnes det gjerne mange arter av mikroorganismer representert. Det store mangfoldet gjør at floraen av mikroorganismer er bedre utrustet til å tåle forandringer av miljøet i reaktoren (Schnürer & Jarvis, 2009, side 32).

Termofile biogassanlegg bruker ofte en driftstemperatur på 50-60°C (Levén et al. 2007, i innledning). Termofil driftstemperatur brukes mest på større biogassanlegg (Sánchez, Borja, Weiland, Travieso & Martín, 2000, i innledning). En termofil biogassprosess krever veldig stabil temperatur. Om temperaturen økes et par grader, kan det føre til forstyrrelser i prosessen (Schnürer & Jarvis, 2009, side 32). Den høye temperaturen, ofte i kombinasjon med høy pH, danner også mer ammoniakk enn mesofile anlegg (Schnürer & Jarvis, 2009, side 32). Ved termofil temperatur jobber mikroorganismene fortere, og bryter ned mer organisk materiale på kortere tid (Schnürer & Jarvis, 2009, side 31; Moset, Poulsen, Wahid, Højberg & Møller, 2015, i sammendrag; Zupančič & Roš, 2003, side 2266). Forsøk har vist at biogassutbyttet er større på anlegg som jobber med termofil driftstemperatur (Sánchez et al., 2000, side 248). Det er også påvist at metaninnholdet i biogassen blir høyere ved råtning i termofilt temperaturområde (Vindis, Mursec, Janzekovic & Cus, 2009, side 197; Moset et al., 2015, i sammendrag).

Etter biogassprosessen er bioresten av flere grunner blitt en bedre gjødsel. Temperatur og pH har innvirkning på biorestens gjødselkvalitet. Under enkelte forhold vil høyere temperatur akselerere omdanningen av organisk nitrogen og fosfor. Samme effekt vil også oppstå ved lavere pH (Sánchez et al., 2000, side 248). Både termofil og mesofil temperatur gir bioresten en god gjødselkvalitet, termofil noe mer effektiv enn mesofil. Dersom den hydrauliske oppholdstiden går over 11 dager (som den ofte gjør), vil begge temperaturområder inaktivere det meste av ugrasfrø (Johansen et al., 2012, side 807 og 809).

Valg av driftstemperatur på gårdsbaserte biogassanlegg må tas for hver enkelt situasjon. Mengden av tilgjengelig substrat, tørrstoffinnhold, potensielt biogassutbytte, klima og andre faktorer gir føringer for valg av temperatur. Valg av temperatur bør resultere i størst mulig

netto energiutbytte. Det kan skje både gjennom lavere energitap eller høyere metanproduksjon. Temperaturvalget har innvirkning på investeringsbehovet, spesielt med tanke på isolasjonsbehov og eventuell investering i varmeveksler. At anlegg med termofil temperatur er mindre stabile, bør også tas med i vurderingen. Gjødselekvaliteten blir god både i mesofilt og termofilt temperaturområde. Derfor bør gjødselekvalitet ikke ha så stor innvirkning på valget.

4.7.2 Omrøring

De fleste reaktorer bør ha en omrøringsmekanisme. For eksempel propell, padleomrøring eller hydraulisk omrøring (pumping). Viktige kriterier for omrøringsmekanismen er at den blander substratet godt, er energieffektiv og driftssikker. Omrøringen skal homogenisere substratet og forhindre bunnfelling, skumdannelse, lagdeling og flytelag. God omrøring er viktig for at hydrolysebakteriene skal få god kontakt med mange organiske molekyler i reaktoren. Omrøring hjelper også utveksling av hydrogengass mellom bakteriene fra den anaerobe oksidasjonen og de metanproduserende arkene. Omrøringen bør være skånsom. Ofte lever mikroorganismene i aggregater som forenkler samspillet deres (Schnürer & Jarvis, 2009, side 39). Stroot, McMahon, Mackie & Raskin (2000, side 1804) konkluderte med at redusert omrøring ga høyere metanproduksjon og en mer stabil prosess enn kontinuerlig omrøring. Dette har også Kaparaju, Buendia, Ellegaard & Angelidakia (2007, side 4922) kommet fram til: minimal omrøring (10 minutt, to ganger i døgnet) gav en økning i biogassproduksjonen på 12,5%, sammenlignet med kontinuerlig røring.

Hvilken effekt røringen har, avhenger av substratets tørrstoffinnhold. Forsøk gjort av Karim, Hoffmann, Klasson, & Al-Dahhan (2005, side 3597) viste at omrøring hadde liten effekt på biogassproduksjonen i substrater med 5% tørrstoffinnhold. I substrater med 10-15% tørrstoff økte biogassproduksjonen med 10-30% da substratet ble rørt.

Det kan lønne seg å senke omrøringen til et minimum. Kanskje så lavt som 10 minutter, to ganger i døgnet. Så lenge minimal omrøring ikke gir praktiske problemer som flytelag, lagdeling eller skumdannelse vil den ha positive effekter. En minimal omrøring vil naturlig nok også gi lavere strømforbruk, og mindre slitasje på omrøringsmekanismen.

4.7.3 Pumpeintervall

Det kan stilles spørsmål om hvor ofte substrat bør tilføres biogassreaktoren. Lübken, Wichern, Schlattmann, Gronauer & Horn (2007) gjorde simuleringer og forsøk på biogassutbytte og metaninnhold ved varierte tilførselsintervaller. Til å begynne med, ble bare storfe gjødsel brukt som substrat. Substratet ble på det minste tilført en gang om dagen, seks ganger i uka. På det meste 24 ganger om dagen, sju ganger i uka. Netto energiutbytte var høyest der storfe gjødsel ble tilført en gang om dagen, seks ganger i uka. Da de tilsatte rapsolje i storfe gjødsel, viste simuleringene noe helt annet. De så en betraktelig økning i metanutbytte da det fettrike substratet ble tilført hyppigere. Det ble konkludert med at arkene fungerer bedre når fettrike substrat tilføres i mindre porsjoner av gangen. Dette begrunnes med at pH holdes mer stabil, og at nedbrytningen av substrat er jevnere (Lübken et al., 2007, side 4094 og 4095). Francese, Aboagye-Mathiesen, Olesen, Córdoba & Siñeriz (1999, side 149) gjorde et lignende forsøk der substratet var svine gjødsel, fiskeolje og avfall fra en oljefiltreringsprosess. I dette forsøket ga tilføring av substrat to ganger i døgnet høyere metanutbytte enn da substratet ble tilført en og fire ganger i døgnet.

Hvor hyppig substratet bør tilføres avhenger mye av fettinnholdet. Fettrike substrat bør tilføres hyppigere enn substrater med lite innhold av fett.

4.7.4 Valg av forutsetninger for beregninger på fiktiv biogassreaktor

For å kunne regne på og vurdere ulike metoder for energieffektivisering, må det settes noen forutsetninger. Det må defineres hvor stort det gjennomsnittlige gårdsbaserte biogassanlegget i Norge egentlig er, og hvilke organiske materialer som skal råtne.

Slaktegris- og melkeproduksjon er produksjoner der det er veldig aktuelt med biogassproduksjon. Disse driftsformene har store volum husdyr gjødsel som er pumpbare og ofte lett tilgjengelig. En del kjøttfeproduksjon har også gode forutsetninger for biogassproduksjon. Fjorfe gjødsel har også potensial, men gjødsels tørrestoffinnhold krever løsninger som kan blande ut gjødsel, eller det må brukes tørr reaktor.

I denne oppgaven er det valgt å regne på en fiktiv biogassreaktor som rommer aktuelle gjødselmengder for det gjennomsnittlige løsdriftsfjøset med melkerobot.

Med bakgrunn i endringer i forskrift om hold av storfe § 7 sjette ledd, inntreer løsdriftskravet i 2024 eller 2034 (uavklart i skrivende stund). Det vil derfor være naturlig å bruke størrelsen på gjennomsnittsbuskapen i løsdriftsfjøs som forutsetning for gjødselmengdene reaktoren skal dimensjoneres for. Løsdrift med automatisk mjølkesystem er per mars 2016 på 48,9 kyr i snitt (personlig kommunikasjon Lars Erik Ruud, tall fra Olav Østerås, Tine). Dette danner grunnlaget for videre beregninger. Gjødselmengden vil være avhengig av avdråttsnivå. Ved nybygging til melkeku anbefales det å dimensjonere for 2,0 m³ gjødsel per måned og mjølkeku (Ruud, Stokke, Bøe, Hettasch & Skjølberg, 2015, side 91). Dersom kyrne går inne 10 måneder i året, vil en besetning på 49 kyr gi rundt 980 m³ gjødsel per år. Dersom det i tillegg føres opp 25 kvigekalver til påsett og livdyrsalg, og okser selges ved 6 måneders alder, kan vi legge til 480 m³. Totalt vil et vanlig robotfjøs i Norge gi om lag 1500 m³ storfegjødsel per år.

I tillegg forutsetter vi at det tilsettes 20% matavfall til husdyrgjødsel. $1500 \text{ m}^3 \cdot 1.2 = 1800 \text{ m}^3$. En reaktor for et gjennomsnittlig robotfjøs må altså ha kapasitet til 1800 m³ organisk materiale i året.

