



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Gjødsel kvalitet av bioest etter anaerob behandling av svartvann, mat- og hageavfall (i en ANTEC- biogassreaktor)

Fertilizer quality of bio-waste after anaerobic
treatment of black water, kitchen refuse and garden
waste (in an ANTEC biogas digester)

Elena Fitje
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgave er en avslutning for et to-årig masterprogram i vann- og miljøteknikk.

Arbeidet med prosjektoppgaven startet i januar 2019 og ble avsluttet i juni. Det inkluderte teoretiske studier av anaerob nedbryting, praktisk arbeid med prøvetaking og datainnsamling, samt arbeid på laboratoriet, beregninger og dataanalyser.

Oppgaven er tilknyttet SiEUGreen – prosjektet, som vil utvikle praktiske løsninger for urbant landbruk, med naturbaserte systemer for overvann- og avløpssystem og avfallshåndtering.

Miljøproblematikken har alltid engasjert meg og valg av prosjektet, som er knyttet til ressurs resirkulering og grønne teknologier, var ikke tilfeldig.

Dette har vært en krevende og lærerik prosess med en del tekniske og faglige utfordringer. Læringskurven var til tider bratt siden min kunnskap om biogassprosess var nærmest fraværende ved starten, og jeg måtte komme i gang med arbeidet raskt og effektivt.

Jeg vil takke for hjelp og støtte fra mine veiledere John Morken fra NMBU og Roar Linjordet fra NIBIO. Deres veiledning og råd var avgjørende for arbeidsprogresjon, og uten disse ville jeg ikke ha lyktes med å komme fram til resultatet.

Jeg vil likeledes takke personalet på NIBIO laboratoriet på Vollebekk, spesielt Hege Bergheim og Linn Solli for deres hjelp og råd i mitt praktiske arbeid. De gjennomførte de mer avanserte kjemiske analysene på prøvene. Takk rettes også til Ove Bergersen for hjelp med analysene av biogassprøver, samt måling av H₂S – innhold. Jeg takker Uno Andersen for hjelp med prøvetaking, informasjon om ANTEC-reaktoren og for alltid å være behjelpelig med mine spørsmål.

Elena Fitje

15.06.2019, Ås

Sammendrag

I SiEUGreen - prosjektet skal det utvikles smarte løsninger for urbant landbruk. Best mulig ressurs- og energiutnyttelse i denne sammenheng innebærer at det må utvikles praktiske og innovative løsninger for håndtering av avløpsvann og avfall. Det skal bygges et leilighetskompleks i Fredrikstad med separat avløpssystem, grønne tak, muligheter for dyrking av spiselig vekster i nærområdet og i klimaregulerte drivhus. Toalettavfall (svartvann) og kvernet organisk husholdningsavfall skal samles via et vakuumsystem og ledes til en biogassreaktor. Disse avfallsressursene blir omdannet til fast og flytende gjødsel, kompost og energi. Rester fra drivhus og hageklipp kan også tenkes brukt.

For å sørge for en stabil og høy biogassproduksjon er det viktig å se på mengden og sammensetningen av substrat, prosessbetingelser som temperatur og PH, reaktortype og mulige inhiberende stoffer. Til svartvann vil det vanligvis bli valgt en såkalt oppstrømsreaktor der mikrofloraen er pakket i granuler. Denne ble vurdert mindre egnet til innblanding av matavfall og andre tilleggs substrater. Det ble derfor valgt å undersøke ANTEC-biogassreaktoren. Dette er en «plug flow»-reaktor med en biofilm som gjør det mulig med kort hydraulisk oppholdstid og god utnyttelse av metanpotensialet. Svartvann er for tynt til at plug low prinsippet kan tilfredsstilles og reaktoren vil i så fall ligne mer på en vanlig totalomrørt reaktor. Et mål med denne oppgaven var derfor å se om tilsetning av matavfall kunne tilfredsstille kravene til «plug flow» prinsippet.

For å kunne utnyttes som gjødsel må også næringsinnhold og kvalitet på bioresten vurderes. Dersom biorest fra svartvann skal kunne brukes til lokal produksjon av grønnsaker må kravene hygiene være grundig dokumentert. Innholdet av tungmetaller og miljøforurensinger må tilfredsstille kravene i Gjødselvereforskriften.

