

Fakultet for anvendt økologi, landbruksfag og bioteknologi

Isak Jerpstad

Bachelor

Gårdsbasert biogassanlegg for 100 kuer

Farmbased biogasproduction for 100 cows

Landbruksteknikk

2019

Samtykker til tilgjengeliggjøring i digitalt arkiv Brage

JA NEI

Forord

Denne oppgaven er en bacheloroppgave i landbruksteknikk ved høghskolen i Innlandet, som markerer slutten på tre år som høghskolestudent på Blæstad. Jeg startet på høghskolen i Hedmark og sluttet på Høghskolen i Innlandet.

Å velge tema for bacheloroppgave har ikke vært enkelt, til slutt ble løsningen å skrive om biogass. Lars Erik Ruud hadde noen undervisningstimer om biogass i tidligere forelesninger på Blæstad, der det virket som biogass var løsningen på alle verdensproblemer. Dette vekke interesse hos en ung trønder.

Jeg vil takke alle som har vært med på ulike utferder for å se på forskjellige biogassanlegg.

Jeg vil takke alle som har tatt imot oss og vist frem biogassanleggene.

Jeg vil takke veileder Tomas Cottis for gode innspill for arbeidet med oppgaven.

Innhold

Innhold

Forord	3
Innhold.....	4
Figurliste.....	7
Norsk sammendrag	9
Engelsk sammendrag (abstract).....	10
Innledning.....	11
1. Problemstilling og metode.....	13
2. Generelt om biogass	14
2.1 Substrater	14
2.2 Biogassprosessen	15
2.2.1 Hydrolysesteget	16
2.2.2 Syresteget	16
2.2.3 Metansteget	16
2.3 Oppbygging av tradisjonelt biogassanlegg.....	17
2.4 Reaktortyper	17
2.4.1 CSTR – continuous stirred tank reaktor	18
2.4.2 Batch-reaktor	18
2.4.3 Plugflowreaktor	18
2.4.4 UASB – upflow anaerobic sludge blanket	18
2.5 Faktorer av betydning for prosessen.....	19
2.5.1 Temperatur	19
2.5.2 C/N-forhold	20
2.5.3 Oppholdstid	21
2.5.4 Organisk belastning.....	22
2.6 Gasskvalitet og innhold	22

2.7	Gasslager.....	23
2.8	Anvendelse	23
2.8.1	Varme	23
2.8.2	Strøm og varme	23
2.8.3	Drivstoff	24
2.9	Biorest som gjødsel.....	24
2.10	Oppsummering teoridel.....	24
3.	Anlegg i drift	25
3.1.1	Østersund.....	25
3.1.2	Tomb	28
3.1.3	Jæren.....	29
3.1.4	Prestseter	31
4.	Biogassanlegg gård.....	34
4.1	Utgangspunkt	34
4.1.1	Valg av reaktortype	34
4.1.2	Beregning av gjødselmengder	35
4.1.3	Hydraulisk oppholdstid	35
4.1.4	Reaktorstørrelse	36
4.1.5	Organisk belastning	36
4.1.6	C/N-forhold	36
4.1.7	Temperatur	37
4.2	Gassutbytte	37
4.3	Energiutbytte.....	38
4.3.1	Varme og strøm	38
4.3.2	Varme	38
4.3.3	Drivstoff	38
4.4	Internt energiforbruk.....	39

4.4.1	Oppvarming av substrat.....	39
4.5	Tilsetning av substrat	40
4.6	Energieffektivisering	41
4.6.1	Isolasjon.....	41
4.6.2	Pumpebehov	41
4.6.3	Geometri.....	41
4.6.4	Varmeveksler.....	42
4.7	Økonomi	42
4.7.1	Kostnadsfunksjon	42
4.7.2	Referanse budsjettpris	43
4.7.3	Støtteordninger	43
4.7.4	Driftsøkonomi	44
5.	Overordnet diskusjon	45
5.1	Reaktortype og dimensjon	45
5.2	Energiutbytte.....	46
5.3	Økonomi	47
6.	Konklusjon	49
	Vedlegg:	50
	Litteraturliste	52

Figurliste

Figur 1. (Aamaas et al., 2018).....	11
Figur 2. Oversikt over forskjellige substrater og deres innhold og potensiale.....	15
Figur 3, Prinsippskisse biogassanlegg.....	17
Figur 4. Illustrasjon på forskjell på anaerob og aerob råtneprosessen	19
Figur 5. Temperaturområder for metandannende bakterier	20
Figur 7. Biogassanlegg ved Östersund	27
Figur 8. oversiktsbilde over biogassanlegget på Tomb.....	29
Figur 9. Jæren biogass AS.....	31
Figur 10. Biogassanlegg Lena-Valle vgs.	33
Figur 11. Gjødselproduksjon på oppgavens anlegg	35
Figur 13. Tabell viser organisk belastning ved gitt reaktorvolum.	36
Figur 14. Gassutbytte for ulike substrat.	37
Figur 16. Effekt av tilsetning av ekstra substrat.....	40

Norsk sammendrag

Biogassproduksjon er en god måte å utnytte ressursene våre på, der vi henter ut og anvender energi vi ellers ville spredd på jorda og der noe ville gå ut i atmosfæren. Biogassproduksjon er kjent og mye brukt i store deler av verden, men lite å se av i Norge.

I denne oppgaven beskrives det hvordan biogassproduksjon foregår, hvordan prosessen forløper seg og hvordan anlegg utformes. Hovedsakelig er biogassprosessen en anaerob råtneprosess, altså uten tilgang på luft. Biogassen består gjerne av rundt 60% metan, som er det stoffet energien er bundet i.

Under arbeidet med oppgaven ble det besøkt forskjellige gårdsbiogassanlegg som var i daglig drift, der brukte husdyrgjødsel som hovedsubstrat. Av anleggene som ble besøkt var det tre ulike reaktortyper som ble brukt. Reaktorene som ble brukt var CSTR-reaktor, UASB-reaktor og plugflow-reaktor.

Fokuset for denne oppgaven har vært å finne ut hvordan et biogassanlegg for 100 kuer må være. Ett tonn kumøkk har et energipotensiale på 141 kWh. Det har blitt satt ned en del forutsetninger og gjennomført beregninger for å finne ut hvordan anlegget må være. For den gjødselmengden som kommer fra et fjøs med 100 kuer vil det være mulig å få ut gass tilsvarende 383 199 kWh. CSTR-reaktoren var den reaktoren som ble mest aktuell. Dette er en tradisjonell reaktor hvor biogassprosessen foregår i en tank med røreverk, hvor nytt substrat påføres fortløpende. Det ble beregnet at biogassreaktoren må være 277 m³ stor.

Det ble også sett på økonomi for anlegget og interessante funn ble gjort. Ved hjelp av en kostnadsfunksjon ble det funnet en investeringskostnad på kr 2 345 050. Årlig overskudd fra biogassanlegget ville være kr 347 520. Med en levetid på 15 år, og nedbetaling over samme tidsperiode ville dette gi god margin ift. økonomi. Konklusjonen ble at anlegget ville lønne seg, gitt at de beregninger som ble utført er riktige.

Engelsk sammendrag (abstract)

Biogas production is a good way to utilize our resources, where we extract and use energy we would otherwise spread on the ground, and something would disappear to the atmosphere. Biogas production is known and widely used in large parts of the world, but seldom to see in Norway.

This bachelor thesis describes how biogas production takes place, how the process is working and how plants are designed. Mostly, the biogas process is an anaerobic rot process without access to air. The biogas often consists of about 60% methane, which is the substance the energy is bound in.

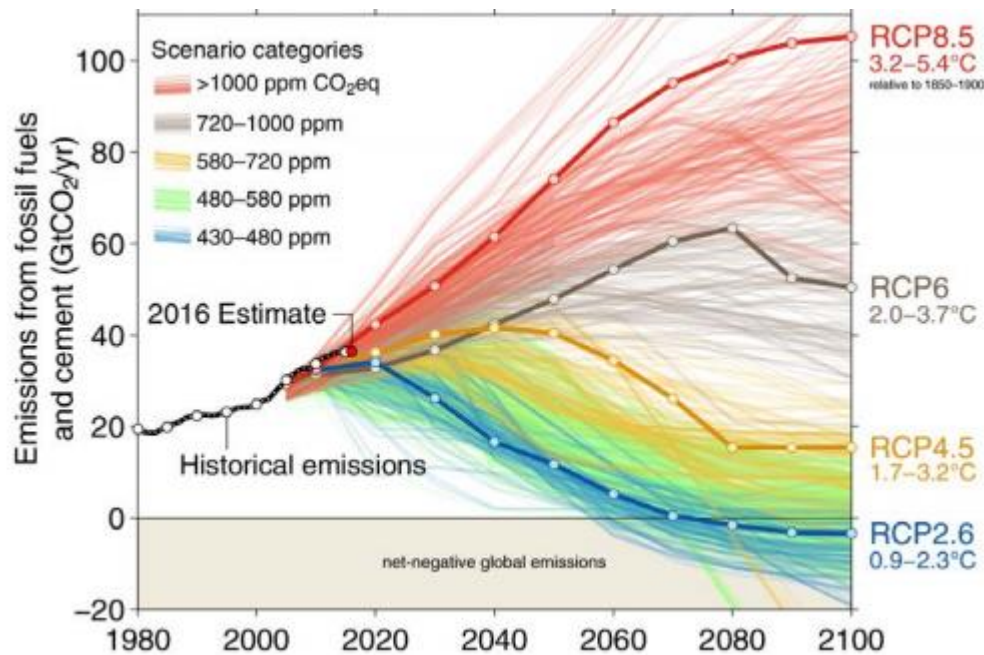
Several farmbased biogas plants were visited during the work with the bachelor thesis. The biogas plants used different reactor types. The reactor types which were used was CSTR, UASB-reactor and plugflow-reactor.

The focus of this task has been to find out how a biogas plant for 100 cows could be. One ton of cow dung has an energy potential of 141 kWh. A number of prerequisites has been put in place and calculations performed to find out how the plant could be. For the amount of dung that comes from a cowshed with 100 cows, it will be possible to extract gas corresponding to 383 199 kWh. The continuous stirred tank reactor became the best reactor in this thesis. It was estimated that a biogas reactor must be 277 m³ in size.