Vi forutsetter videre at det brukes en hydraulisk oppholdstid på 25 dager, og at anlegget har 350 driftsdager i året. $350 \text{ dager} / 25 \text{ dager} = 14$. Reaktoren vil i teorien fylles og tømmes 14 ganger i året. $1800 \text{ m}^3 / 14 = 128,57 \text{ m}^3 \approx 129 \text{ m}^3$. Reaktoren må ha plass til 129 m³ organisk materiale. Reaktoren kan naturlig nok ikke være fylt helt til randen. Det kan også komme regn i fortanken. Derfor tillegges 15% ekstrarom. $129 \text{ m}^3 \cdot 1,15 = 148 \text{ m}^3 \approx \underline{150 \text{ m}^3}$. En biogassreaktor for et gjennomsnittlig norsk robotfjøs kan altså være rundt 150 m³.

For at omrøringen i reaktoren skal fungere optimalt, bør reaktoren være sylindrisk. Forholdet mellom høyden og bredden på reaktoren skal helst være slik at høyden på reaktoren er 1,5 ganger bredden (Svahn, 2006, side 24). Derfor blir diameteren på reaktoren 5 meter, og høyden 7,65 meter.

Forutsetningene kort oppsummert:

- Melkekuproduksjon, 49 kyr og 25 kviger
- 1500 m³ storfegjødsel, 300 m³ matavfall, 1800 m³ totalt
- Hydraulisk oppholdstid på 25 dager
- Reaktorvolum 150 m³
- Diameter 5 meter, høyde 7,65 meter

4.7.5 Varmetap ved mesofil reaktortemperatur og ulike byggematerialer

Når det kommer til bygging av gårdsbaserte biogassanlegg, er Norge i en særstilt posisjon. Det finnes få land som har samme forutsetninger. Nordlige deler av Sverige har ganske likt klima, men vesentlig større driftsenheter, og naturlig nok større biogassanlegg. Små biogassreaktorer som er aktuelle for norske husdyrbruk, har stor overflate i forhold til volum og produsert energi. Varmetap per kubikkmeter reaktorvolum synker drastisk med økning i reaktorvolumet (Svahn, 2006, side 38).

Varmetapsberegninger med ulike isolasjonstykkelser og to ulike byggematerialer er gjort for å finne ut hvor tykt reaktoren bør isoleres, og hvilket byggemateriale som kan være gunstig å bruke. For at de ulike kombinasjonene av byggematerialer og isolasjonstykkelser skal være sammenlignbare, må et par grunnforutsetninger som er like for de to regneeksemplene settes:

Sylindrisk reaktor, diameter 5 meter, høyde 7,65 meter, armert betongsåle 15 centimeter, markisolering 15 centimeter ekstrudert polystyren (markisoleringens tykkelse øker i takt med vegger og topplokk etter passerte 15 cm). Isoleres med 0-45 centimeter ekstrudert polystyren. Kles med PVC-duk innvendig. Det monteres ei blikkplate utenpå reaktorene for beskyttelse av isolasjonen mot vær og vind.

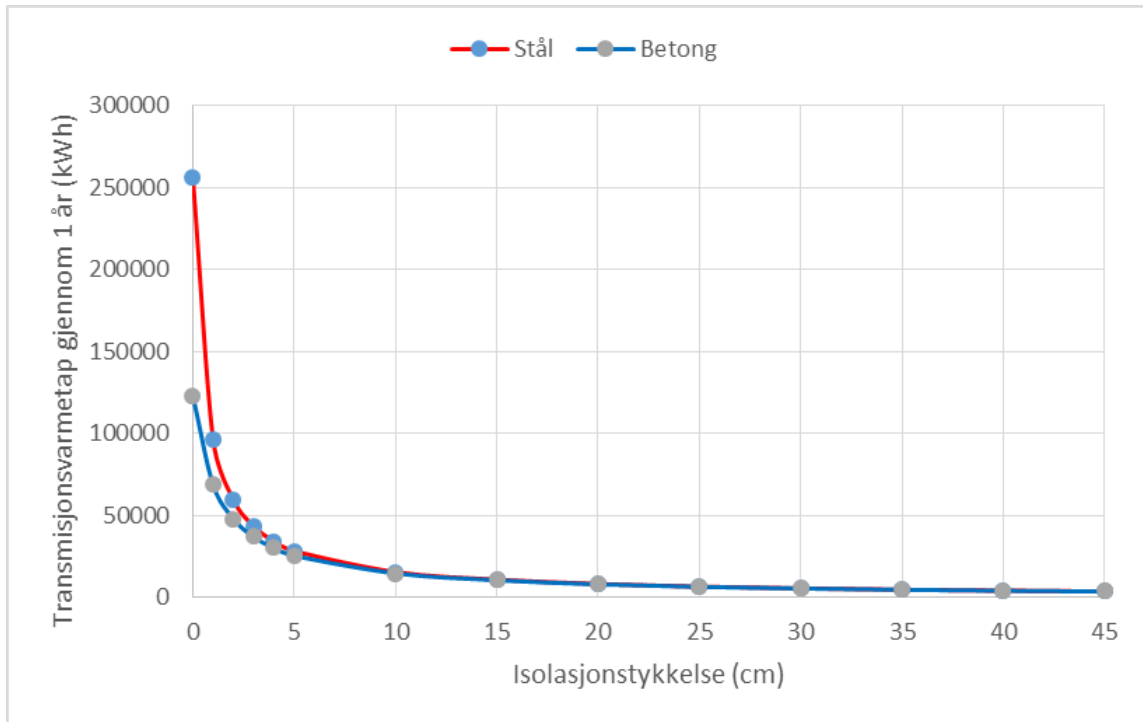
Forskjellen på de to reaktorene blir at den ene er bygd i 20 cm tykk betong, mens den andre er bygd i 3,5 cm tykt stål.

For enkelhets skyld tas ikke varmetap via vannlås eller rør for inngående og utgående substrat med i beregningen. Ved beregninger av transmisjonsvarmetap, brukes en gjennomsnittlig utetemperatur på 1°C (Yr, s.a.). Over tid vil pukk og jordmasser under reaktoren varmes, og gi en slags isolasjonseffekt. Det forutsettes at varmen fra reaktoren gir underliggende pukk- og jordlag 4°C temperaturøkning.

I tillegg er følgende forutsetninger satt for beregningene av transmisjonsvarmetapet:

- λ varmekonduktivitet isolasjon 0,036 W/mK
- λ varmekonduktivitet betong 1,1 W/mK
- λ varmekonduktivitet stål 47 W/mK

Lambdaverdiene λ (varmekonduktivitet) er hentet fra tekniske tabeller (Johannessen, 1995, side 24 og 25).



Figur 3. Varmetap i stål- og betongreaktor ved ulike isolasjonsmengder (0-45 cm) ved 37°C reaktortemperatur.

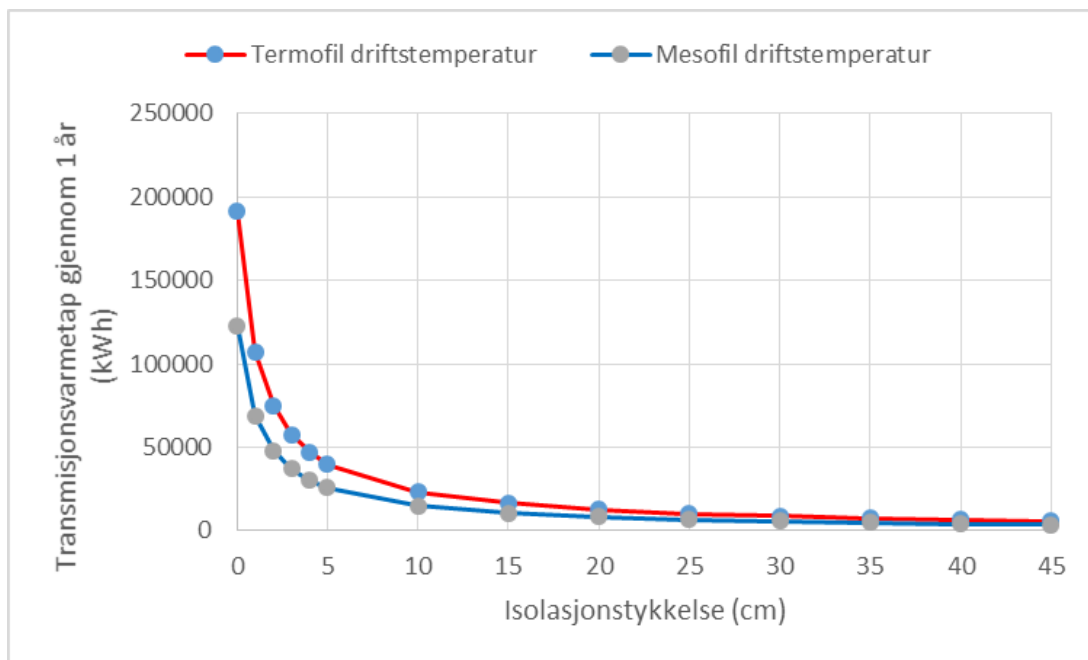
Varmetapet synker drastisk med de første 5 centimeterne isolasjon. Uisolerte reaktorer bygd i stål har et høyere transmisjonsvarmetap enn uisolerte reaktorer bygd i betong. I reaktorer med mer enn 5 centimeter isolasjon har forskjellen i varmekonduktivitet mellom byggematerialene lite å si for det totale transmisjonsvarmetapet (figur 3).