Svartvann betraktes av Mattilsynet som avløpsslam og de samme begrensingene som gjelder for gjødselvarer basert på avløpsslam vil også gjelde for svartvann. Blant annet kan de ikke brukes for grønnsaker og bær dyrking, som er aktuelt for dette prosjektet. For å kunne utnytte svartvann optimalt må det dokumenteres at biogassreaktoren gir nødvendig kvalitet til biorest i henhold til innhold av tungmetaller, patogene mikroorganismer, miljøgifter og andre potensielt farlige/uønskede elementer for å søke dispensasjon fra regelverket. Matavfall fra husholdninger vil etter animaliebiproduktforskriften plasseres i kategori 3 og trenger behandling tilsvarende denne kategorien.

Det ble valgt å kjøre en termofil prosess (temperatur 55°C og høyre) for å kunne imøtekomme hygieniske krav. Det er også vurdert om energiutbyttet alene er tilstrekkelig til å kunne forsvare en slik investering. Det vil være av stor interesse hvis det kan oppnås positive energiutbytte som kan utnyttes

for oppvarming eller elektrisitetsproduksjon for lokalt bruk. I tillegg kommer naturligvis gjødselverdien og klimaavtrykket.

Eksperimentet hadde tekniske utfordringer i startfasen og var avgrenset med tid, samt i fravær av svartvann ble dette erstattet med grisegylle og dopapir. Dette begrenset muligheten til å vurdere endelig gjødselkvalitet med hensyn til innhold av komponenter som er karakteristiske for husholdninger, som kjemikalier, vaskemidler, medisinrester. Videre forskning og dokumentasjon på disse faktorer vil være nødvendig. Blandingen av grisegylle, dopapir og matavfall hadde et tørrstoffinnhold (2-3%) og en sammensetning som kan forventes i det planlagte avfallssystemet i Fredrikstad.

ANTEC - reaktoren med et volum på 3 m^3 ble matet med 0.3 m^3 substrat daglig, dette tilsvarer OLR på 1.97 kg VS/m^3 reaktor/dag. For analyse ble det valgt en periode på 36 dager (fra 04.04.19 til 10.05.19) med en relativt stabil produksjon. Total produsert mengde biogass for beregningsperiode var 125.31 m^3 , som er $3.48 \text{ m}^3/\text{dag}$ i gjennomsnitt. Metanprosent for beregningsperioden er 68%, daglig metanproduksjon var $2.37 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$. Beregnet metanutbytte var $400 \text{ m}^3/\text{t VS}$.

Innholdet av sagflis i substratet forårsaket usikkerhet med beregningen av massebalanse og nedbrytingsgrad. Nedbrytingsgraden er estimert til ca. 67.1%. Dette viser en god utnyttelse av potensialet.

Resultatene i dette forsøket viser at energieffektiviteten til anlegget vil være avhengig av mengde tilgjengelig råvarer. Det kan anbefales å øke konsentrasjon av organisk materiale ved å ta imot matavfall fra restauranter og dagligvare. Daglig energiproduksjon til forsøksanlegget var ca. 23.7 kW. Beregnet energiforbruk for drift var estimert til 88.11 kWh/dag. Dette tallet ble bekreftet med strømmåleravlesing for et døgn drift, som var 86.56 kWh på en tilfeldig valgt dag. Pumper og elektromotorer i denne reaktoren var noe overdimensjonert i forhold til behovet, men videre forsøk er nødvendig for å konkludere om hvilke tiltak kan hjelpe med å gjøre driften mer energieffektiv.

En termofil prosess gir god hygienisk sikkerhet, som er bekreftet av prøveanalyser. Tracer forsøk med Litium viste imidlertid at de mest mobile substratfraksjonene kan bevege seg mellom kammer i reaktoren fortere enn antatt oppholdstid. Dette korrelerer med målingsdata, som viser svakt eller ingen reduksjon av parametere som VS%, COD, eller VFA gjennom reaktorens kamre. Kort oppholdstid kan påvirke negativt både hygienisk kvalitet og substratutnyttelse. Forsøk med svartvann vil gi et mer representativt bilde av prosessen, metanpotensiale og eventuelle problemer under biogassprosessen, og vil også gi et bedre grunnlag for vurdering av gjødselkvalitet.

Abstract

The SiEUGreen project plans to develop smart solutions for urban agriculture. The best possible resource and energy utilisation in this context involves the development of practical and innovative solutions for sewage water and waste management. The project includes the construction of an apartment complex in Fredrikstad with a separate drainage system, green roofs, opportunities for growing edible crops in the surrounding area and in climate-controlled greenhouses. The toilet waste (black water) and ground organic household waste produced by these buildings should be collected via a vacuum system and sent to a biogas reactor. These resources, along with discarded matter from greenhouses and garden clippings, can be converted into solid and liquid fertilizers, compost and energy.