It was also looked at the finance of the biogas plant and interesting discoveries were made. An investment cost were found using a cost function. Investment cost were estimated to 2 345 050 NOK. The surplus for the biogas plant would be 347 520 NOK. With a livingtime of 15 years a lawn could easily be payed down. In the context of operating economy, the conclusion was that the plant would pay off, given that the calculations which were carried out are correct.

Innledning

Vi opplever i dag et økende fokus på miljø, klimaendringer og bærekraft. Det er, blant mange, enighet om at klimaendringene er menneskeskapt, med stadige utslipp av klimagasser som forsterker drivhuseffekten. Figuren under viser konsekvensen av hva forskjellige utslippsscenario vil ha for gjennomsnittstemperaturen.



Figur 1. (Aamaas et al., 2018)

Landbruksnæringen trekkes fram som en versting når det gjelder utslipp av klimagasser, hovedsakelig metan og lystgass. Landbruket står for omtrent 8% av Norges totale klimagassutslipp. I forhold til metan og lystgassutslipp står landbruket for henholdsvis 48% og 46% av disse utslippene, (Hoen, Trømborg & Nielsen, 2007)

Gassen metan blir blant annet dannet i kuvomma og rapes ut i atmosfæren. Også fra gjødsellageret vil det dannes en del metan. Ved å behandle gjødsla gjennom et biogassanlegg er det mulig å samle opp og utnytte energien som kan frigjøres i form av metan fra gjødselen.

Ved å produsere gass i et biogassanlegg kan bonden produsere mer av den energien han trenger selv. Dette vil gjøre bonden mer selvstendig og begrepet kortreist vil få en bredere betydning. Ved bruk av biogassanlegg vil også klimautslippene kunne reduseres. Dette er bærekraft!

Denne oppgaven tar sikte på å se nærmere på biogass som energikilde og utrede muligheten for et gårdsbasert biogassanlegg for 100 kyr.

1. Problemstilling og metode

Arbeidet med denne oppgaven har bestått av et litteraturstudie som er kombinert med en praktisk tilnærming til hvordan et biogassanlegg av en gitt størrelse kan se ut.

Med tanke på litteraturstudie er det drøssevis med faglitteratur og rapporter tilgjengelig. Det har derfor vært en utfordring med å finne oppdatert relevant fagstoff. Det kommer frem av litteraturlisten hvilken litteratur som har blitt valgt ut.

Med genuin interesse for oppgaven har jeg, sammen med flere interesserte, besøkt flere gårdsbiogassanlegg i drift i perioden mars/april 2019:

- Tomb videregående skole i Råde, Østfold
- Biogassanlegg på Åsbo gård, like ved Östersund
- Jæren Biogass AS på Jæren
- Biogassanlegg på Prestseter, Lena-Valle vgs.

I tillegg har jeg besøkt biogasslaboratoriet til NMBU på Ås.

I den praktiske tilnærmingen er det tatt utgangspunkt gjødselmengden til en gård med 100 kyr med full framføring av ungdyr, dette kan også forespeile et nabosamarbeid.

Problemstilling: Hvordan kan en et biogassanlegg beregnet for 100 kyr utformes? Med fokus på reaktortype og dimensjon, energiutbytte og økonomi.

2. Generelt om biogass

Biogass er en blanding av gasser som oppstår ved anaerob nedbryting av organisk materiale, dette forekommer naturlig f. eks i myrer, sumper, deponi og gjødsellager. Metan er en vesentlig bestanddel i biogassen. (Løvaas, 2016)

2.1 Substrater

Råvaren som puttes inn i biogassanlegget kalles substrat. Det er den organiske andelen (VS) av tørrstoffet (TS) i substratet som er grunnlaget for produksjon av biogass. Mengden biogass som er mulig å få ut avhenger av prosessvalg som f. eks. forbehandling, temperatur og samrøtning med andre substrat. I Norge produseres det meste av biogass av organiske avfallsprodukter som matavfall, husdyrgjødsel og slam. (Hanssen, Arnøy, Morken, Briseid & Sørby)

Det er gjort mye forskning på energipotensialet for ulike substrat, derfor er det lett å finne tabellverdier for hvor stort potensiale ulike substrat har. Verdiene fra tabellene kan sprike noe i forhold til TS og energipotensiale, derfor kan det i en planleggingsfase komme til nytte å sende inn prøve av substratet til en laboratorietest, (Morken, 2019). I tabellen under vises et utvalg substrater og deres TS-prosent, utnyttbart organisk materiale av TS, energipotensiale per tonn tørrvekt og energipotensiale per ton rå vekt.

For eksempel inneholder halm mye lignin som er vanskelig å bryte ned, dermed er det i utgangspunktet dårlig potensiale for biogassproduksjon på halm. Et alternativ er å lute halmen før den puttes inn i et biogassanlegg, (Morken, 2019).

Råstoff	Normalt tørrstoff	VS av TS (utnyttbart)	Energipotensial per tonn tørrvekt	Energipotensial per tonn råvekt
Typen husdyrgjødsel				
Kugjødsel	8,5 %	0,80	1666 kWh	141 kWh
Grisegjødsel	8 %	0,80	2083 kWh	167 kWh
Hønssegjødsel	42 %	0,76	1862 kWh	790 kWh
Sauetalle	30 %	0,80	1960 kWh	588 kWh
Hestegjødsel	30 %	0,80	1328 kWh	398 kWh
Pelsdyrgjødsel	68 %	0,71	1531 kWh	1041 kWh
Mat- og slakteriavfall				
Sortert matavfall husholdninger	32,5 %	0,85	3837 kWh	1257 kWh
Sortert matavfall fra storhusholdning	13 %	0,92	6510 kWh	850 kWh
Slakteriavfall (mage/tarm)	16 %	0,83	3169 kWh	507 kWh
Fiskerens	42 %	0,98	8897 kWh	3737 kWh
Frityrfett	90 %	1,00	7414 kWh	6672 kWh
Landbruksprodukter				
Tørr halm	78 %	0,91	1832 kWh	1440 kWh
Mais	30 %	0,90	3107 kWh	932 kWh
Gras	33 %	0,88	2577 kWh	836 kWh
Korn	86 %	0,97	3802 kWh	3270 kWh
Potetris	15 %	0,80	2483 kWh	373 kWh

Figur 2. Oversikt over forskjellige substrater og deres innhold og potensiale. «Tallene i tabellen er basert på bakgrunnsdata i NILFs regneark for Innovasjon Norge, som igjen er basert på SGCs rapport Substrathandbok for biogassproduksjon.», (Ellingsen & Filbakk, 2014)

2.2 Biogassprosessen

Biogassprosessen kan deles inn i tre steg.

2.2.1 Hydrolysesteget

Hydrolyse er når et molekyl tar til seg et vannmolekyl for så å bli spaltet i to, der den ene delen tar med seg ett oksygenatom og ett hydrogenatom, mens den andre delen tar med seg ett hydrogenatom, (Fjellvåg, 2018).

Substratet inneholder gjerne større partikler og molekyler som må brytes opp før biogassprosessen kan gå videre. De store molekylene kalles makromolekyler og kan være proteiner, fett og polysakkarider (f. eks. stivelse, cellulose, hemicellulose, pektin og glykogen). Gjennom hydrolyse blir makromolekylene nedbrutt til mindre molekyler (monomer) som aminosyrer, fettsyrer og forskjellige typer sukker, med hjelp av enzymer. Det er forskjellige typer enzymer som spalter de forskjellige næringsstoffene. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng & Kvande, 2017)

2.2.2 Syresteget

Monomer videre brutt ned til organiske syrer, mindre alkoholer, ammoniakk, karbondioksid og hydrogen. Vanlige organiske syrer er eddiksyre, maursyre, melkesyre, propionsyre og smørsyre. (Morken et al., 2017)

2.2.3 Metansteget

Det siste steget i biogassprosessen er der metan blir dannet. Metandannelsen skjer ved at metandannende organismer spalter produktene fra syresteget. Spaltingen gjør at man hovedsaklig får metan og karbondioksid. Eksempler på organismer som utfører slik spalting er Methanosarcina og Methanosaeta. Disse bakteriene er ikke vanlige bakterier, men en form for «urbakterier» og danner egne riker som kalles arker. (Morken et al., 2017)

Det er også mulig at metan blir dannet ved at karbondioksid og hydrogen slås sammen til metan og vann.

Bakteriene i metantrinnet er svært følsomme overfor oksygen, ph-svingninger, høye saltkonsentrasjoner og tungmetaller i forhold til andre bakterier som inngår i biogassprosessen. (Morken et al., 2017)

2.3 Oppbygging av tradisjonelt biogassanlegg

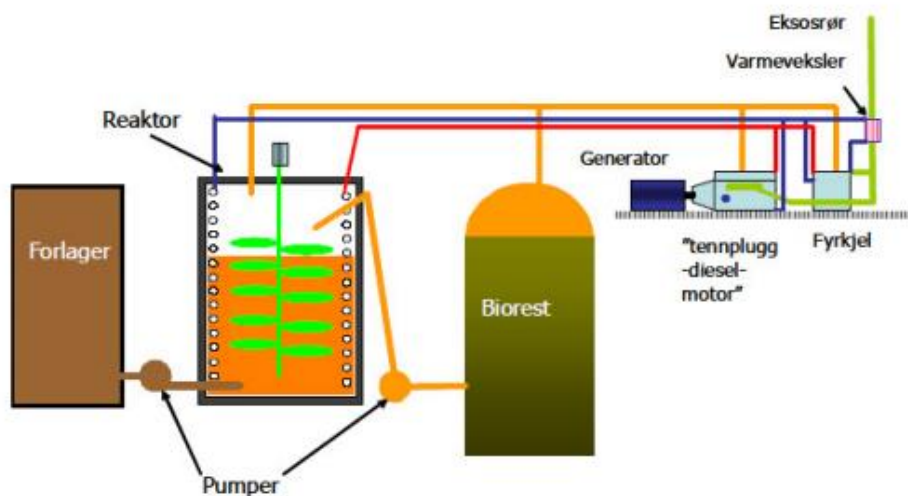
Et biogassanlegg består gjerne av fortank, reaktor, gasslager, biorestlager og gassforbruker.

Det er gjerne et lager for substrat før reaktoren som sikrer jevn tilgang. Hvis det er flere substrat som skal inn i reaktoren kan det være flere forlager, substratet kan også blandes sammen i ett lager.