Varmetapsberegningene er teoretiske. De gir en pekepinn på transmisjonsvarmetapet ved ulike isolasjonstykkelser og byggematerialer. I virkeligheten vil den reelle utetemperaturen, kuldebroer, solinnstråling og andre faktorer virke inn på transmisjonsvarmetapet.

4.7.6 Sammenligning av varmetap ved termofil og mesofil reaktortemperatur

I en reaktor med termofil driftstemperatur vil transmisjonsvarmetapet være større, da differansen mellom utetemperatur og reaktortemperatur er høyere. Det ble gjort

varmetapsberegninger for ulike isolasjonstykkelser. Det ble satt like forutsetninger som for betongreaktoren i kapitlet *Varmetap ved mesofil reaktortemperatur og ulike byggematerialer*. Forskjellen på forutsetningene var at reaktortemperaturen var satt til 57°C i disse beregningene.



Figur 4. Transmisjonsvarmetap ved ulike reaktortemperatur (37 og 57°C), og ulike isolasjonstykkelser (0-45 cm)

Transmisjonsvarmetapet er noe høyere i reaktorer med termofil driftstemperatur sammenlignet med mesofil. Med 10 cm isolasjon vil differansen i dette tilfellet ligge på 8277 kWh, mens det ved 20 cm isolasjon ligger på 4555 kWh per år (figur 4).

4.7.7 Byggematerialer

Biogassreaktorer kan bygges i stål, betong, hardplast eller andre tilstrekkelig tette og solide materialer. Byggematerialet vil ha innvirkning på anleggets investeringskostnad og holdbarhet.

I reaktorer med isolasjonstykkelse tykkere enn 5 centimeter, har byggematerialer svært lite å si for transmisjonsvarmetapet (figur 3). Materialets varmekonduktivitet bør ikke ha stor

innvirkning på valg av byggemateriale. Det bør heller ses på byggekostnaden til materialet og dets holdbarhet.

4.7.8 Oppvarming

1800 m³ organisk materiale skal varmes opp. For å beregne substratets oppvarmingsbehov, brukes vannets spesifikke varmekapasitet i beregningen. Vann har en spesifikk varmekapasitet på 4183 J/kelvin·kilo (Grøn, 2009). Det forutsettes fortsatt en årsmiddeltemperatur på 1°C. Inngående substrat vil da ha gjennomsnittlig temperatur på 1°C gjennom året. Substratet skal varmes opp til 37°C.

4183 J · ΔK · Kilo substrat

4183 J · 36 kelvin · 1 800 000 kilo substrat = 271 058 400 000 J

271 058 400 000 J / (3 600 s/time · 1000 W/kW) = 75 294 kWh

Av beregningen ser vi at en stor andel av det interne termiske forbruket går til oppvarming av nytt substrat. I en mesofil betongreaktor der alle flater er isolert med 20 centimeter, vil rundt 89% av internt termisk energiforbruk gå til oppvarming av substrat.

Ved beregning av oppvarmingsbehov ved termofil driftstemperatur brukes den samme regnemethoden.

4183 J · ΔK · Kilo substrat

4183 J · 56 kelvin · 1 800 000 kilo substrat = 421 646 400 000 J

421 646 400 000 J / (3 600 s/time · 1000 W/kW) = 117 124 kWh

Med de gitte forutsetningene øker oppvarmingsbehovet med cirka 36% fra mesofil til termofil driftstemperatur. Noe som er spesielt utfordrende på kalde vinterdager, hvor forskjellen i temperatur vil være enda større.

4.7.9 Varmeveksler

For å spare energi, kan en varmeveksler installeres for å utnytte varmforskjellen mellom inngående og utgående substrat. Zupančič & Roš (2003, side 2266) kom fram til at ved effektiv bruk av varmeveksling, kunne en termofil biogassreaktor ha samme oppvarmingsbehov av substrat som en mesofil reaktor uten varmeveksler.

For å kunne gjøre en vurdering av installasjon av varmeveksler, ble pris, produktspesifikasjoner og beregninger innhentet fra Skåland rør og industrimontasje AS. Det antas at en rørvarmeveksler av typen DTR 51/34 2.0 fra HRS installeres for varmeveksling mellom utgående og inngående substrat. For vurderingen brukes de samme forutsetningene som beskrevet i kapitlet *Valg av forutsetninger for beregninger på fiktiv biogassreaktor*. Det forutsettes at inngående substrat har en temperatur på 1°C og utgående substrat 37°C.

I beregningen fra Skåland kommer det fram at denne varmeveksleren vil gi en energibesparelse på 80 kWh daglig. Dette tilsvarer en temperaturøkning på inngående substrat med 14°C. På ett år vil energibesparelsen bli 28 000 kWh, en betydelig energibesparelse. Installasjon av varmeveksler vil i dette regneeksempelet senke det årlige oppvarmingsbehovet av substrat fra 75 294 til 47 294 kWh.

4.8 Utforming av biogassreaktoren

Det jobbes mye med å utarbeide biogassanlegg som er billige og godt egnede for norske forhold. Både på NMBU og Høgskolen i Sørøst-Norge (tidligere Høgskolen i Telemark) er det utarbeidet ulike løsninger.

I de mer tradisjonelle biogassreaktorene kan utformingen variere med forholdet mellom høyde og bredde. Det kan også variere om det brukes eksternt gasslager eller om tomrommet over substratet brukes som gasslager.

4.8.1 Telemarksreaktoren

I Telemark er det konstruert en liten UASB-reaktor (upflow anaerobic sludge blanket). Denne skal senke kostnadsnivået ved bygging av biogassanlegg. UASB-reaktorer brukes ofte på avløpsvann eller andre substrat med lavt tørrstoffinnhold. Substratet pumpes inn i bunnen av reaktoren. Oppover i reaktoren ligger et bærer materiale (granulat) som mikroorganismene kan

vokse i klynger på (Schnürer & Jarvis, 2009, side 38). Utgående substrat går ut i toppen av reaktoren. Gassbobler og trykk fra innpumpingen skal gi tilstrekkelig omrøring i reaktoren til at nytt substrat kommer i kontakt med mikroorganismer. Ved hjelp av bærer materialet, kan UASB-reaktoren behandle store mengder substrat selv med et lite reaktorvolum. For at husdyrgjødsel skal være tynn nok, separeres tørrstoffet fra den flytende delen av gjødsel. Den flytende delen behandles i UASB-reaktoren. Svakheten med metoden er at en stor andel av biogasspotensialet i husdyrgjødsel ligger i tørrstoffet. Reaktoren utnytter altså gjødsels potensial dårligere enn reaktorer som også behandler tørrstoffet i gjødsel.

4.8.2 Antec/Ås-reaktoren

På Ås har de gått for en litt annen variant. Antec, NMBU og NIBIO har med Uno Andersens idé, utviklet en reaktor der en flertrinnsprosess foregår inne i en og samme reaktor. Denne reaktoren har sylindrisk utforming i likhet med andre reaktorer, men den ligger horisontalt langsmed bakken. Reaktoren har flere kammer, og hvert av kamrene tar for seg et av nedbrytningsstegene hydrolyse, fermentering, anaerob oksidasjon og metanogenese. Substratet flyttes sakte gjennom kamrene. Når substratet kommer til enden, skal det være ferdig råtnet. Før substratet sendes inn i reaktoren, kvernes det til 0,6 cm store partikler. Inne i hvert kammer er det en biofilm som skal gi mikroorganismene gode vekstvilkår og sørge for stor overflate å vokse på (Dybdal, 2016; Lie, 2015).