To ensure a stable high biogas production, it is important to consider the amount and composition of the substrate, the process conditions including temperature and pH, the reactor type and the possible inhibitory substances. For black water, an upstream reactor is usually selected when the microflora is packed in granules. However, this is considered less suitable when food waste and other additional substrates are incorporated. Therefore, the current paper investigates the ANTEC biogas reactor, a 'plug flow' reactor with a biofilm that makes it possible with a short hydraulic residence time and a proper utilisation of the methane potential. Black water is too thin for the plug flow principle to be satisfied, making the reactor resemble an ordinary fully stirred reactor. One of the objectives of the current thesis is therefore to determine whether the addition of food waste can satisfy the requirements for the 'plug flow' principle.

Before they can be exploited as fertilizers, the nutritional content and quality of bio-residues must also be explored. If black water is used for the production of vegetables, hygiene considerations must be thoroughly documented. The content of heavy metals and environmental pollutants must satisfy the requirements of fertilizer product regulations.

The Norwegian Food Safety Authority considers black water to be sewage sludge, and it is therefore subjected to the same restrictions. Amongst other things, fertilisers developed from this type of waste cannot be used for vegetables and berry cultivation, which is relevant in the context of the current thesis. To make optimal use of black water, it is necessary to seek exemption from the regulations by demonstrating that the biogas reactor provides the necessary quality for bio-residues

specifically with regards to the content of heavy metals, pathogenic microorganisms, environmental pollutants and other potentially dangerous or undesirable elements. According to animal by-product regulations, food waste from households is placed in category 3 and requires the corresponding treatment.

The current study proposes running a thermophilic process (temperature 55°C and right) to meet the hygienic requirements. This thesis also explores whether the energy yield alone is sufficient to defend such an investment. If positive energy yields can be achieved, they could potentially be very useful in producing heat or electricity for local use. In addition, the fertiliser value and the climate impression come.

To overcome technical challenges in the initial phase and time constraints, black water is replaced with pig slurry and toilet paper in the current experiment. This limits the ability to assess the content of household components such as chemicals, detergents, drug residues and determine the final fertiliser quality. Further research into these factors is necessary. The mixture of pig slurry, toilet paper and food waste used has a dry matter content (2-3%) and a composition characteristic of the planned waste system in Fredrikstad.

In the experiment, an ANTEC reactor with a volume of 3 m³ is fed 0.3 m³ of substrate daily, corresponding to the OLR of 1.97 kg VS/m³ reactor/day. The analysis covers a period of 36 days (from 04.04.19 to 10.05.19) with a relatively stable production. The total amount of biogas produced during period is found to be 125.31 m³, equivalent to 3.48 m³ per day on average. The methane percentage for the calculation period is 68%, with a daily methane production of 2.37 m³ CH₄. The calculated methane yield is 400 m³/ t VS.

The content of sawdust in the substrate causes some uncertainty in the calculation of mass balance and degree of degradation. The degree of degradation is estimated at approximately 67.1%. This indicates an efficient use of the potential.

The results of this study reveal that the energy efficiency of plants depends on the amount of raw materials available. Accepting food waste from restaurants and grocery stores could increase the concentration of organic matter. The daily energy production of the pilot plant in the experiment is approximately 23.7 kW. The estimated energy consumption is 88.11 kWh / day, a figure confirmed by

a meter reading of 86.56 kWh on a randomly selected day. The pumps and electric motors of the reactor used are determined to be somewhat oversized in relation to the need, but further efforts are required to conclude which measures can help make the operation more energy efficient.

A thermophilic process provides sufficient hygienic safety, as confirmed by sample analyses. Tracer experiments with lithium, however, have revealed that the most mobile substrate fractions can move between compartments in the reactor faster than expected residence time. This correlates with measurement data that indicates little or no reduction of parameters such as VS%, COD and VFA through the reactor chambers. Short residence times can adversely affect both hygienic quality and substrate utilisation. Black water trials can provide a more representative picture of the biogas process as a whole, including methane potential and possible problems, and present a better basis for fertiliser quality assessment.