Reaktoren er tradisjonelt en stående sylinder eller en kum. Reaktoren må være utstyrt slik at substratet blir utsatt for omrøring. Reaktoren må også være slik at det opprettholdes en jevn temperatur i substratet. (Svahn, 2006)

Gassen fra reaktoren går i rørledninger videre til noe som forbruker eller videreforedler gassen.

Det ferdig behandlede substratet kalles biorest og havner gjerne i et sluttlager før det spres på åker og eng. Det er også et alternativ at bioresten avvannes til en tørr og en våt del, det er mest vanlig på store anlegg hvor mengden biorest er enorm.



Figur 3, Prinsippskisse biogassanlegg. (Idsø & Årethun, 2013)

2.4 Reaktortyper

Den anaerobe nedbrytingen av organisk materiale til biogass foregår i en reaktor. Dette er en form for gass tett beholder som substratet oppholder seg i under biogassprosessen. Det finnes ulike reaktortyper både for råtning av fast og flytende substrat. Avsnittene nedenfor er en oversikt over forskjellige typer reaktorer.

2.4.1 CSTR – continuous stirred tank reaktor

Dette er den vanligste reaktortypen som brukes. CSTR er utformet som en sylindrisk tank med varierende forhold mellom høyde og bredde. I denne reaktoren er det vanlig med en omrører som sørger for god blanding av substratet. Råstoff pumpes inn og biorest tas ut hver dag. Den hydrauliske oppholdstiden for substratet regnes som den gjennomsnittlige tiden råstoffet befinner seg i reaktoren. (Morken et al., 2017)

2.4.2 Batch-reaktor

Som navnet batch-reaktor tilsier, behandles en gitt mengde (batch) om gangen. Dette gjøres ved at reaktoren fylles helt opp og substratet er i reaktoren til det er ferdig behandlet. Tiden substratet er i reaktoren er den hydrauliske oppholdstiden. Når reaktoren tømmes og en ny «batch» skal inn blir det værende igjen ca. 10% av det ferdig behandlede substratet. Dette fungerer som «pode»-materiale for det nye råstoffet. (Morken et al., 2017). Batch-reaktorer kan også brukes for tørre substrater.

2.4.3 Plugflowreaktor

Plugflowreaktoren er en liggende tank hvor det kommer råstoff inn i den ene enden og biorest ut på den andre enden. Massen beveger seg som en plugg gjennom reaktoren og den hydrauliske oppholdstiden er den tiden massen bruker på å forflytte seg gjennom reaktoren.

Et firma i Norge kalt Antec har spesialisert seg på en slik type reaktor. Det som gjør denne reaktoren spesiell er at det brukes biofilm med bakterier som øker hastigheten på biogassprosessen vesentlig.

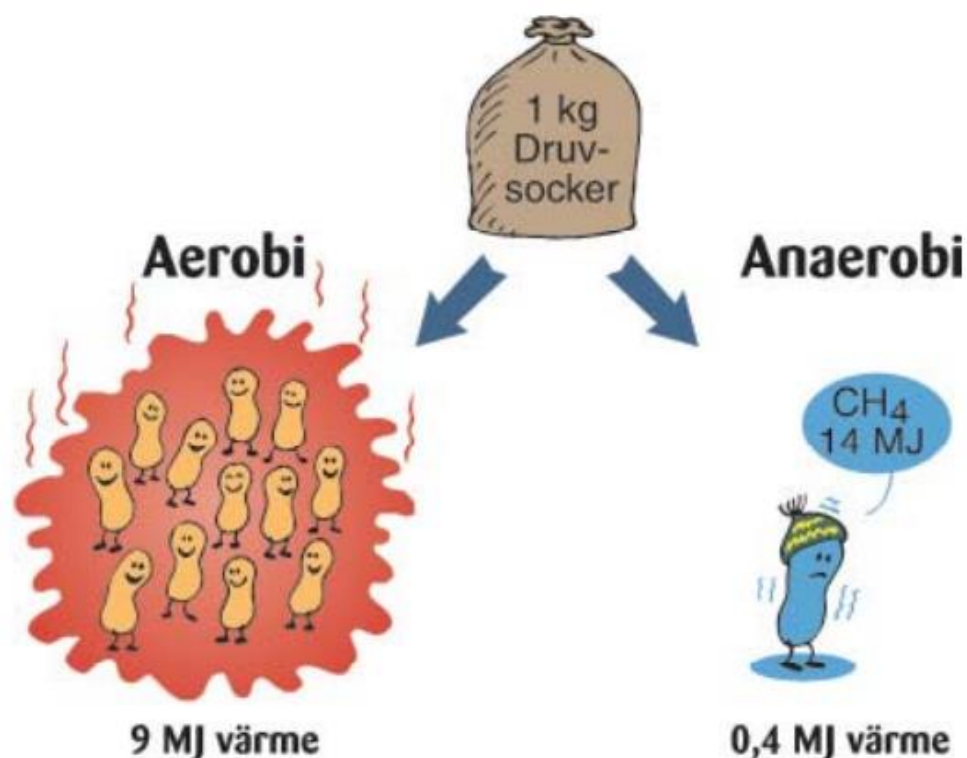
2.4.4 UASB – upflow anaerobic sludge blanket

Dette er en reaktor der mikroorganismene i biogassprosessen samler seg til granuler og lever konstant i reaktoren. Granulene er tyngre enn vann og vil synke i reaktoren, med forbehold om at substratet inneholder lite partikler. Råstoffet kommer inn i bunn av reaktoren og ferdig behandlet substrat kommer ut høyere opp. For denne typen reaktor er det viktig at utskiftingen og hastigheten på substratet ikke er for høy, slik at ikke granulene blir dratt med substratet opp og ut av reaktoren. (Morken et al., 2017)

2.5 Faktorer av betydning for prosessen

2.5.1 Temperatur

For at biogassprosessen skal fungere krever den en viss driftstemperatur. Råtneprosessen avgir forsvinnende lite energi i form av varme, til gjengjeld foregår det en effektiv binding av energi i form av metan. Til sammenligning vil en komposteringsprosess med tilgang på luft frigjøre energi i form av varme. (Jarvis & Schnuerer, 2009)



Figur 5. Aerob respektive anaerob energibildning. I en luftad kompost bildas mycket värme, medan den energi som bildas vid anaerob rötning till största delen binds in i metan. Kim Gutekunst, JTI.

Figur 4. Illustrasjon på forskjell på anaerob og aerob råtneprosessen mtp. Energi. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Metandannende organismer kan oppstå i forskjellige temperaturområder. De ulike organismene vil ha forskjellige optimumstemperaturer og forskjellig toleranse for temperatursvingninger. (Morken et al., 2017) Tabellen under viser de ulike temperaturområdene til metandannende organismer. For biogassanlegg er det mesofile eller

termofile temperaturområder som er aktuelle, innenfor disse områdene er det henholdsvis ca. 37 °C ca. og 55 °C som er optimumstemperaturene. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Temperaturområder	Temperatur (°C)
Psykrofil	4-25
Mesofil	25-40
Termofil	50-60
Hypertermofil	>65

Figur 5. Temperaturområder for metandannende bakterier, kilde til verdier: (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Valg av termofil eller mesofil råtning vurderes i hvert enkelt tilfelle for igangsettelse av biogassprosess. Fordelen med en termofil prosess er at denne er mer effektiv og produserer mer per tidsenhet. Bakdelen er at det kreves mer energi til å varme opp substratet. Den mesofile råtningen krever mindre energi til oppvarming, men har ikke like effektiv energiproduksjon. Et annet moment er at ved råtning av gjødsel er de bakteriene som allerede finnes i gjødsla tilpasset et mesofilt temperaturområde (dyrets kroppstemperatur).

2.5.2 C/N-forhold

Forholdet mellom karbon og nitrogen (C og N) er av betydning for biogassprosessen. Mikroorganismene behøver en viss mengde nitrogen for å fungere, men for høy konsentrasjon vil føre til høye konsentrasjoner av ammoniakk og dermed en inhibering av prosessen. Karbonet er nødvendig for dannelsen av metan, men et for høyt nivå kan føre til lavere mikroorganismeaktivitet.

En nøkkelregel for optimalt C/N-forhold er at det skal ligge mellom 20:1 og 30:1 for maksimal gassproduksjon. (Morken et al., 2017)

Eksempelvis har flytende storfegjødsel et varierende C/N-forhold med 6-20:1.

2.5.3 Oppholdstid

Innholdet i substratet har stor innvirkning på hvor lang oppholdstiden i reaktoren må være. Hvis substratet inneholder mye lett nedbrytbart organisk materiale vil biogassprosessen gå raskt, mens hvis substratet inneholder større partikler og materiale som er tungt nedbrytbart vil prosessen ta lengre tid. Generelt kan man si at lengre oppholdstid gir større metanproduksjon fra substratet, i og med at mikroorganismene får bedre tid til nedbryting. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Den tiden substratet oppholder seg i reaktoren kalles for hydraulisk oppholdstid, med forkortelsen HRT (hydraulic retention time). For kontinuerlige reaktorer vil dette være den gjennomsnittlige tiden som substratet befinner seg inne i reaktoren. Normalt vil hydraulisk oppholdstid for en biogassprosess være mellom 10 og 25 dager, (Jarvis & Schnuerer, 2009).