4.8.3 Forholdet mellom høyde og bredde

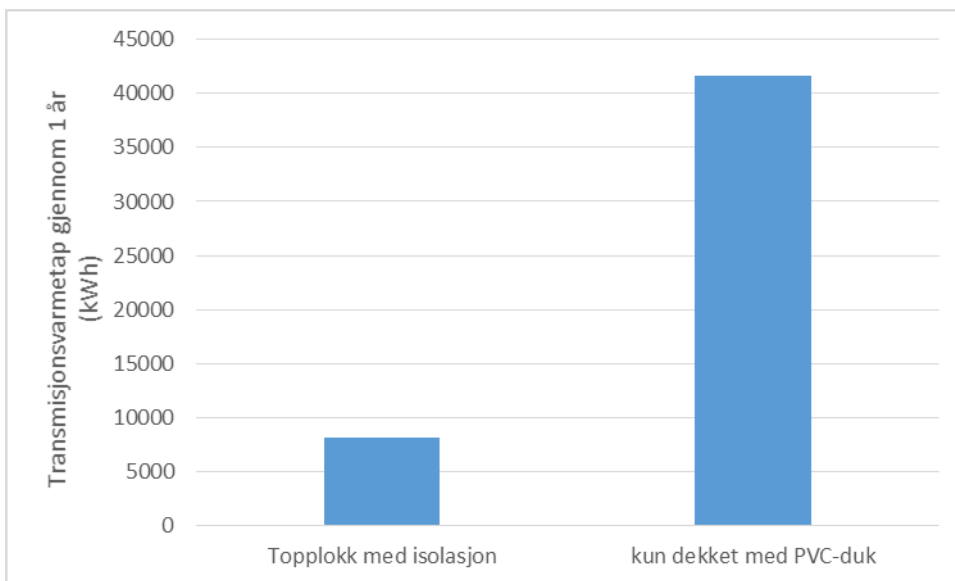
Forholdet mellom høyde og bredde på reaktoren kan ha betydning for transmisjonsvarmetapet. Et forhold der høyden er 1,5 ganger bredden er mye brukt på biogassreaktorer. Denne utformingen skal gi en optimal omrøring (Svahn, 2006, side 24). Svakheten med denne utformingen er at veggene må konstrueres sterkere og det blir et litt større transmisjonsvarmetap fra veggene. Svahn (2006, side 37) har gjort noen beregninger der ulike forhold mellom høyde og bredde ble sammenlignet. I beregningene kom det fram at et forhold der høyden var 0,75 ganger bredden ga minst transmisjonsvarmetap. Det er viktig å påpeke at dette var beregninger gjort på en spesifikk reaktor med noen gitte forutsetninger. Beregninger med andre forutsetninger kan vise noe annet. Svahn konkluderte med at energiinnsparingene ved å bygge reaktoren bredere var små, og omrøring burde heller prioriteres.

4.8.4 Reaktor med eksternt eller internt gasslager

Ved å legge et dobbelt lag PVC-duk på toppen av reaktoren, kan tomrommet over substratet brukes som gasslager. Man slipper å ha en ekstern ballong eller gassklokke. Dette kan være med på å senke investeringskostnadene. Metoden er blant annet brukt på biogassanlegget på Tomb videregående skole. Svakheten med en slik løsning er PVC-dukens dårlige isoleringsevne.

Det ble gjort varmetapsberegninger for å finne ut hvor stort transmisjonsvarmetap denne løsningen medfører, sammenlignet med en reaktor med isolert topplokk.

I denne beregningen brukes de samme forutsetningene som beskrevet i kapitlet *Valg av forutsetninger for beregninger på fiktiv biogassreaktor*. Det beregnes varmetap for to reaktorer bygd i betong med 20 cm isolasjon i vegger og bunn. Forskjellen på de to, er at den ene har topplokk med 20 cm isolasjon, mens den andre kun har en topp-duk laget i PVC.



Figur 5. Varmetapsberegninger for reaktor med eksternt og internt gasslager.

Ved å ha et fast topplokk med isolasjon istedenfor topp-duk, kan varmetapet med de gitte forutsetningene senkes med 33 578 kWh årlig. En betydelig energiinnsparing.

4.9 Økonomiske vurderinger

I de økonomiske vurderingene er besparelsene de ulike energieffektiviserende tiltakene gir, vurdert opp mot investeringskostnaden de medfører.

På grunn av inflasjon vil besparelsene som oppnås gjennom energieffektiviserende tiltak ikke være like mye verdt om 20 år, som de er den dagen investeringen blir gjort. Derfor er besparelsene over et tidsperspektiv på 20 år diskontert med en diskonteringsrente på 4%. Kraftprisene kan også endre seg over 20 år. Da framtidens kraftpriser vil være vanskelig å forutse, er det valgt en fast kraftpris på 0,5 kr/kWh.

4.9.1 Anbefaling av isolasjonstykkelse

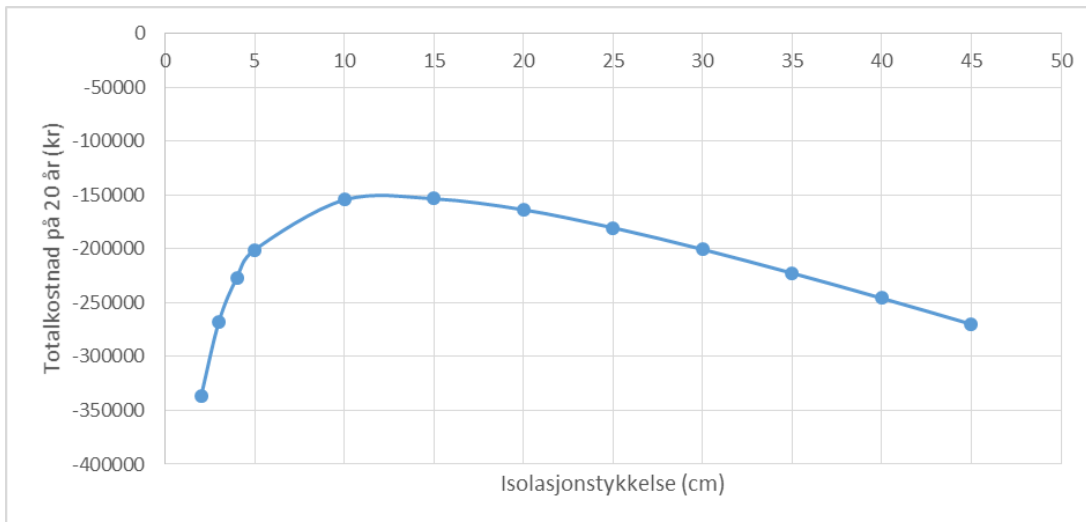
Gjennom tykkere isolering av reaktoren, synker de termiske energitapene, men tykkere isolering øker også investeringskostnaden til anlegget. Det gjelder derfor å finne en kostnadsoptimal isolasjonstykkelse.

For å kunne anbefale en isolasjonstykkelse for små biogassreaktorer i nordisk klima, ble det først gjort varmetapsberegninger for ulike isolasjonstykkelser (figur 3). Tallene fra disse beregningene er grunnlaget for den økonomiske analysen av forskjellige isolasjonstykkelser.

Det ble gjort flere netto nåverdi-beregninger, der den årlige kostnaden av transmisjonsvarmetapet ved ulike isolasjonstykkelser ble brukt som kontantstrøm. Netto nåverdien av kostnadene ble lagt sammen med investeringskostnaden på den aktuelle isolasjonstykkelsen. Til sammen gir dette et bilde av hva som kan være en kostnadsoptimal isolasjonstykkelse.

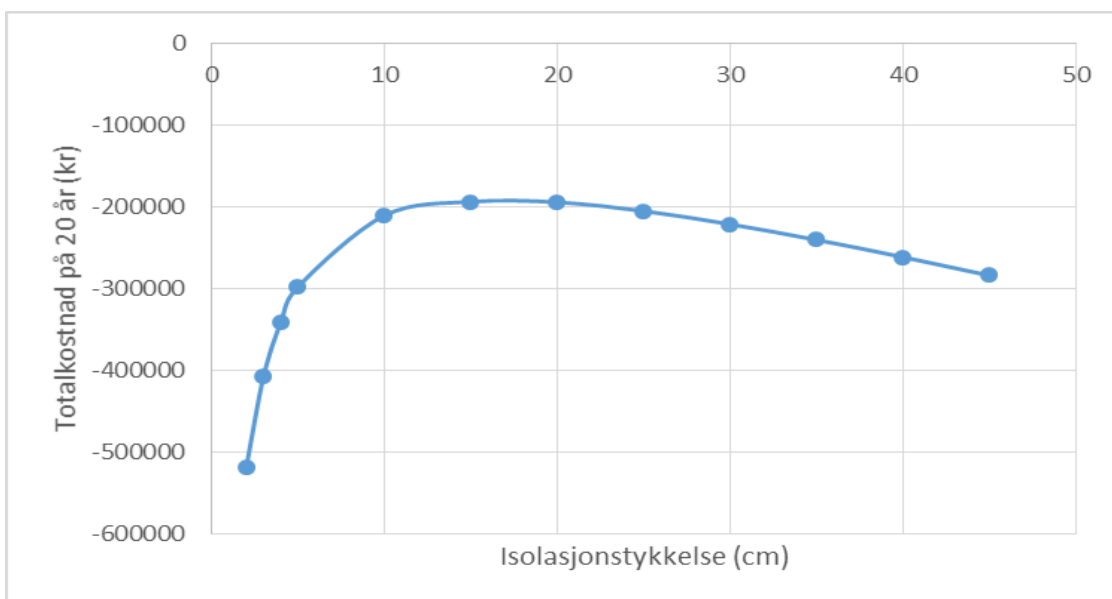
Følgende forutsetninger ble satt for de økonomiske beregningene:

- Kraftpris 0,5 kr/kWh
- Diskonteringsrente 4%
- Investeringens levetid 20 år
- Priser på ulike isolasjonstykkelser ble innhentet hos forhandler. Med arbeid regnes en pris på 3400 kr/m³ isolasjon.