Innhold

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract	4
Figurliste	10
Tabelliste	11
Bildeliste	13
Forkortelser	14
1. Introduksjon	16
1.1 Bakgrunn til oppgaven.....	16
1.2 Ressursgjennbruk	17
1.3 SiEUGreen – prosjektet	17
1.4 Formål med masteroppgaven	18
2. Teori.....	19
2.1 Anaerob nedbryting	19
2.1.1 Faser av anaerob nedbryting.....	20
2.1.2 Substrat påvirkning.....	24
2.1.3 Temperaturepåvirkning.....	24
2.1.4 Ph – påvirkning	25
2.1.5 Inhibering av nitrater.....	25
2.1.6 C/N forhold.....	26
2.2 Substrat	26
2.2.1 Svartvann.....	26
2.2.2 Matavfall.....	27
2.2.3 Hageavfall	27
2.3 Biorest	28
2.3.1 Aspekter ved bruk av biorest som gjødsel	29
2.3.2 Etterbehandling av biorest for gjødsling	33
2.4 Reaktortyper.....	34
2.4.1 Størrelser	34
2.4.2 Tørre og våte prosesser	35
2.4.3 Tilføringsfrekvens	35
2.4.4 Antall trinn.....	35
2.4.5 Voksested for mikroorganismene	35
2.4.6 Vanlige reaktortyper.....	36

3. Materialer og metoder	37
3.1 Biogassreaktor og substrat	37
3.1.1 Beskrivelse av prosjektanlegg	37
3.1.2 Substrat	44
3.2 Målinger	44
3.2.1 Prøvetaking	45
3.2.2 Tester på laboratoriet	46
3.3 Beregningsmetode	51
4. Resultater og analyser	54
4.1 Metodetesting	54
4.2 Vurdering av reaktoren	59
4.2.1 Prosesskarakteristikker	59
4.2.2 Resultater av kjemiske analyser	60
4.2.2 Biogass mengde og kvalitet	66
4.3 Biorestkvalitet	67
4.3.1 Reduksjon av patogene mikroorganismer	67
4.3.2 Litium - test	68
4.3.3 Næringsstoff	69
5. Masse- og energibalanse	70
5.1 Massebalanse	70
5.1.1 Massebalanse for prøvene fra biorest-tank	70
5.1.2 Massebalanse for kammer 5	71
5.1.3 Massebalanse for suspenderte fraksjonen	72
5.1.4 Massebalanse på COD	73
5.2 Energibalanse	74
5.2.1 Energibehov for oppvarming av substratet	74
5.2.2 Energibehov for kompensasjon for varmetap gjennom reaktorvegg	75
5.2.3 Energibehov for kompensasjon for vannfordamping	76
5.2.4. Totale energibehov og registrerte strømforbruk	77
6. Anslagsberegninger	78
6.1 Substratmengde	78
6.1.1 Anslag av svartvannsmengde	78
6.1.2 Anslag av kjøkkenavfallsmengde	80
6.1.3 Anslag av hageavfallsmengde	81
6.2 Beregninger	81
7. Diskusjon og konklusjon	83

7.1 Prøvetakingsmetode	83
7.2 Reaktorvurdering.....	84
7.2.1 Biogassproduksjon.....	84
7.2.2 Metanutbytte	85
7.2.3 Massebalanse	85
7.2.3 Energibalanse	86
7.3 Substratvurdering.....	87
7.4 Biorestkvalitet	87
7.5 Anslagsberegninger	88
7.6 Konklusjon	88
Litteratur.....	90
Vedlegg 1. Målingsdata	94
Vedlegg 2. COD – målinger og beregninger	114
Vedlegg 3. FOS/TAC forhold	119
Vedlegg 4. Bakterietest	121
Vedlegg 5. Anslagsberegninger	124

Figurliste

Figur 1. Faser av metanogenese.....	21
Figur 2. Kategorier av animalske biprodukter (Mattilsynet 2007, veileder).	31
Figur 3. Prinsippskisse til ANTEC – biogassreaktor (hentet fra http://gasskonferansen.com/images/foredrag/EgilAndersen.pdf Innovative Biowaste Technology, Presentasjon for Gasskonferansen 2016).	38
Figur 4. Skjema av testanlegg.	38
Figur 5. Eksempel på gassanalyse rapport (ikke normaliserte verdier).....	51
Figur 6. TS% i reaktoren den 22.04.19.....	54
Figur 7. VS% av TS i reaktoren den 22.04.19.	55
Figur 8. TS% i reaktoren den 18.04.19.....	56
Figur 9. VS% av TS i reaktoren den 18.04.19.	56
Figur 10. TS% i reaktoren den 15.04.19.....	57
Figur 11. VS% av TS den 15 04.19.....	58
Figur 12. COD i reaktoren den 11.15. og 18.04.	58
Figur 13. VFA – målinger i substratet, biorest og i de forskjellige kammer i reaktoren.....	61
Figur 14. VFA – målinger fra de 5 kammer i reaktoren den 15.04.	63
Figur 15 . COD – målinger for de 5 kammer i reaktoren den 15.04.	64
Figur 17. COD målinger den 25.04.19.....	65
Figur 18. Biogassproduksjon, akkumulert og endringen fra uke til uke.....	66