En annen form å regne oppholdstid på er SRT (solids retention time), dette er den tiden det partikulære materialet oppholder seg i reaktoren. HRT og SRT er som regel like lange, men SRT kan bli lengre hvis noe av partiklene i det ferdig behandlede substratet blir ført tilbake i prosessen igjen, slik at mikroorganismene får bedre tid til å bryte ned det organiske materialet. Dette kan f. eks. være hvis industrielt avløpsslam med høyt vanninnhold blir behandlet og en tørrere del av det ferdig behandlede substratet blir ført tilbake i prosessen igjen. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Formel for oppholdstid:

$$HRT = \frac{\text{Netto reaktorvolum [m}^3\text{]}}{\text{Føringsmengde [\frac{m}^3}{dag}]}$$

2.5.4 Organisk belastning

Organisk belastning forkortes med OLR (organic loading rate). Dette er et mål på hvor mye organisk materiale som mates inn i reaktoren og oppgis i kg per m³ reaktor per dag eller gram per liter reaktor per dag. Den organiske belastningen har mye å si for biogassprosessen, da dette er et mål på hvor mye organisk materiale som blir tilgjengelig for mikroorganismene som finnes i reaktoren. En høy organisk belastning gir potensiale for effektiv gassproduksjon i og med at mikroorganismene har tilgang på mye ferskt materiale. På den andre siden vil en for høy organisk belastning kunne inhibere biogassprosessen ved at ikke nedbrutt materiale hopes opp. Dette kan f. eks. være ulike fettsyrer som i sin tur kan forårsake en pH-senking, som resulterer i at prosessen kommer i ubalanse. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Hva som er riktig OLR vil variere noe ift. forskjellige substrat, og sammensetningen og mengden av mikroorganismer i reaktoren. Temperatur har også en del å si for OLR. For mesofil biogassprosess vil normal organisk belastning ligge rundt 2-3 kg VS per m³ reaktor per døgn, mens en termofil prosess kan ligge rundt 4-5 kg VS per m³ reaktor per døgn. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

Formel for organisk belastning:

$$OLR = \frac{\text{Føringsmengde inn} * \%TS * \%VS}{\text{Reaktorvolum} * \text{dag}} \left[\frac{\text{kg VS}}{\text{m}^3 * \text{dag}} \right]$$

2.6 Gasskvalitet og innhold

Gassen som kommer ut av reaktoren er en fuktig gass mettet med vanndamp. Sammensetningen av gassen vil variere ut fra substratet og om prosessen med mikroorganismene fungerer som de skal. Biogass kan inneholde 45-85% metan og 10-45% karbondioksid. I tillegg kan gassen inneholde mindre mengder av ammoniakk, hydrogensulfid, hydrogen, karbonmonoksid, nitrogen og oksygen. (Jarvis & Schnuerer, 2009)

2.7 Gasslager

Gassen som dannes i biogassanlegget kan anvendes på forskjellige måter. Det vanligste er at gassen forbrukes på stedet. Det kan være aktuelt å lagre gassen som en buffer i forhold til den innretning som skal forbruke gassen. For lagring av gass er det mulig å komprimere og kjøle ned gassen til et mindre volum, men med lagring av gass på biogassanlegg er det gass under normalt trykk vi snakker om. Denne tar såpass mye plass at lagring over lengre tid ikke er formålstjenlig, forbruk og produksjon av gassen vil derfor være tilnærmet lik. (Personlig kommunikasjon, J. Morken, 11.mars 2019)

Et alternativ for gasslagring er å bruke tomrommet som blir over substratet inne i reaktoren, dette er en enkel form for gasslager, men lagringsvolumet vil være begrenset. Det er også mulig å ha gasslager over sluttlageret. Denne formen for lager kan være gunstig i og med at det kan være en viss gassproduksjon også i sluttlageret.

Eksternt gasslager er også et alternativ, dette består gjerne av en gasstett pose som fylles og tømmes etter behov. (Morken et al., 2017)

2.8 Anvendelse

2.8.1 Varme

Den mest effektive måten å utnytte gassen på er til å produsere varme til noe som trenger varme. Dette skjer ved at gassen brennes i en fyrkjele. Eksempler på bruk av gass til varme kan være fjernvarmeanlegg, oppvarming av vann, produksjon av vanndamp, m.m. Det er en forutsetningen for å produsere varme fra gassen at man har behov for varmen i nærheten. (Ellingsen & Filbakk, 2014)

2.8.2 Strøm og varme

Produksjon av strøm fra biogassen foregår i noe som kalles en CHP (combined heat power). Dette kan være en gassmotor eller gassturbin som driver en generator, hvor ca. 35% av energien i gassen blir omdannet til elektrisk energi og resten blir varme. Varmen kan hentes ut fra kjølesystemet til motoren og brukes som varmekilde. (Ellingsen & Filbakk, 2014)

2.8.3 Drivstoff

Biogassen kan kjøres gjennom et oppgraderingsanlegg og bli fullverdig drivstoff for kjøretøy. Dette er en prosess som krever dyr teknologi og vil derfor ikke lønne seg for gårdsanlegg i norsk størrelsesorden. For at biogassen skal kunne brukes som drivstoff må den oppgraderes slik at innholdet av metan er minst 97%. Det er også strenge krav til innhold av svovel i gassen, så dette må renses ut for å innfri kravene. (Ellingsen & Filbakk, 2014)

2.9 Biorest som gjødsel

Den massen som kommer ut av reaktoren er ferdig behandlet substrat og omtales gjerne som biorest. Bioresten kan godt brukes som den er til gjødsel på åker og eng. TS- og næringsinnhold i bioresten vil variere ut i fra hva slags substrat som er behandlet.

Generelt vil bioresten inneholde mindre TS enn råvaren inn i anlegget, pga. at for hvert CH₄ og CO₂ molekyl som blir produsert fjernes tilsvarende mengde tørrstoff fra substratet. Dette gjør at bioresten blir mer tyntflytende og lettere å håndtere med gjødselutstyret.

Et annet moment med bioresten er at mye av det organisk bunnede nitrogenet har gått over til mineralsk form og er derfor lettere tilgjengelig for plantene. (Ellingsen & Filbakk, 2014)

Biogassen kan også avvannes og behandles slik at det blir en våt og en tørr fraksjon. Dette er mer vanlig på store biogassanlegg hvor mengdene med biorest blir enorme og håndteringen av biorest blir en større utfordring.

2.10 Oppsummering teoridel

I teoridelen gis det en inngående oversikt over temaet, basert på litteratur. Det beskrives ulike substrat som kan brukes, hvordan prosessen foregår og faktorer som kan påvirke prosessen, som C/N-forhold, temperatur, HRT og OLR. Det er gitt en oversikt over forskjellige prosesser og reaktorer som finnes for biogassproduksjon. Gassens kvalitet, de ulike bruksområdene til gassen og egenskapene til bioresten blir beskrevet.

3. Anlegg i drift

3.1.1 Østersund

Den 24. mars hadde forfatter en utflukt til et biogassanlegg i nærheten av Östersund i Sverige. Det var Mats Gustafsson som viste fram biogassanlegget. Han driver som konsulent med firmaet MMG (Mats mjölk och gas), som jobber med å få i gang rimelige biogassanlegg på gårdsbruk. Poenget til MMG er at bonden selv skal stå for byggingen og bruke standard komponenter som er lette å få tak i, MMG stiller med konsulent for at anlegget skal sys sammen til et velfungerende og rimelig anlegg.

Anlegget ved Östersund er bygd for gjødselmengden fra en besetning med 125 melkekyr og oppfôring av ungdyr. Biogassanlegget blir daglig matet med ca 18 tonn storfe gjødsel (8% TS) og ca 1 tonn myse (20% TS). Reaktoren har en daglig gassproduksjon på 550 m³ per dag, med metaninnhold på 60%. Biogassprosessen foregår på 37 ° C, altså mesofil temperatur. Gustafsson opplyser at dette anlegget kostet 5,5 mill. svenske kroner i 2015, da var alt arbeid innleid.



Figur 6. Bilde viser reaktoren med tilbygg som inneholder et teknisk rom og et rom hvor gassen kommer ut av reaktoren og går gjennom en innretning som skyller gassen med vann.
Kilde: (Hedegart, 2015)

Oppbygning og drift

Biogassanlegget ble bygd og satt i drift i 2015. Selve reaktoren er 600 m³ og er bygget med seks meter høye elementer. Isoleringen er hovedsakelig 10 cm skumisolasjon på utsiden av

betongen, dette tilsvarer ca 20 cm mineralull. Gjødsele renner i en kulvert fra fjøset til en fortank før reaktoren. Myse tilsettes i kulverten. I fortanken er det røreverk og pumpe som pumper en gitt mengde substrat inn i reaktoren med jevne mellomrom. Når nytt substrat pumpes inn kommer ferdig råtnet substrat ut via et overløp i reaktoren. Det ferdigbehandlede substratet holder 37 grader celsius når det kommer ut, dette renner via en egenkomponert varmeveksler før det når sluttkummen. Varmeveksleren fører varme til fortanken.

Biogassen som kommer ut fra reaktoren går gjennom en enhet som skyller vann over gassen, slik at den kjøles ned til ca 15°C. Skyllingen gjør at mye av dampen i biogassen blir rensset ut. Gassen går i rør nedgravd i bakken, enten til et gasslager eller til forbrenningen. Gasslageret er en container med en gasstett pose i. I taket i containeren sitter en sensor som måler nivået på gassposen og dermed gassmengden. Gasslageret er ikke egnet for å lagre gass over lengre periode, men fungerer som en buffer for å få stabil og nok gassmengde til forbrenningen.

Forbrenningen skjer enten i en fyrkjele eller en CHP, som ligger et lite stykke unna reaktoren. Gassen går gjennom en beholder med aktivt kull, som fjerner noe svovel, før den går inn i forbrenningen. Det er også ei pumpe som øker gasstrykket noe, det er verdt å nevne at gasstrykket er nesten like lavt som atmosfærisk trykk.

Fyrkjelen, som er en kombinert olje- og gass-fyr, produserer kun varme. Det brennes stort sett bare gass, men hvis det er problemer med biogassanlegget er det nødvendig med en alternativ fyring. Det kan også være ekstra behov for varme i enkelte perioder, som i korntørkinga, da er det greit å ha ekstra kapasitet i tillegg til biogassen.

CHP-enheten produserer både strøm og varme. CHP-enheten på dette anlegget er en V8 bensinmotor som er ombygd til å gå på gass. Generatoren er i bunn og grunn en elektrisk motor, den fungerer da også som startmotor for den ombygde motoren. Denne løsningen er et rimelig alternativ til fabrikknye løsninger, men like driftssikker. Denne løsningen er så simpel at enhver mekaniker er i stand til å utføre enkel service og reparasjon. Dette anleggets CHP er bygd slik at den enten produserer 30 kW eller 50 kW, dette justeres med å åpne et par ekstra ventiler for gass og luft.

Varmen som produseres brukes i et felles system for både CHP og fyrkjele. Varmen brukes til oppvarming av reaktoren og bygningene på gården. (Personlig kommunikasjon, M. Gustafsson, 24. mars 2019)



Figur 7. **Øverst til venstre:** luke til røreverk, når dette åpnes og propellen heises opp vil et spjeld lukkes slik at reaktoren er tett under vedlikehold av propellen. **Øverst i midten:** container med gasslager. **Øverst til høyre:** CHP, en ombygd bensinmotor med generator og to effektnivå. **Nederst til venstre:** tank med rørsløyfe som tar opp noe varme fra det ferdig behandlede substrater. Det er overløp fra denne kummen til sluttkummen ved siden av. **Nederst til høyre:** Fortank med propell og pumpe som pumper substratet inn i reaktoren. Til høyre for fortanken ser vi en sluttkum nummer to. Alle bilder unntatt de to øverst til høyre er tatt fra toppen av reaktoren. Foto: forfatteren

3.1.2 Tomb

Den 11.mars 2019 hadde forfatter en utflukt til Tomb videregående skole for å beskue deres biogassanlegg. Dette er et anlegg satt opp av Biowas AS og satt i drift i 2010. Energien blir brukt kun til varme. Varmen går til oppvarming av undervisningsbygg.