Figur 6. Totalkostnad ved ulike isolasjonstykkelser (2-45 cm) i en mesofil betongreaktor (37°C).

Isolasjonstykkelsen har innvirkning på totaløkonomien til biogassanlegget. De første 10 centimeterne gir størst kostnadsreduksjon. Den kostnadsoptimale isolasjonstykkelsen ligger med de gitte forutsetningene på mellom 10 og 15 cm for reaktorer med mesofil driftstemperatur (figur 6).



Figur 7. Totalkostnad ved ulike isolasjonstykkelser (2-45 cm) i en termofil betongreaktor (57°C).

I den termofile biogassreaktoren ligger den kostnadsoptimale isolasjonstykkelsen med gitte forutsetninger på mellom 15 og 20 cm (figur 7).

4.9.2 Installasjon av varmeveksler

Det ble gjort en netto nåverdi-beregning for å sammenligne energibesparelsene ved installasjon av varmeveksler opp mot investeringskostnaden.

Forutsetninger:

- Kraftpris 0,5 kr/kWh
- Diskonteringsrente 4%
- Investeringsens levetid 20 år

Netto nåverdi-beregningen viser at installasjon av varmeveksleren gir en besparelse på 190 264 kr på 20 år. Prisen på varmeveksleren er 28 000 euro. Dersom 1 euro tilsvarer 9,3 kroner, vil prisen på varmeveksleren være 260 400 kr. Det vil ikke lønne seg å investere i denne rørvarmeveksleren til det gitte anlegget.

Svahn (2006, side 43) kom fram til at en investering i varmeveksler ville nedbetales i løpet av 1,5 år. Svahns beregninger var gjort for en reaktor på 5000 m³, 33 ganger større enn reaktorstørrelsen denne oppgaven tar for seg. Det var også medregnet varmeveksling fra hygieniseringsprosessen før biogassprosessen.

Om en installasjon av varmeveksler er lønnsom, avhenger mye av hvor mye biomasse som pumpes ut og inn av reaktoren. Det er ikke økonomisk bærekraftig å installere en rørvarmeveksler i biogassanlegg der reaktorvolumet er mindre enn 150 m³.

4.9.3 Økonomi for reaktor med eksternt gasslager

For å kunne beregne besparelsene ved å ha et isolert topplokk istedenfor topp-duk, ble det gjort varmetapsberegninger for de to alternativene. Disse beregningene gir grunnlaget for den økonomiske vurderingen.

Dersom biogassanlegget skal bygges med et isolert topplokk og eksternt gasslager, kreves det ekstra investeringer: topplokk, isolasjon over topplokket, ekstern gassballong og en container til å ha gassballongen i. Priser for gassballong og container medregnet arbeid, er innhentet hos

Nærenergi AS. Isolasjonspriser er innhentet hos Byggmakker. Topplokket settes til en pris på 40 000 kr.

Tabell 3. Priser på nødvendige byggelementer til eksternt gasslager (inklusive arbeid)

Byggeelement	Pris (kr)
Isolasjon	13 600
Topplukk	40 000
Container 10'	12 500
Gassballong	150 000
Sum	216 100

Det vil koste rundt 216 100 kr ekstra å ha et eksternt gasslager med de forutsetningene som er gitt.

Det ble gjort en netto nåverdi-beregning for å sammenligne energibesparelsene ved å ha eksternt gasslager og isolert topplukk opp mot investeringskostnaden på 216 100 kr.

Følgende forutsetninger settes for beregningene:

- Kraftpris 0,5 kr/kWh
- Diskonteringsrente 4%
- Investerings levetid 20 år
- Det antas en årlig besparelse på 16 789 kr

Beregningen viser at ved å ha eksternt gasslager og isolert topplukk, kan energibesparelsene utgjøre rundt 228 000 kr på 20 år.

For dette eksempelet var besparelsene ved å bruke et eksternt gasslager og isolert topplukk små. Med økte kraftpriser vil et slikt tiltak ha mer for seg.

4.10 Alternativ til småskala gårdsbasert biogassproduksjon

Denne oppgaven har tatt for seg hvordan energieffektivisering, drift og utforming kan gjøre gårdsbasert småskala biogassproduksjon lønnsomt. Et alternativ til små gårdsbaserte biogassanlegg er større sentrale biogassanlegg, der husdyrgjødsel transporteres inn fra flere gårder.

En utredning gjort av Olsson (2010, side 5), tok for seg potensialet for store fellesanlegg i fem kommuner i Midt-Norge. Utredningen viste at i de best egnede områdene i hver kommune, var potensialet for mellomstore biogassanlegg (15-40 GWh) stort. Rapporten viste i tillegg at flere gårdbrukere hadde potensiale for individuelle gårdsbaserte anlegg (>0,5 GWh). Det var ikke potensiale for veldig store sentrale biogassanlegg (>100 GWh). Siden 2010 har kraftprisene sunket en del (Statistisk Sentralbyrå, 2016). Lave kraftpriser sammen med generell prisstigning i samfunnet vil ha betydning for om prosjektene som den gang var lønnsomme, er lønnsomme i 2016.

Berglund & Börjeson (2003, side 14 og 30) har gjort en energivurdering, der de har beregnet direkte og indirekte energiforbruk og energibesparelser i biogassproduksjon. Vurderingen tar for seg de fleste faktorer, fra innsamling av organisk materiale til spredning av biorest og besparelser av kunstgjødsel. Utredningen viser at husdyrgjødsel kan transporteres om lag 200 km før netto energiutbytte av biogassproduksjonen blir negativt. Matavfall kan transporteres 440-680 km. Dette betyr ikke nødvendigvis at transporten er økonomisk bærekraftig. I følge Berglund & Börjeson er det kun transportavstander nærliggende 10-30 km som kan forsvares økonomisk.

Større fellesanlegg vil ha vesentlig mindre internt energiforbruk i forhold til produsert energi, sammenlignet med gårdsbaserte biogassanlegg. I følge Berglund og Börjeson (2003, side 9) vil mesofile gårdsanlegg i Sverige ha et gjennomsnittlig internt energiforbruk på 35% av produsert energi, mens store sentrale anlegg ikke krever mer enn 13%. Dette begrunnes med at gårdsbaserte anlegg ofte ikke har like mye isolasjon, og lite bruk av varmeveksling. I et rent energibalanseregnskap, kan denne differansen brukes for å dekke transport. I et økonomisk perspektiv må selvsagt investerings- vedlikeholds- og lønnskostnader for transport medregnes.

5. Overordnet diskusjon

I denne bacheloroppgaven er det benyttet litteratur og beregninger for å finne ut hvordan små biogassreaktorer i nordisk klima kan få høyere netto energiproduksjon.

Gjennom varmetapsberegninger og økonomiske analyser ble en kostnadsoptimal isolasjonstykkelse beregnet for mesofile og termofile reaktorer på 150 m³. Beregningene viser at mesofile reaktorer kan isoleres med mellom 10 og 15 cm, mens det kostnadsoptimale for termofile reaktorer var mellom 15 og 20 cm tykk isolasjon. I virkeligheten kan transmisjonsvarmetapet også bli påvirket av kuldebroer, solinnstråling, reel utetemperatur og andre faktorer. Lønnsomheten ved ulike isolasjonstykkelser kan påvirkes av fremtidige kraftpriser, anleggets faktiske levetid og økonomisk utvikling i samfunnet. Disse resultatene bør derfor ikke ses på som ens rådende anbefalinger, men mer som en grov pekepinn eller veiledning. Forfatteren har ikke klart å finne sammenlignbare forskningsresultater som har tatt for seg lønnsomheten av isolasjonsmengde for små biogassreaktorer.

Byggemateriale hadde liten innvirkning på transmisjonsvarmetap i reaktorer med isolasjon tykkere enn 5 cm. Valg av byggemateriale bør heller avhenge av pris, funksjonalitet og holdbarhet.

Å bruke et eksternt gasslager hadde lite for seg i beregningene som ble gjort i denne oppgaven. Mange faktorer kan ha innvirkning på det økonomiske resultatet i slike beregninger. For eksempel byggekostnader, kraftpriser og reaktorens forhold mellom høyde og bredde. Det store antallet av faktorer som innvirker økonomien, gjør at dette valget bør tas individuelt for hvert enkelt biogassanlegg som skal bygges. Det finnes også andre gasslagringsløsninger som denne oppgaven ikke har tatt for seg.

Hvor mye energi som går til oppvarming av substrat i en 150 m³ reaktor ble beregnet. Det viser seg at store deler av det interne energiforbruket går til oppvarming av substrat. Dette korresponderer godt med funnene til Fjørtoft et al. (2014, side 34). Installasjon av varmeveksler kan redusere oppvarmingsbehovet betraktelig. Den økonomiske analysen viser at det ikke vil være lønnsomt å installere varmeveksleren som ble vurdert i denne oppgaven, til reaktorer mindre enn 150 m³. Svahn (2006, side 43) kom fram til at en varmeveksler installert på en reaktor med 5000 m³ ville betale seg på 1,5 år. Mengden utgående og inngående biomasse vil ha stor betydning for om en varmeveksler lønner seg eller ikke.

Et litteratursøk ble gjort for å komme fram til en optimal strategi for omrøring, pumping og valg av reaktortemperatur.

Det viser seg at metanproduksjonen holdes høy selv om omrøringen senkes til et minimum. Så lenge den lave omrøringen ikke skaper praktiske problemer, vil den gi positiv effekt på metanproduksjonen, og litt lavere strømforbruk.

Effekten av pumpeintervall avhenger av substratets innhold av fett. Ved lavt fettinnhold, kan tilføringene av substrat være få og store. Høyere fettinnhold gjør at substratet bør tilføres hyppigere.

Valg av reaktortemperatur har betydning for både transmisjonsvarmetap og substratets oppvarmingsbehov. Det virker også inn på metanutbytte og nedbrytningshastigheten av organiske komponenter. Valg av reaktortemperatur bør resultere i en høyest mulig netto energiproduksjon. Dersom valget står mellom mesofil og termofil driftstemperatur, bør ikke gjødselkvaliteten innvirke på avgjørelsen i særlig grad, da begge temperaturer gir god gjødselkvalitet.

Det ble også gjort et litteratursøk for å finne ut hvilken effekt det har å samråtne to substrater. Litteraturen er samstemt om at samråtning er en effektiv metode for å øke metanproduksjonen. Det er gjort mye forskning på samråtning av ulike substrater. Mange kombinasjonsløsninger ser ut til å fungere godt. Lagringskapasitet til to eller flere substrater kan gi noe høyere investeringskostnader.

Mange tiltak kan gjøres med tanke på utforming, drift og energieffektivisering av biogassreaktoren for å øke netto energiproduksjon. Det er forskjell på om de er lønnsomme eller ikke. Optimalisering av strategien for omrøring, pumping og valg av reaktortemperatur er de tiltakene som koster minst å gjennomføre, men trolig også de tiltakene som gir minst utbytte med tanke på netto energiproduksjon. Samråtning av ulike substrater er trolig det tiltaket som gir høyest økning av netto energiproduksjon i forhold til innsatsen det krever. Tykk isolering er en forholdsvis billig metode for å unngå transmisjonsvarmetap gjennom reaktorens overflate. Den største utfordringen står trolig likevel igjen: oppvarmingsbehovet av substrat står for en stor del av internt termisk forbruk. Installasjon av varmeveksling vil i mange tilfeller være for dyrt til at det gir noe lønnsomhet gjennom investeringens levetid.

Lønnsomheten vil i framtida avhenge av flere økonomiske faktorer. Foreløpig er kraftprisene så lave at å øke netto energiproduksjon trolig ikke vil være nok. Det trengs også stimulans i form av tilskudd eller lignende.

Konklusjon: Driften av biogassanlegget har innvirkning på biogassproduksjonen. Samrøtning kan i mange tilfeller være fordelaktig. Det kan gi synergieffekter som virker positivt inn på metanutbytte og prosessens stabilitet. Det bør legges opp til en omrøringsstrategi som behandler substratet minst mulig, men nok til at biomassen homogeniseres og at det ikke oppstår praktiske problemer. Fettinnholdet i substratet gir føringer for hvor ofte substratet bør tilføres reaktoren. Fettrike substrat bør tilføres hyppigere enn substrater med lite innhold av fett.

Små biogassreaktorer har relativt mye høyere transmisjonsvarmetap per volumenhet sammenlignet med større reaktorer. De første 10 centimeterne med isolasjon senker store deler av varmetapet. Reaktoren som det ble sett på i denne oppgaven, hadde en kostnadsoptimal isolasjonstykkelse på 10-15 cm ved mesofil temperatur og 15-20 cm ved termofil temperatur. Byggematerialets varmekonduktivitet hadde liten innvirkning på transmisjonsvarmetap i reaktorer med mer enn 5 cm isolasjon. I godt isolerte reaktorer utgjør oppvarming av substrat den største delen av det interne energiforbruket. Det var ikke lønnsomt å installere en rørvarmeveksler til den fiktive reaktoren i denne oppgaven. Dette er en av de største utfordringene for å kunne øke netto energiproduksjon på små biogassreaktorer i kaldt klima. For den fiktive biogassreaktoren ble investeringskostnadene i eksternt gasslager cirka like store som kostnaden ved å ha internt gasslager. Mange faktorer innvirket det økonomiske resultatet av denne beregningen. Valg av gasslagringsløsning bør tas individuelt for hvert enkelt biogassanlegg som skal bygges.

Å optimalisere driften av biogassreaktoren gir økt metanproduksjon og dermed også økt lønnsomhet. Optimalisering av driften er trolig ikke det tiltaket som har størst innvirkning på netto energiproduksjon. Derfor vil lønnsomheten avhenge mye av de tiltakene som kan senke internt termisk energiforbruk. Å isolere reaktoren er det energieffektiviserende tiltaket som gir best lønnsomhet, men lønnsomheten synker ved overdrevne isolasjonstykkelser. Energieffektiviserende tiltak som varmeveksling og eksternt gasslager viser seg å ha liten eller negativ lønnsomhet på små biogassanlegg. Høye byggekostnader og lave energipriser

gjør tiltakene lite lønnsomme. Økning av netto energiproduksjon med de tiltakene som er sett på i denne oppgaven, vil med dagens kraftpriser, trolig ikke være nok for å få lønnsomhet i gårdsbasert småskala biogassproduksjon.

For videre studier vil det være interessant å se på billigere løsninger for å forminske substratets oppvarmingsbehov.

Litteraturliste

- Berglund, M. & Börjeson, P. (2003). *Energianalys av biogassystem*. Lunds tekniska högskola, Institutionen för teknik och samhälle, Avd. för miljö- och energisystem. (Rapport 44, 2003). Lokalisert på http://www.miljo.lth.se/svenska/internt/publikationer_internt/pdf-filer/Energianalys%20av%20biogassystem%2044.pdf
- Berner, E. & Aarnes, H. (2012). Nitrogenassimilasjon. H. Aarnes (Red.), *Store norske leksikon*. Lokalisert 19. februar 2016, på <https://snl.no/nitrogenassimilasjon>
- Bernesson, S., Hansson, K., Robertsson, M. & Thyselius, L. (1999). *Torr biogasprosess för lantbruksgröder – studier av aerob förbehandling, torrsustans- och ympningsförutsättningar*. Jordbrukstekniska institutet. (JTI Rapport 19, 1999) Lokalisert på http://www.jti.se/uploads/jti/JTI_RapportRKA19.pdf
- Bondelaget. (s.a.). *Fakta om biogass – Norsk kulturlandskap – det nye gassfeltet*. Lokalisert 10. desember 2015 på <http://www.bondelaget.no/getfile.php/Nettbutikk/Kunnskapsmaterieell/Biogass%20fakta.pdf>
- Carlsson, M. & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduksjon*. Avfall Sverige. Lokalisert på <http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/Utveckling/U2009-14.pdf>
- Demirel, B. & Scherer, P. (2011). *Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane*. Biomass and bioenergy 35 (3), 992-998. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.022>
- Dybdal, S. E. (2016, 5. mars). Ny reaktor kan auke utvinninga av biogass frå gardsbruk. *Forskning.no*. Lokalisert på <http://forskning.no/landbruk-alternativ-energi/2016/04/ny-reaktor-kan-auke-utvinninga-av-biogass-fra-gardsbruk>
- Ellingsen, J. G. & Filbakk, T. (2014). *Biogass – Håndbok i etablering og drift av gårdsbaserte biogassanlegg*. Det kongelige selskap for Norges vel. Lokalisert 4. desember 2015 på www.norgesvel.no/biogassboka
- Fjørtoft, K., Morken, J. & Gjetmundsen, M. (2014). *Dokumentasjon av biogassanlegget på Tomb VGS*. Institutt for matematiske realfag og teknologi. (IMT Rapport 55, 2014). Lokalisert På <http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/323545/Sluttapport%20Tomb.pdf>
- Forskrift om endring i forskrift om hold av storfe, FOR-2004-04-22-665. § 7 sjetle ledd.

Forskrift om tilskudd for levering av husdyrgjødsel til biogassanlegg, FOR-2015-12-18-1743. § 4.