Oppbygning og drift

Biogassanlegget på Tomb behandler husdyrgjødsel og ferdig hygienisert matavfall som kommer tilkjørt og pumpet inn på en stående lagringstank på 30 m³. Husdyrgjødsel kommer fra fjøset, som ligger like ved. Gjødsel havner først i en fortank på 130 m³ som skal være en buffer i tilfelle tekniske problemer i fjøset.

Biogassprosessen foregår i to reaktorer der hver er 170 m³. Gassen lagres i reaktoren og brennes etter hvert. Reaktoren på Tomb er isolert med 15 cm i veggene, og har en tolags duk på toppen. Det tilføres 12-13 m³ substrat hver dag, der hoveddelen er storfe gjødsel (8% TS) og ca 15% hygienisert matavfall (22% TS). Biogassprosessen er mesofil og holder 35 grader celsius. Gassproduksjon var 25 m³/time, gassen har en metanprosent på vel 60%. Gassen brennes kontinuerlig i en gassbrenner. Omtrent 25% av energien går til oppvarming av reaktorene. Bioresten har tørrstoffprosent på 5,6.

Fylling av reaktoren skjer ved at det først pumpes ut en gitt mengde fra reaktoren til sluttlageret, deretter etterfylles gjødsel og matavfall. Denne måten å fylle reaktoren på krever bare ei pumpe og ett rør inn i reaktoren. Ulempen er at noe av substratet som blir stående i pumperøret aldri kommer inn i reaktoren, da det blir med den mengden som pumpes ut direkte til sluttlageret. (Personlig kommunikasjon, K. Huseby, 11. mars 2019)



Figur 8. oversiktsbilde over biogassanlegget på Tomb. Foto: (Fjørtoft, Morken & Gjetmundsen, 2014)

3.1.3 Jæren

Den 6. april 2019 hadde forfatter en utflukt til Jæren Biogass AS på Voll på Jæren. Eier og driver av anlegget er Olav Røysland, og anlegget er plassert bak grisehuset hans. Dette er et biogassanlegg som har vært et pilotprosjekt for innovasjon Norge. Anlegget består blant annet av en Telemarksreaktor, som er utviklet bl. a. ved Høgskolen i Telemark.

Oppbygning og drift

Dette anlegget skiller seg noe ut i forhold til andre anlegg som har vært besøkt gjennom oppgavearbeidet. Til sammenligning er anlegget hos Jæren biogass AS bygd opp med basis i prinsippet til UASB-reaktor, der bakterier lever på granuler i reaktoren for å øke hastigheten på biogassprosessen. For denne type reaktoren er det viktig at substratet er tyntflytende og har minimalt med partikler. Dette biogassanlegget har to slike reaktorer basert på samme prinsipp, men fra forskjellige leverandører.

For å få et tyntflytende substrat blir gjødselen som skal inn i anlegget separert. Den flytende delen kjøres inn i reaktoren. Den faste delen blir lastet inn i spesialcontainere. Spesialcontainerne har lokk og dører som kan åpnes for enkel inn- og utlasting av den tørre delen av gjødsla, ved hjelp av en hjullaster. Det spesielle med dette systemet er at noe av det flytende substratet fra reaktoren blir pumpet til en av containerne, der væsken dusjes over tørrgjødselen. Væsken renner gjennom tørrgjødselen og tar med seg næringsstoff, den blir deretter samlet opp i bunn av containeren for så å bli pumpet tilbake til reaktoren igjen. Dette skjer ved hjelp av rørgater mellom reaktoren og containerne. På dette anlegget var det et problem at pH-en i prosessen ble høy, det ble antydnet at dette kommer av systemet med at substratet pumpes fram og tilbake mellom container og reaktor.

For øvrig består anlegget av et eksternt gasslager og en gassbrenner. Rensing av gassen er for det meste kondensering fra gasslageret.

Gjødsel som ble brukt i anlegget er hovedsakelig grisejødsel fra egen gård, i tillegg hentes den tørre delen av separert kugjødsel fra gårder i nærheten. Røysland har egen separator som han bruker på gårdene han henter gjødsel fra.

Under dette besøket var det lite fokus på mengder av substrat, oppholdstid og hvor mye gass som ble produsert. Det var derimot fokus på at den tørre resten fra containerne kunne brukes som plantejord. Røysland har også en plan om å bruke dette i jordbærproduksjon som nå er i en oppstartsfasen (april 2019). (Personlig kommunikasjon, O. Røysland, 6. april 2019)



Figur 9. Øverst til venstre: Gasslager. Øverst til høyre: blå og svart tank er reaktorene (telemarksreaktoren er svart), gul teknikkcontainer for styring av pumper m.m, grå container med fyrkjele og fakkell, ståltank i bakgrunnen er en blandetank. I midten til venstre: spesialcontainer for tørr gjødsel. Nederst til venstre: separert kumøkk. Nederst til høyre: mobil seperator.

3.1.4 Prestseter

Den 10. april 2019 besøkte forfatter et biogassanlegg på Prestseter hos Lena-Valle vgs. Skolen åpnet biogassanlegget i november 2018. Biogassanlegget ble levert av firmaet Antec, som har utviklet en egen reaktor, dette biogassanlegget er første av sitt slag i Norge. Morten Kleven viste fram og fortalte om anlegget på skolen. Biogassanlegget var i daglig drift og substratene som ble brukt var gris- og kugjødsel. Det var tanker om å blande inn avfall fra grønnsaksproduksjon i nærområdet etter hvert.

Oppbygging og drift

Anlegget har et forlager på 80 m³ hvor ku og grisekjødsel blandes. Deretter er det en forvarmingstank som varmer opp substratet før det mates inn i den spesielle antec-reaktoren på 60 m³. Når substratet kommer inn i reaktoren er det forskjellige kammer som substratet i løpet av 7 døgn passerer igjennom. De ulike kamrene representerer de forskjellige stegene i biogassprosessen (hydrolyse, syreproduksjon og metanproduksjon).

Reaktoren er en liggende isolert tank som er plassert i et isolert bygg. Mellom de ulike kamrene i reaktoren er det roterende skillevegger med biofilm som sørger for riktige bakterier for biogassprosessen. Dette er noe av det som gjør at oppholdstiden kan senkes fra 25-30 døgn til 7 døgn.

Driftstemperaturen i reaktoren under besøket var 41-42 grader celsius. Ved start av anlegget ble det brukt 37 °C, men ved utprøvinger i forhold til hygienisering ble det forsøkt med høyere driftstemperaturer.

Det er beregnet at gjødselproduksjon på Prestseter er 2300 m³ per år og at biogassanlegget vil produsere 300 000 – 350 000 kWh per år. Gassen forbrennes i en CHP, som produserer både strøm og varme. (Personlig kommunikasjon, M. Kleven, 10 april 2019)



Figur 10. Øverst til vestre: reaktor i grått bygg, forvarmingstank og teknikk i grønn container. Midten til venstre: gasslager og CHP i blå containere. Øverst til høyre: gasslager. Nederst til høyre: biogassreaktor.

4. Biogassanlegg gård

4.1 Utgangspunkt

Som tittelen på oppgaven indikerer skal vi her se hva som skal til for et biogassanlegg for 100 melkekyr. Bakgrunnen for dette er å se på muligheten for gårdsbaserte biogassanlegg for de større melkebrukene i Norge eller et mulig nabosamarbeid, i dag (2019) er kvotetaket på melk 900 tonn.

For videre arbeid med oppgaven må en del forutsetninger legges til grunn:

- For å beregne gjødselmengder tas det utgangspunkt i en årsproduksjon på 900 tonn melk og avdrått per årsku legges til 9000 kg per år. Dette vil gi 100 årskyr.
- Det forutsettes at kviger og okser føres opp til henholdsvis 24 og 18 måneder. Basert på 1 kalv per ku vil det være ca. 180 ungdyr i fjøset. Det legges også til grunn at besetningen er ute på beite ¼ av året, ergo er ¾ av gjødsla tilgjengelig for biogassproduksjon.
- Det forutsettes at anlegget skal ha en ekstra kapasitet på 20 %, Dette med bakgrunn fra boka Biogass. (Lilleengen, 2009)
- Mengde vaskevann, strø, o.l settes til 10% av gjødselmengde tilgjengelig for biogassproduksjon.
- Substratet har en gjennomsnittlig temperatur på 1 °C før det ledes til biogassanlegget
- Biogassprosessen skal foregå ved mesofil temperatur

4.1.1 Valg av reaktortype

For videre arbeid med oppgaven må det velges en type reaktor som skal beskrives.

Ut ifra litteratur og de forskjellige besøkene ble det valgt å jobbe videre med en CSTR-reaktor.

Bakgrunnen for dette er en indikasjon på at dette er en av de rimeligste løsningene med god funksjon. UASB-reaktoren vil være ømfintlig for partikler, som det er en del av i kumøkk. Batch-reaktor kan ha god funksjon, men vil være utfordrende med tanke på at store mengder substrat må varmes opp på en gang. Plugflow-reaktor viser seg å fungere bra, men dette synes å være komplisert teknologi og anlegg på markedet har en relativt høy pris.

4.1.2 Beregning av gjødselmengder

Med utgangspunkt i den definerte besetningen beregnes mengden gjødsel i tabellen under. Det legges til 10% på gjødselmengden som følge av at bruk av flis til strø og vaskevann også havner i gjødsla. Biogassanlegget beregnes med 20% overkapasitet med tanke på eventuell produksjonsutvidelse eller tilsetning av substrat hentet utenfra gården.

Den totale mengden substrat fjøset vil være 2813 m³. Reaktor beregnes ut fra 20% ekstra kapasitet, altså 3376 m³.