Fossum, S. (2016). Arker. *Store medisinske leksikon*. Lokalisert 8. mai 2016, på <https://sml.snl.no/arker>

Francese, A. P., Aboagye-Mathiesen, G., Olesen, T., Córdoba, P. R. & Siñeriz, F. *Feeding approaches for biogas production from animal wastes and industrial effluents*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 16 (2), 147-150. Lokalisert på http://download.springer.com.ezproxy.hihm.no/static/pdf/640/art%253A10.1023%252FA%253A1008919904716.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1023%2FA%3A1008919904716&token2=exp=1463661538~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F640%2Fart%25253A10.1023%25252FA%25253A1008919904716.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1023%252FA%253A1008919904716*~hmac=a2c7265b903a59e05ec9c5dafaee8fafa7c83a29070149791c97868bdc6ff76b

Grøn, Ø. (2009). Varmekapasitet. B. Pedersen (Red.), *Store norske leksikon*. Lokalisert 6. mai 2016, på <https://snl.no/varmekapasitet>

Hansander, A. (2012). *Risk för spredning av ogräsfrö med rotrester*. (Kandidatarbete, Sveriges lantbruksuniversitet). Lokalisert på http://stud.epsilon.slu.se/4557/7/hansander_a_120823.pdf

Hauge, J.G. (2009). Enzymer. *Store norske leksikon*. Lokalisert 23. februar 2016, på <https://snl.no/enzymer>

Hofstad, K. (2015). Energitetthet. K. A. Rosvold (Red.) *Store norske leksikon*. Lokalisert 12. mai 2016, på <https://snl.no/energitetthet>

Innovasjon Norge. (2014). *Bioenergiprogrammet - retningslinjer for saksbehandling og tildeling av tilskudd 2014*. Lokalisert på http://www.innovasjon norge.no/PageFiles/466096/Retningslinjer%20for%20%20bioenergiprogrammet%202014_1.pdf

International Energy Agency. (2015). *Energy and climate change - World energy outlook special report*. Lokalisert på <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>

Johannessen, J. (1995). *Tekniske tabeller*. Lokalisert på <http://www.nb.no/nbsok/nb/20670b2c61f382ff6556a3a69562d4e1?lang=no#3>

-
- Johansen, A., Nielsen, H.B., Hansen, C.M., Andreasen, C., Carlsgart, J., Hauggard-Nielsen, H. & Roepstorff, A. (2012). *Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso- and thermophilic conditions*. *Waste Management* 33 (4), 807–812. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.wasman.2012.11.001>
- Jørgensen, P. J. (2009). *Biogas – grøn energi*. Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet. Lokalisert på <http://www.folkecenter.dk/mediafiles/folkecenter/pdf/Biogas-groen-energi.pdf>
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L. & Angelidakia. (2007). *Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies*. *Bioresource Technology* 99 (11), 4919–4928. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biortech.2007.09.015>
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K. T. & Al-Dahhan, M. H. (2005). *Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing*. *Water Research* 39 (15), 3597–3606. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.watres.2005.06.019>
- Kashyap, D. R., Dadhich, K.S. & Sharma, S. K. (2003). *Biomethanation under psychrophilic conditions: a review*. *Bioresource Technology*, 87 (2), 147-153. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-8524\(02\)00205-5](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-8524(02)00205-5)
- Kim, S. W., Park, J. Y., Kim, J. K., Cho, J. H., Chun, Y. N., Lee, I. H., Lee J. S., Park, J. S. & Park, D. H. (2000). *Development of a Modified Three-Stage Methane Production Process Using Food Wastes*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 84 (1) 731-741. Lokalisert på http://download.springer.com.ezproxy.hihm.no/static/pdf/585/art%253A10.1385%252FABAB%253A84-86%253A1-9%253A731.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1385%2FABAB%3A84-86%3A1-9%3A731&token2=exp=1462442366~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F585%2Fart%25253A10.1385%25252FABAB%25253A84-86%25253A1-9%25253A731.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1385%252FABAB%253A84-86%253A1-9%253A731*~hmac=bf2525cf8aedbc3c36549d3ec42f5c028b6daaf85f54f78f9a0d7e3a04cfb5bf
- Landbruksdirektoratet. (s.a). *Biogass*. Lokalisert 10. desember 2015 på <https://www.slf.dep.no/no/miljo-og-okologisk/klima-og-miljoprogrammet/prosjekter-stottet-inntil-2012/biogass>

-
- Landbruksdirektoratet. (s.a). *Ny metode for plassering av biogassanlegg*. Lokalisert 10. desember 2015 på <https://www.slf.dep.no/no/miljo-og-okologisk/klima-og-miljoprogrammet/prosjekter-stottet-inntil-2012/biogass/ny-metode-for-plassering-av-biogassanlegg>
- Landbruks- og matdepartementet. (2009). *Klimautfordringene – landbruket en del av løsningen*. (St.meld. nr. 39, 2008-2009). Oslo: Departementet.
- Lantz, M. (2012). *The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies*. Applied Energy, 98, 502-511. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.apenergy.2012.04.015>
- Levén, L., Erikson, A. R. B., Schnürer, A. (2007). *Effect of process temperature on bacterial and archaeal communities in two methanogenic bioreactors treating organic household waste*. Fems microbiology ecology, 59 (3), 683-693. <http://dx.doi.org/doi:10.1111/j.1574-6941.2006.00263.x>
- Lie, Ø. (2015, 18. desember). Ny teknologi: – Glem alt du har lært om biogassproduksjon. *Teknisk ukeblad*. Lokalisert på <http://www.tu.no/artikler/industri-ny-teknologi-glem-alt-du-har-laert-om-biogassproduksjon/276282>
- Liu, K., Tang, Y. Q., Matsui, T., Morimura, S., Wu, X. L. & Kida, K. (2008). *Thermophilic anaerobic co-digestion of garbage, screened swine and dairy cattle manure*. Journal of Bioscience and Bioengineering 107 (1) 54-60. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jbiosc.2008.09.007>
- Lübken, M., Wichern, M., Schlattmann, M., Gronauer, A. & Horn, H. (2007). *Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops*. Water research 41 (18), 4085-4096. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.watres.2007.05.061>
- Løes, A. K. (2014). Husdyrgjødsel til biogass. *Buskap*. Lokalisert på http://www.bioforsk.no/ikbViewer/Content/117078/BUSKAP%2009_Husdyrgj%C3%B8dsel%20til%20biogass%20siste.pdf
- Løvaas, R. (2009). Biogass. E. Uggerud (Red.), *Store norske leksikon*. Lokalisert 3. desember 2015, på <https://snl.no/biogass>
- Miller, J. F., Shah, N. N., Nelson, C. M., Ludlow, J. M. & Clark, D. S. (1988). *Pressure and temperature effects on growth and methane production of the extreme thermophile methanococcus jannaschii*. Applied and environmental microbiology 54 (12), 3039-3042. Lokalisert på <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC204424/pdf/aem00117-0165.pdf>

-
- Moset, V., Poulsen, M., Wahid, R., Højberg, O. & Møller, H. B. (2015). *Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology*. *Microbial biotechnology* 8 (5), 787-800.
<http://dx.doi.org/doi:10.1111/1751-7915.12271>
- Mæhlum, L. & Rosvold, K. A. (2009). Energivekster. K. A. Rosvold (Red.) *Store norske leksikon*. Lokalisert 8. mai 2016 på <https://snl.no/energivekster>
- Olsson, J. (2010). *GIS-baserad metod för etablering av centraliserade biogasanläggningar baserade på husdjursgödsel*. (Examensarbete, Lunds universitet). Lokalisert på <https://www.slf.dep.no/no/miljo-og-okologisk/klima-og-miljoprogrammet/prosjekter-stottet-inntil-2012/biogass/attachment/15397?ts=131467c42f0>
- Parawira, W., Read, J. S., Mattiasson, B. & Björnsson, L. (2007). *Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion*. *Biomass and bioenergy* 32 (1), 44-50.
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biombioe.2007.06.003>
- Petersson, A. & Wellinger, A. (2009). *Biogas upgrading technologies – developments and innovations*. IEA Bioenergy. Lokalisert 26. mai 2016 på <http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/Downloads/Studien/IEA-BiogasUpgradingTechnologies2009.pdf>
- Rasi, S., Veijanen, A. & Rintala, J. (2006). *Trace compounds of biogas from different biogas production plants*. *Energy* 32 (8), 1375–1380.
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.energy.2006.10.018>
- Ruud, L. E., Stokke, T., Bøe, K. E., Hettasch, T. & Skjølberg, P. O. (2015). *Hus for storfe – Norske anbefalinger 2015*.
- Sánchez, E. Borja, R. Weiland, P. Travieso, L. & Martín, A. (2000). *Effect of temperature and pH on the kinetics of methane production, organic nitrogen and phosphorus removal in the batch anaerobic digestion process of cattle manure*. *Bioprocess Engineering*, 22 (3), 247-252. <http://dx.doi.org/doi:10.1007/s004490050727>
- Schattauer, A., Abdoun, E., Weiland, P., Plöchl, M. & Heiermann, M. (2010). *Abundance of trace elements in demonstration biogas plants*. *Biosystems engineering* 108 (1), 57-65. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.10.010>
- Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2009). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Svensk gassteknisk senter (SGC Rapport 207). Lokalisert på http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac_quality/user_documents/3_pdf/Microbiological_handbook_for_biogas_plants.pdf