	Tonn gjødsel per år	Antall dyr	m ³
Ku, 9000 kg/år	22,4	100	2240
Ungdyr	6,5	180	1170
Total gjødselproduksjon			3410
Gjødsel tilgjengelig til biogassprod. (1/4 reduksjon pga. beiting)			2558
Gjødsel+ 10% strø, spillvann o.l.			2813

Figur 11. Tabellen viser den totale gjødselproduksjon på oppgavens enhet. Verdier for gjødselmengder hentet fra forslag til nye standardtall. (Nesheim & Halvorsen Sikkeland, 2013)

4.1.3 Hydraulisk oppholdstid

Å bruke storfe gjødsel som substrat medfører at oppholdstiden må være relativt lang, vanligvis 25-30 døgn, for å få utnyttet potensialet i gjødsla. Dette er fordi fordøyelsen hos storfe fungerer såpass bra at mye av det lett nedbrytbare materiale allerede er oppbrukt. Til gjengjeld er det i storfe gjødsla mange bakterier og organismer som påvirker biogassprosessen positivt. (Morken et al., 2017). Den hydrauliske oppholdstiden for oppgavens anlegg settes til 30 døgn, dette med tanke på mest mulig utnyttelse av potensialet i gjødselen.

4.1.4 Reaktorstørrelse

Med utgangspunkt i 30 døgn oppholdstid og 3376 m³ potensielt substrat beregnes reaktorens volum ut fra formel for HRT. Fôringsmengde per døgn regnes ut med antall m³ potensielt substrat per år delt på antall døgn per år: $3376 \text{ m}^3 / 365 \text{ døgn} = 9,2 \text{ m}^3$ per døgn. Dette resulterer i en reaktorstørrelse på 277 m³.

Fôringsmengde/døgn, m ³	Hydraulisk oppholdstid, døgn	Reaktorvolum, m ³
9,2	30	277

4.1.5 Organisk belastning

Den organiske belastningen er et mål på hvor mye VS som mates inn per m³ reaktorvolum per dag. Organisk belastning i dette tilfelle regnes ut fra det organiske tørrstoffet som er i den tilgjengelige gjødsel (80% av 9% av 2558) og vil ligge på 1,8 kg VS/m³*døgn. Denne verdien er nokså lav, og kommer av at HRT er lang og at reaktoren er relativt stor. Potensielt vil reaktoren kunne klare en OLR på 2,4 gitt at oppholdstid er 30 døgn og at substratet er storfegjødsel.

	kg substrat	TS	VS	kg VS
Reelt	2557500	9 %	80 %	184140
Potensielt	3375900	9 %	80 %	243065

Figur 12. Tabell viser kg organisk materiale for ett år.

	Føringsmengde kg VS	m ³ reaktor	døgn	kg VS/m ³ *døgn
Reell	184140	277	365	1,8
Potensiell	243065	277	365	2,4

Figur 13. Tabell viser organisk belastning ved gitt reaktorvolum.

4.1.6 C/N-forhold

Som nevnt i litteraturdelen kan C/N-forholdet for storfegjødsel variere med 6-20:1. I og med at dette er vanskelig å fastslå med generelle verdier er dette noe som må ses på i en planleggingsfase for biogassanlegg og det foreligger prøver for faktiske substrat som skal brukes. Med tanke på C/N-forhold vil en eventuell substratblanding være interessant for optimalisere forholdet.

4.1.7 Temperatur

Det velges at biogassanlegget skal konstrueres og driftes med mesofilt temperaturområde, mer spesifikt 37-38 grader celsius. Dette begrunnes med at mesofil ift. termofil driftstemperatur har lavere krav til isolering mtp. varmetap fra reaktoren og nødvendig energimengde for oppvarming av substratet. Et annet moment er at bakteriene som i utgangspunktet finnes i storfe gjødsel er vant til å leve ved kroppstemperatur.

4.2 Gassutbytte

Substrat	TS	VS av TS	Metan- halt	m ³ CH ₄ / VS	ton	m ³ biogas/ ton vv	Nærings- innehåll	ABP- kategori	Mekaniska problem	Øvrig kommentar	Källa
Minkgødsel	68%	71%	66%	220	161		F=19 g/kg P=157 g/kg K=307 g/kg	2			18
Nötflyt-gødsel	9%	80%	65%	213	22		C:N=6-20 Ntot=4,5 % av TS Ptot=1 % av TS	2	Kan orsaka svåmtäcke	Redan delvis nedbrutet - dåligt gasutbyte	1,3,5,6,10,11
Park/träd- gårdsavfall	60%	60%		280				-			7
Potatis	25%	95%	53%	411	186		C:N=35 N=1,5 % av TS	-			4,6,10,16
Potatisblast	15%	80%	56%	317	68			-			4,7
Potatisgröt	15%	93%	60%	300	70		F=1 g/kg P=11 g/kg K=130 g/kg	-		C:N=35	18

Figur 14. Gassutbytte for ulike substrat. Tabell hentet fra den svenske substrathåndboken, (Carlsson & Uldal, 2009)

For å beregne gassmengden fra storfe gjødsel brukes verdier fra tabellen ovenfor. Dette er hentet fra den svenske substrathåndboken som inneholder oversikt over 60 forskjellige substrater med næringsinnhold og deres egnethet og potensiale for biogassproduksjon. Tallene er hentet fra litteraturstudier og egne forsøk som SGC har utført. (Carlsson & Uldal, 2009). I tabellen ser man i siste kolonne kildehenvisninger. For flytende storfe gjødsel (nötflyt-gødsel) er det 6 ulike kilder som har beskrevet biogasspotensiale, dette tyder på at tallene skal være pålitelige.

For storfe gjødsel vil tørrstoffet være 9%, andel VS av TS 80%, m³CH₄/tonn VS 213 og m³ biogass per tonn våt vare 22.

Ut ifra disse verdiene regnes det ut gassutbytte i form av metan og i form av rågass for den tilgjengelige mengde storfegjødsel (2558 tonn). Vi ser i tabellen under at i løpet av ett år skal det være mulig å få ut 56265 m³ biogass der 39 222 m³ av gassen er metan.

Tilgjengelig substrat, tonn	Tonn TS	Tonn VS	M ³ CH ₄	M ³ biogass	
Per tonn		9 %	80 %	213	22
2558		230	184	39222	56265

Figur 15. Beregning av gassmengde i form av metan og total gassproduksjon.

4.3 Energiutbytte

En Nm³ oppgradert biogass tilsvarer 9,77 kWt, (Lilleengen, 2009) Vi går her ut fra at det samme gjelder for beregnet mengde ren metangass (39 222 m³). Dette betyr at fra den mengde gjødsel som denne oppgaven tar for seg vil energiproduksjon fra biogassprosessen bli 383 199 kWt (9,77kWt/m³ x 39 222 m³).

4.3.1 Varme og strøm

Ved bruk av en CHP-enhet vil man basert på en utnyttingsgrad for elektrisitet på 35% kunne hente ut 134 120 kWt elektrisitet (383 199 kWt x 35%). Resterende energimengde vil gå over i varmeenergi, og vil da bli 249 079 kWt varme (383 199 x 65%).

4.3.2 Varme

Ved produksjon av varme vil all energien i gassen gå over til varme ved å brennes. Det vil dermed si at det er potensiale for 383 199 kWt varmeenergi til oppvarming.

4.3.3 Drivstoff

For at et oppgraderingsanlegg for drivstoff skal lønne seg anbefales det en gassproduksjon på minimum 200m³ per time og 1 m³ oppgradert biogass tilsvarer 1,1 liter bensin (Lilleengen, 2009). For denne oppgavens anlegg vil det derfor ikke være hensiktsmessig å tenke på dette som et alternativ. Gassproduksjon per time for oppgavens biogassanlegg vil være 6,4 m³ gass

per time (56 265 m³ / (365døgn x 24timer)). For ordens skyld vil den mengde beskrevet gass tilsvare ca. 43 000 liter bensin.

4.4 Internt energiforbruk

Energiutbytte fra biogassprosessen viser seg å være ikke uvesentlig, men noe av energien må også brukes for å holde anlegget i drift. Dette gjelder særlig oppvarming av substrat og erstatning av varmetap fra reaktoren.

4.4.1 Oppvarming av substrat

For beregning av gassutbytte ble mengde storfegjødning uten at vaskevann og strø var tatt med i beregningen, brukt. For beregninger for oppvarming av substrat må også dette tas med. Mengden substrat som må varmes opp per år vil derfor være 2813 m³, Figur 11, s.35.

For beregning av energimengde som trengs for å varme opp substratet tas det utgangspunkt i at årsmiddeltemperatur i Norge er 1 °C, (Yr, 2019) og at substratet holder denne temperaturen. Vannets spesifikke varmekapasitet brukes for substratet da TS-innhold er relativt lavt. Vannets spesifikke varmekapasitet er 4183 J/kelvin x kilo. (Pedersen, 2018)

«Varmekapasiteten C defineres som forholdet mellom varmen q som tilføres et stoff og den tilsvarende temperaturstigningen ΔT : $C = q/\Delta T$ » (Pedersen, 2018)

Dette gir følgende utregning av energibehov for oppvarming av substratet:

$$Q = C / \Delta T$$

$$4183 \text{ J} / 36 \text{ kelvin} \times 2\,813\,000 \text{ kg substrat} = 326\,854\,972 \text{ J}$$

$$326\,854\,972 \text{ J} / (3600 \text{ sek/time} \times 1000 \text{ W/kW}) = 90\,793 \text{ kWt}$$

90 793 kWt i løpet av et år kreves for å varme opp substratet til biogassreaktoren. Dette er 36% av den varmeenergien som blir produsert med en CHP.

4.5 Tilsetning av substrat

Ved å tilsette andre substrat i biogassprosessen er det mulig å øke gassutbytte. Det er med tanke på dette at oppgavens reaktor er overdimensjonert med 20%. Overkapasiteten eller det potensielle tilleggssubstratet tilsvarer en mengde på 563 m³ per år (3376 m³ potensielt substrat – 2813 m³ tilgjengelig substrat). Hva som kan være et eventuelt tilleggssubstrat vil avhenge av hva det er tilgang på av tilstrekkelig kvalitet i rimelig nærhet. Før man begynner med en substratblanding kan det være hensiktsmessig å teste blandingen i et laboratorium for å finne riktig blandingsforhold og om hvor stor effekt det vil ha på gassproduksjonen.

Det finnes utallige alternative substrater til innblanding og blandingsforhold, men for å understreke hva en tilsetning kan bidra med i gassutbytte kan man se på noen eksempler for hva man kan få inn i oppgavens reaktor.

Tilsetning av 563 m ³ ekstra substrat	Egenvekt	Tonn	kWt/tonn råvekt	Energiutbytte av ekstra substrat, kWt
Hønsemøkk	0,8	450	790	355 816
Sauetalle	0,7	394	588	231672
Sortert matavfall fra storhusholdning	1	563	850	478 550

Figur 16. Effekt av tilsetning av ekstra substrat. Egenvekt hønsegjødsel og sauetalle, ("Norsk landbruksrådgivning," 2014), egenvekt matavfall antas å være lik vann pga lav TS%. Verdier for energi per tonn hentet fra figur Figur 2, side 15.

4.6 Energieffektivisering

For at et biogassanlegg skal produsere mest mulig netto energi er det veldig viktig å ha fokus på internt energiforbruk ved planlegging av anlegget, (personlig kommunikasjon. K. Huseby 11. mars 19)(Huseby, 2019).

4.6.1 Isolasjon

Det er ikke regnet på isolasjonstykkelser for dette anlegget. Ved planlegging av reelle anlegg bør det regnes på isolasjonsmengder for å kartlegge varmetap og energibehov for oppvarming.

4.6.2 Pumpebehov

For å redusere det interne energiforbruket vil man bruke færrest mulig pumper. Ved å bruke et overløp i reaktoren vil man spare en del pumping, da substratet kan renne selv ned til sluttkummen. Dette beror selvfølgelig på at sluttkummen er plassert lavere enn reaktoren. Hvis det er mulig bør reaktoren plasseres slik at det også er selvfall fra fjøset og inn til anlegget.

4.6.3 Geometri

Reaktorens overflate blir mindre per m^3 desto større reaktoren er, som er interessant i forhold til varmetap. Forholdet mellom høyde og bredde vil også spille inn på reaktorens overflate per m^3 . Svenske beregninger har vist at ett optimalt forhold mellom høyde og bredde er 0,75 for en CSTR-reaktor med tanke på varmetap fra overflate,(Svahn, 2006). Samme kilde diskuterer dette opp imot røreverket, og mener at i forhold til optimal omrøring, bør høyde/breddeforholdet være 1,5. Konklusjonen var at god omrøring var viktigere enn varmetap i forhold til geometri. Høyde/breddeforholdet vil også påvirkes av hvilke forutsetninger betongentreprenøren har i forhold til elementer og støpeformer (M. Gustafsson, personlig kommunikasjon, 24. mars 2019). Gustafsson hadde ikke problemer med omrøring i reaktorer som var bredere enn høyden.

For bestemmelse av geometrien til det tenkte biogassanlegget i denne oppgaven tar vi utgangspunkt i 6 meter høye elementer, og bruker formel for volum til sylinder:

$$\sqrt{277 \text{ m}^3 \text{ reaktor} / 6 \text{ meter høyde} / 3,14 * 2} = 7,7 \text{ m}$$

Diameteren på reaktoren vil dermed være 7,7 meter og høyden 6 meter. Høyde/breddeforholdet vil da bli 0,78.

4.6.4 Varmeveksler

Det vil være gunstig å ha en form for varmeveksling fra det utgående substratet til det inngående for å utnytte energien best mulig. Det er på den annen side viktig at denne varmeveksleren er regningssvarende og at man ellers har behov for overskuddsvarmen som produseres av CHP-enheten.

4.7 Økonomi

4.7.1 Kostnadsfunksjon

For å finne investeringskostnaden ved biogassanlegget brukes en kostnadsfunksjon hentet fra, (Hanssen et al.):

$$Y = 5503,7 * X^{0,8894}$$

Der y er investeringskostnaden i 1000 NOK og x er energimengde gass produsert i GWh. Denne modellen er fra 2014, og er basert på søknader innsendt til Enova. I kostnadsfunksjonen er de fleste faktorer tatt med, også forventet investeringsstøtte fra Enova og Innovasjon Norge.

Oppgavens anlegg vil produsere 383 199 kWt gass per år, som tilsvarer 0,383199 GWh. Kostnadsfunksjon for investeringskostnaden vil være:

$$Y = 5503,7 \times 0,383199^{0,8894}$$

$$Y = 2345,05$$

Når y ganges med 1000 NOK blir investeringskostnaden for anlegget 2 345 050 NOK

4.7.2 Referanse budsjettpreis

Ved å kontakte Inrigo har det vært mulig å få budsjettpreis på et komplett biogassanlegg. Inrigo er en leverandør av tekniske løsninger, deriblant fullstendig biogassanlegg. Deres anlegg baserer seg på en CSTR-reaktor med termofil temperatur, med mål om at prosessen går raskere og reaktorvolumet reduseres.

Ved henvisning til Inrigo ble det operert med en mengde substrat på 3000 m³ storfegjødsel. De har mulighet og teknikk til å levere anlegg basert på denne forutsetningen. Med deres teknikk ville reaktoren være 150 m³. Mye av teknikken de ellers bruker til rensing og håndtering av gassen er basert på biogassanlegg som er 20 ganger større enn dette.

I denne oppgaven er det blitt brukt andre forutsetninger for beregning av biogassanlegg, mesofil temperatur. Kontakt med Inrigo er ment som en peilepinn på dagens prisnivå. En estimert pris fra Inrigo er kr 2 400 000 for biogassanlegg, i tillegg kan de levere en gassturbin for strømproduksjon til kr 300 000, (R. S. Kempegowda, personlig kommunikasjon, 4. april 2019). Med investeringsstøtte vil dette gi en investeringskostnad på kr 1 485 000.

4.7.3 Støtteordninger

For gårdsbaserte biogassanlegg er det mulig å søke støtte til innovasjon Norge (IN). Denne støtten er en del av bioenergiprogrammet til IN. Det kan maksimalt innvilges en støtte på 45%, og investeringsbeløpet skal da ikke være over 8 millioner kroner. Det kan også innvilges inntil 50% støtte for forprosjekter og med en ramme på 50 000 kroner. (*Innovasjon Norge*, 2018)

Det gis også et tilskudd for behandling av gjødsel i biogassanlegg. For gårdsbaserte biogassanlegg der all gjødsel fra gården behandles i anlegget, kan tilskudd beregnes ut fra dyretall. Satser for tilskudd er kr 1937 for melkeku og kr 665 for ungdyr, tallene gjelder per årsku. (*Lovdata*, 2015)

4.7.4 Driftsøkonomi

Inntekter

Tillskuddsinntektene for anlegget vil basert på 100 årskyr og 180 ungdyr være kr 313 400.

I forhold til strømproduksjon vil det være mest økonomisk å bruke den produserte strømmen selv, da man sparer utgifter med nettleie og avgifter. Ved kontakt med NTE brukes en strømpris på 1 kr/kWh for gårdsbruk i deres område, denne prisen brukes derfor til utregning av sparte strømkostnader,(NTE, 2019). Med den beregnede strømproduksjon på 134 120 kWt vil dette gi en besparelse i strøminnkjøp på 134 120 kroner. Dette forutsettes at all produsert strøm forbrukes på gården.

Utgifter

Ved drift av et biogassanlegg vil det også være utgifter. Disse knytter seg gjerne opp imot service, samt tilsyn av anlegget og prosessen. Basert på tall fra faktahefte utgitt av Norges bondelag, ("bondelaget," 2011), settes drifts- og vedlikeholdskostnader for anlegget med 100 kyr til 100 000 kr per år.

Kalkyle

Med de nevnte inntekter og utgifter vil det bli et overskudd på kr 347 520.

For å regne på økonomien settes anleggets levetid til 15 år, det forutsettes at vedlikehold dekkes av driftskostnadene.

Med et serielån med 5% rente og 15 års nedbetaling vil gjennomsnittlig årlig kapitalutgift være kr 212 618. Dette gir en gjennomsnittlig årlig margin på kr 134 902 i forhold til overskuddet.

I utgangspunktet vil da anlegget kunne betales ned på 10 år.

Kostnadsberegninger er lagt ved som bilag.

5. Overordnet diskusjon

Gjennom litteraturstudie og en praktisk tilnærming av hvordan et biogassanlegg til en gitt størrelse kan utformes, har det kommet fram interessante momenter i forhold til emnet.

5.1 Reaktortype og dimensjon

For valg av type reaktor ble det vurdert forskjellige egenskaper til ulike reaktorer. De forskjellige besøkene var nyttig i forhold til å forstå virkemåten og forskjellen på ulike reaktorene. Det ble besluttet at en mesofil CSTR-reaktor var det mest riktige for denne oppgavens biogassanlegg. Det var flere faktorer som avgjorde dette. Det sies ikke at ikke andre typer reaktorer vil fungere for de gitte forutsetningene, men mye tyder på den valgte løsningen er av de bedre.

Ved bruk av nye standardtall for beregning av gjødselmengder ble det funnet ut at gjødselmengden som er tilgjengelig for biogassproduksjon fra en besetning på 100 melkekyr med oppfôring av ungdyr var 2813 m³. Dette ble grunnlaget for videre beregninger av størrelser og gassproduksjon. TS-prosenten det opereres med er nogen lunde den samme. I tabellene for beregning av gjødselmengder var TS% oppgitt til 10, men det var uten vaskevann o.l. Ved besøk på Tomb og Åsbo ble det opplyst at TS% lå på 8%.

Reaktorens størrelse ble beregnet til 277 m³ med utgangspunkt i 30 dagers hydraulisk oppholdstid og 20% overkapasitet. Dette ble gjort for med større sikkerhet å kunne oppnå det potensialet for gassutbytte som finnes i substratet. I og med at substratet er storfegjødsel er det forholdsvis mye nedbrutt i utgangspunktet, noe som krever lang oppholdstid for å få ut potensialet. Det er nokså lavt potensielt energiutbytte fra kugjødsel sammenlignet med andre substrater, noe som gjør samrånning aktuelt. Dette er også noe av grunnen til at reaktoren ble beregnet med 20% overkapasitet. Man kan si at aktuelle samrånningmuligheter burde blitt tatt med i de videre beregningene i oppgaven, men dette var ikke ønskelig da storfegjødsel er det eneste sikre substratet man har tilgjengelig. Det er også et moment at eventuelle andre substrater vil føre til et behov for andre tekniske innretninger og andre logistikk-løsninger. Det ble til gjengjeld tatt med en oversikt med eksempler på hvor mye forskjellige tilleggssubstrater kunne øke energiproduksjonen med. Det er ikke til å stikke under en stol at samrånning med andre substrater kan være positivt for totaløkonomien med tanke på økt energiproduksjon og eventuell «gate-fee» (betaling for å ta imot et produkt).