-
- Statistisk Sentralbyrå. (2016). *Elektrisitetspriser, 4. kvartal 2015*. Lokalisert på <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elkraftpris/kvartal/2016-02-25#content>
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I. & Raskin, L. (2000). *Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions – I. digester performance*. *Water research* 35 (7), 1804-1816. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0043-1354\(00\)00439-5](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0043-1354(00)00439-5)
- Svahn, J. (2006). *Energioptimering av biogasproduksjon* (Examensarbeite, Umeå universitets tekniska högskola). Lokalisert på http://www8.tfe.umu.se/courses/energi/ExjobbCivIngET/Rapporter/Johan_S_06.pdf
- Vidal, G., Carvalho, A., Méndez, R. & Lema, J.M. (2000). *Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters*. *Bioresource Technology* 74 (3), 231-239. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-8524\(00\)00015-8](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-8524(00)00015-8)
- Vindis, P., Mursec, B., Janzekovic, M. & Cus, F. (2009). *The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production*. University of Maribor, Faculty of Agriculture and Life Sciences. Lokalisert på http://www.journalamme.org/papers_vol36_2/36210.pdf
- Ward, A. J., Hobbs, P.J., Holliman, P. J. & Jones D. L. (2008). *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. *Bioresource Technology* 99 (17), 7928–7940. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Wilkie, A. C. (2007) *Anaerobic digestion of dairy manure: design and process considerations*. NRAES-176, 301-312. Lokalisert på <http://dairy.ifas.ufl.edu/other/files/nraes-176-march2005-p301-312.pdf>
- Yr. (s.a.) *Klimastatistikk for Norge*. Lokalisert 26. april 2016 på <http://www.yr.no/sted/Norge/klima.html#%C3%A5r>
- Zhang, C., Xioa, G., Peng, L., Su, H. & Tan, T. (2012). *The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure*. *Bioresource Technology* 129, 170-176. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biortech.2012.10.138>
- Zupančič, G. D. & Roš, M. (2003). *Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion*. *Renewable Energy* 28 (14), 2255-2267. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-1481\(03\)00134-4](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0960-1481(03)00134-4)

Vedlegg 1 Varmetapsberegning for betongreaktor ved ulike isolasjonstykkelser (mesofil)

R-verdi, vegg					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betongvegg	0,2	1,1	0,181818182		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi				0,13	
Rse				0,04	
Rtot				5,907416291	
U-verdi, vegg	0,169278742				
R-verdi, bunn					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betong	0,15	1,1	0,136363636		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
Rsi					
Rse					
Rtot				5,691919192	
U-verdi, bunn	0,175687666				
R-verdi, lokk					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 betonglokk	0,2	1,1	0,181818182		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi				0,1	
Rse				0,04	
Rtot				5,877416291	
U-verdi, lokk	0,170142789				
Qt (transmisjonsvarmetap)					
	Areal (m ²)	U-verdi (W/m ² K)	Δ temperatur (°C)	Qt transmisjonsvarmetap (W)	kWh gjennom 1 år
Vegg	120,105	0,169278742	36	731,9240404	
Lokk	19,625	0,170142789	36	120,2058805	
Bunn	19,625	0,175687666	32	110,3318545	
Totalt varmetap				962,4617754	8084,678913
Isolasjonstykkelse (cm)					
Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap kWh		Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap kWh	
0	122886,2884		30	5490,302258	
1	68806,38764		35	4731,208541	
2	48015,10622		40	4156,530757	
3	37007,80645		45	3706,342631	
4	30193,39869		50	3344,145131	
5	25559,36426		55	3046,437366	
10	14745,63204		60	2797,403363	
15	10586,05969		65	2586,008154	
20	8084,678913		70	2404,318132	
25	6539,556387		75	2246,483027	

Vedlegg 2 Varmetapsberegning for stålreaktor ved ulike isolasjonstykkelser (mesofil)

R-verdi, vegg					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Stålvegg	0,035	47	0,000744681		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi			0,13		
Rse			0,04		
Rtot			5,72634279		
U-verdi, vegg	0,17463153				
R-verdi, bunn					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betong	0,15	1,1	0,136363636		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
Rsi					
Rse					
Rtot			5,691919192		
U-verdi, bunn	0,175687666				
R-verdi, lokk					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Stålvegg	0,035	47	0,000744681		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi			0,1		
Rse			0,04		
Rtot			5,69634279		
U-verdi, lokk	0,175551233				
Qt (transmisjonsvarmetap)					
	Areal (m ²)	U-verdi (W/m ² K)	Δ temperatur (°C)	Qt Transmisjonsvarmetap (W)	kWh gjennom 1 år
Vegg	120,105	0,17463153	36	755,0683148	
Lokk	19,625	0,175551233	36	124,0269461	
Bunn	19,625	0,175687666	32	110,3318545	
Totalt varmetap				989,4271153	8311,187769
Isolasjonstykkelse (cm)					
	Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap (kWh)		Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap (kWh)
	0	256039,7091		30	5593,994272
	1	96373,12762		35	4808,043792
	2	59752,05025		40	4215,73733
	3	43488,89927		45	3753,358498
	4	34299,19391		50	3382,381581
	5	28392,2985		55	3078,142195
	10	15577,09546		60	2824,117716
	15	10977,19686		65	2608,823877
	20	8311,187769		70	2424,030322
	25	6687,108412		75	2263,684405

Vedlegg 3 Varmetapsberegning for betongreaktor ved ulike isolasjonstykkelser (termofil)

R-verdi, vegg					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betongvegg	0,2	1,1	0,181818182		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi			0,13		
Rse			0,04		
Rtot			5,907416291		
U-verdi, vegg	0,169278742				
R-verdi, bunn					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betong	0,15	1,1	0,136363636		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
Rsi					
Rse					
Rtot			5,691919192		
U-verdi, bunn	0,175687666				
R-verdi, lokk					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 betonglokk	0,2	1,1	0,181818182		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi			0,1		
Rse			0,04		
Rtot			5,877416291		
U-verdi, lokk	0,170142789				
Qt (transmisjonsvarmetap)					
	Areal (m ²)	U-verdi (W/m ² K)	Δ temperatur (°C)	Qt transmisjonsvarmetap (W)	kWh gjennom 1 år
Vegg	120,105	0,169278742	56	1138,548507	
Lokk	19,625	0,170142789	56	186,9869252	
Bunn	19,625	0,175687666	52	179,2892635	
Totalt varmetap				1504,824696	12640,52745
Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap (kWh)		Isolasjonstykkelse (cm)	Transmisjonsvarmetap (kWh)	
0	191241,5825		30	8583,722416	
1	107117,2924		35	7396,816542	
2	74775,29904		40	6498,284784	
3	57652,83272		45	5794,412278	
4	47052,64288		50	5228,12309	
5	39844,14487		55	4762,668625	
10	23022,78364		60	4373,317965	
15	16552,33777		65	4042,816497	
20	12640,52745		70	3758,759224	
25	10224,37936		75	3511,998807	

Vedlegg 4 Varmeveksler – beregninger fra Skåland rør og industrimontasje AS

Fluid name	:	digested sludge	raw sludge
Inlet temperature (°C)	:	37.0	1.0
Outlet temperature (°C)	:	23.0	15.0
Heat recovery (kcal/h)	:	70,000	
(kWt)	:	80	

laminar flow: 80 un. DTR 64/38 2.0, 110 000 Euros

turbulent flow: 20 un. DTR 51/34 2.0, 28 000 Euros

Vedlegg 5 Varmetapsberegning for betongreaktor med toppduk istedenfor isolert topplokk

R-verdi, vegg					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betongvegg	0,2	1,1	0,181818182		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
R3 Blikkplate	0,002	47	4,25532E-05		
Rsi			0,13		
Rse			0,04		
Rtot			5,907416291		
U-verdi, vegg	0,169278742				
R-verdi, bunn					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
R1 Betong	0,15	1,1	0,136363636		
R2 Isolasjon	0,2	0,036	5,555555556		
Rsi					
Rse					
Rtot			5,691919192		
U-verdi, bunn	0,175687666				
R-verdi, lokk					
	d materialets tykkelse (m)	λ varmekonduktivitet (W/mK)	R varmemotstand (m ² K/W)		
PVC duk	0,003	0,19	0,015789474		
R2 Isolasjon	0	0,036	0		
PVC duk	0,003	0,19	0,015789474		
Rsi			0,1		
Rse			0,04		
Rtot			0,171578947		
U-verdi, lokk	5,828220859				
Qt (transmisjonsvarmetap)					
	Areal (m ²)	U-verdi (W/m ² K)	Δ temperatur (°C)	Qt transmisjonsvarmetap (W)	kWh gjennom 1 år
Vegg	120,105	0,169278742	36	731,9240404	
Lokk	19,625	5,828220859	36	4117,638037	
Bunn	19,625	0,175687666	32	110,3318545	
Totalt varmetap				4959,893932	41663,10903

Vedlegg 10 Priser på isolasjon

pris ved ulike isolasjonstykkelser					
	Isolasjonstykkelse (cm)	Areal reaktor (m2)	Volum av isolasjon (m3)	Pris per m3 (kr)	Sum (kr)
	2	160	3,2	-3400	-10880
	3	160	4,8	-3400	-16320
	4	160	6,4	-3400	-21760
	5	160	8	-3400	-27200
	10	160	16	-3400	-54400
	15	160	24	-3400	-81600
	20	160	32	-3400	-108800
	25	160	40	-3400	-136000
	30	160	48	-3400	-163200
	35	160	56	-3400	-190400
	40	160	64	-3400	-217600
	45	160	72	-3400	-244800