Den organiske belastningen ble beregnet til $1,8 \text{ kgVS/m}^3 \cdot \text{døgn}$. Denne er beregnet med utgangspunkt i den tilgjengelige gjødselen. Ved økning av substrat eller eventuelt annet substrat, vil OLR-verdien være en helt annen. Noe annet som taler for tilsetning av andre substrater er C/N-forholdet. For kumøkk varierer dette fra 6-20:1, mens det optimale vil være 20-30:1. En eventuell tilsetning skulle da være noe karbonholdig materiale. Halm kunne vært et alternativ, men det er et problem at det er vanskelig nedbrytbart og kan skape tekniske problemer i anlegget, som flytedekke og tilstopping i rør.

Temperaturen for anlegget ble bestemt at skulle være mesofil, dette med bakgrunn i litteratur som viser til et lavere energi- og isolasjonsbehov for å holde prosessen i gang. Det var også et argument for valget; at bakteriene som normalt lever i gjødselen er tilpasset denne temperaturen.

5.2 Energiutbytte

Bruken av biogassen vil for gårdsanlegg være aktuelle for varme eller el- og varmeproduksjon, da oppgradering til drivstoff er kostbar teknikk som krever langt høyere gassproduksjon for å gi lønnsomhet. Det ble funnet ut at energien fra gassen vil tilsvare 383 199 kWt. Ved å brenne gassen vil man teoretisk kunne få ut all energien i form av varme. Ved bruk av en CHP vil man teoretisk ha mulighet for å oppnå 134 120 kWt el og 249 079 kWt varme. Dette er teoretiske verdier, i praksis vil man nok ha noe energitap, men dette neglisjeres i denne oppgaven.

Hvis all energi skal brukes til varme er man nødt til å ha et behov for oppvarming. For et storfebruk vil behovet for varme i driftsbygningen være lite i forhold til enkelte andre husdyrproduksjoner, oppvarming av vann kan til eksempel være en måte å bruke varmen på. Det er derimot et behov for elektrisitet, derfor vil en CHP være særdeles aktuelt. Ved å produsere strøm selv, er det også mulig å direkte påvirke økonomien, med sparte strømkostnader. Strøm er også enklere å få avsetning på ift. varme, ifall produksjonen overstiger forbruket på gården. Med dette vil nok en CHP være mest relevant på storfebruk der man ikke har bruk for, eller noe som kan gi avkastning av større mengder varmeenergi.

Det ble beregnet at den energien som trengs for å varme opp substratet er 90 793 kWt. Ved bruk av en CHP til produksjon av el og varme, vil dette tilsvare 36% av den produserte varmen.

Det er da ikke tatt med varmetapsberegninger og eventuell effekt av en varmeveksler. Dette er momenter som må beregnes for prosjektering av aktuelle anlegg.

Energieffektivisering av biogassanlegget har mye å si for netto utbytte av energi. Dette var noe Knut Huseby var opptatt av ved besøk på anlegget på Tomb (personlig kommunikasjon, 11. mars 2019). Mats Gustafsson har også vært opptatt av dette ved planlegging av biogassanlegg (personlig kommunikasjon, 24. mars 2019). Ved å tenke på energieffektivisering i en tidlig fase, vil det være potensiale for å få til gode løsninger. Riktig isolasjonsmengde og å utnytte tyngdekraften til transport innad i anlegget, vil nok være gode tiltak.

5.3 Økonomi

For å beregne kostnaden på anlegget ble det brukt en kostnadsfunksjon utviklet av ENOVA. Funksjonen hadde tatt med de fleste faktorer av betydning knyttet til et biogassanlegg. Bruk av en slik kostnadsfunksjon vil likevel være knyttet til en viss usikkerhet i og med at den er 5 år gammel og at det er mange variabler som spiller inn i slike prosjekter. Beskrivelsen av funksjonen gir inntrykk av at funksjonen er ment for større biogassanlegg, (Hanssen et al.). Kostnadsfunksjonen ga en investeringskostnad på kr 2 345 050, og da er investeringsstøtte medregnet.

Til sammenligning kan Inrigo levere anlegg til noenlunde samme størrelse, men med et annet prinsipp. Fratrukket maksimal investeringsstøtte fra innovasjon Norge vil dette ha en investeringskostnad på kr 1 485 000. I og med at biogassystemet til Inrigo ikke gikk over ens med kriteriene til oppgavens beskrivelse av anlegg, ble resultatet av kostnadsfunksjon brukt for videre vurdering av økonomi. Det kan også hende at noen av kriteriene som ble satt i forhold til oppgavens anlegg bør vurderes endret slik at dette anlegget kan være med i vurderingene, i og med at prisforskjellen her er stor.

Årlig overskudd for oppgavens biogassanlegg ble beregnet til kr 347 520. Inntektene er basert på inntekter vedrørende tilskudd og sparte kostnader til strøm. Kostnader er knyttet til drift- og vedlikehold. Tallene for inntekt vil være noenlunde sikre i og med at vi vet dagens energipriser og tilskuddssatser. Økonomien kan fort endre seg hvis f. eks. strømprisen går opp, da vil den sparte strømkostnaden bli enda større. Hvis det derimot blir mange biogassanlegg

rundt omkring, og at det fører til lavere tilskuddssatser per dyr, vil anleggets økonomi påvirkes negativt.

En investeringskostnad på kr 2 345 050 vil med et serielån med 5% rente og 15 års nedbetaling gi romslig økonomi. Hvis disse beregningene stemmer bør det være en interesse blant større bruk for satsing på utbygging av biogassanlegg.

6. Konklusjon

Gjennom denne oppgaven har det kommet fram at med den gjødselmengde som kommer fra en besetning med 100 melkekyr med oppfôring av ungdyr i løpet av et år vil det være behov for en 277 m³ stor reaktor. Dette er med forutsetning om mesofil temperatur (37°C), 30 dager hydraulisk oppholdstid (HRT), 20% overkapasitet og bruk av CSTR-reaktor (continuous stirred tank reactor). CSTR-reaktoren fylles daglig med en gitt mengde råstoff og tømmes for like mye biorest.

Den energimengden dette vil gi er 383 199 kWt, hvorpå teoretisk 134 120 kWt kan tas ut i form av elektrisitet og 249 079 kWt kan tas ut til varme. 36% av denne varmen kreves for å varme opp substratet som skal inn i reaktoren. Netto varmeenergi for dette anlegget vil derfor være 159 410 kWh.

En tilsetning av andre typer substrat i samme reaktor vil kunne øke gassproduksjonen vesentlig. Ved å utnytte overkapasiteten (20%) til tilsetning av f. eks. hønsegjødsel eller matavfall vil energiutbytte øke med henholdsvis 360 og 480 tusen kilowattimer.

Økonomiske beregninger viser at biogassanlegget vil lønne seg for de forutsetninger og verdier som er brukt for oppgavens biogassanlegg. Kostnadsfunksjonen viser en investeringskostnad på kr 2 345 050, med 15 år nedbetaling og 5% rente vil dette betales ned med god margin.

Vedlegg:

Litteraturliste

- Aamaas, B., Aaheim, A., Alnes, K., van Oort, B., Dannevig, H. & Hønsi, T. (2018). Oppdatering av kunnskap om konsekvenser av klimaendringer i Norge. *CICERO Report*.
- bondelaget. (2011). *bondelaget nettbutikk*.
- Carlsson, M. & Udal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion* Svenskt gastekniskt center.
- Ellingsen, J. & Filbakk, T. (2014). Biogass–Håndbok i etablering og drift av gårdsbaserte biogassanlegg. I.
- Fjellvåg, H. (2018). *Store norske leksikon*. Hentet fra <https://snl.no/hydrolyse>
- Fjørtoft, K., Morken, J. & Gjetmundsen, M. (2014). Dokumentasjon av biogassanlegget på Tomb VGS. *IMT Rapport serie*.
- Hanssen, H. M., Arnøy, S., Morken, J., Briseid, T. & Sørby, I. Biogassproduksjon fra matavfall og møkk fra ku, gris og fjørfe.
- Hedegart, E. P. (2015). NLR. *NLR Trøndelag*.
- Hoen, H. F., Trømborg, E. & Nielsen, A. (2007). Klimagasser og bioenergi fra landbruket-kunnskapsstatus og forskningsbehov. *Rapport utarbeidet på oppdrag fra: Styret for forskningsmidler over jordbruksavtalen. Fondet for forskningsavgift på landbruksprodukter og Norges forskningsråd. UMB-Rapport*.
- Huseby, K. (2019). Omvisning Tomb vgs. I I. Jerpstad (Red.).
- Idsø, J. & Årethun, T. (2013). Biogass i Sogn. I. *Innovasjon norge*. (2018). Hentet fra <https://www.innovasjonnorge.no/no/tjenester/landbruk/finansiering-for-landbruket/fornybar-energi-i-utlandet/>
- Jarvis, A. & Schnuerer, A. (2009). Microbiologic handbook for biogas plants; Mikrobiologisk handbok foer biogasanlaeggingar.
- Lilleengen, S. (2009). *Biogass: miljøvennlig, sikker, lønnsom* Tapir akademisk.
- Lovdata. (2015). Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2014-12-19-1815>
- Løvaas, R. (2016). *Biogass. I*. Hentet fra <https://snl.no/biogass>
- Morken, J. (2019). Omvisning på biogasslaboratoriet II. Jerpstad (Red.).
- Morken, J., Briseid, T., Hovland, J., Lyng, K.-A. K. & Kvande, I. (2017). Veileder for biogassanlegg-mulighetsstudie, planlegging og drift. *IMT Rapport serie*.
- Nesheim, L. & Halvorsen Sikkeland, E. (2013). Mengd utskilt husdyrgjødsel–nye standardtal. *Bioforsk Rapport*.
- Norsk landbruksrådgivning. (2014). *NLR*.
- NTE. (2019). Intervjo om strømpriser. I I. Jerpstad (Red.).
- Pedersen, B. (2018). *Store norske leksikon*. Hentet fra <https://snl.no/varmekapasitet>
- Svahn, J. (2006). Energioptimering av biogasproduksjon. *Umeå Universitet*.
- Yr. (2019). Hentet fra <https://www.yr.no/sted/Norge/klima.html>