Tabelliste

Tabell 1. Energiforbruk for metanogenese	23
Tabell 2. Mattilsynets krav til innhold av tungmetaller i gjødselvarer (gjødselvareforskriften)	33
Tabell 3. TS% i reaktoren den 22.04.19.	54
Tabell 4. VS% av TS i reaktoren den 22.04.19.	55
Tabell 5. TS% i reaktoren den 18.04.19.	55
Tabell 6. VS% av TS i reaktoren den 18.04.19.	56
Tabell 7. TS% i reaktoren den 15.04.19.	57
Tabell 8. VS% av TS i reaktoren den 15.04.19.	57
Tabell 9. COD i reaktoren den 11, 15 og 18.04.19.	58
Tabell 10. TS% og VS% av TS i kammer 5 og i biorest-tank.	59
Tabell 11. COD i substrat og biorest.	60
Tabell 12. Verdier for FOS/TAC i de forskjellige kamre.	61
Tabell 13. FOS/TAK-forholdet i starten og i enden av reaktor.	62
Tabell 14. FOS/TAC verdi i prøver fra kam 5 og biorest-tank.	62
Tabell 15. Vurdering og handling ved de forskjellige FOS/TAC-forhold.	62
Tabell 16. VFA, COD og FOS/TAC målinger for prøver fra reaktorkammer den 15.04.19.	63
Tabell 17. VFA, COD og FOS/TAC målinger fra reaktorkammer den 25.04.19.	64
Tabell 18. Gassmålinger.	66
Tabell 19. Mengde av H ₂ S i gassprøvene.	66
Tabell 20. Biogass sammensetning (periode 04 – 29.04).	67
Tabell 21. Reduksjon av patogene bakterier.	68
Tabell 22. Litium spredning gjennom reaktorkamre i 3 dager etter tilsetning av traseer.	68
Tabell 23. Massebalanse TS (biorest-tank).	70
Tabell 24. Massebalanse VS (biorest-tank).	70
Tabell 25. Massebalanse TS (kammer 5).	71
Tabell 26. Massebalanse VS (kammer 5).	71
Tabell 27. Massebalanse TS (suspendert fraksjon).	72
Tabell 28. Massebalanse VS (suspendert fraksjon).	72
Tabell 29. COD massebalanse for biorest-tank og kammer 5.	73
Tabell 30. Energibehov for oppvarming av substratet.	75
Tabell 31. Energibehov for å dekke varmetap gjennom reaktorvegg.	76
Tabell 32. Energibehov fot å dekke fordampingstap.	76

Tabell 33. Beregnede totale energibehov og registrerte energiforbruk for anlegget.	77
Tabell 34. «Husholdningsavfall fordelt på materiale. 1000 tonn» (Statistisksentralbyrå, 2018).....	80
Tabell 35. Beregningsresultater.....	81

Bildeliste

Bilde 1. Konteiner og lagringstankene på anleggsområdet. Biorest pumpes ut og substrat inn via rørledningen.....	40
Bilde 2. Buffertankene, miksertank, pumper, ventiler, rør og annet utstyr inne i konteineren.	40
Bilde 3. Sylindriske vindu i reaktorvegg for observasjon og temperaturmåler, som viser temperatur i konteineren utenfor reaktoren.	41
Bilde 4. Reaktorvegg med kraner for uttak av substrat.	42
Bilde 5. Styringspanelet med merørings funksjoner.	43
Bilde 6. Flasker med prøver fra de 5 kammer i reaktoren.	45
Bilde 7. Forberedelse av prøver for VFA-analyse. NIBIO laboratoriet på Vollebekk.	47
Bilde 8. pH- måleren med elektroden. NIBIO-laboratoriet på Vollebekk.....	47
Bilde 9. Skål med prøver for bestemmelse av tøttstoff og organisk stoff innhold. NIBIO laboratoriet på Vollebekk.	48
Bilde 10. Gasskromatograf men gassprøve. NIBIO laboratoriet på Vollebekk.....	50

Forkortelser

Anaerob nedbrytning – mikrobiell nedbrytning uten tilgang på oksygen

Biorest – (digestate), restprodukt etter anaerob nedbrytning, har flytende og faste fase

BMP - Biokjemisk Metan Potensial, [ml CH_4 /g VS eller m³ CH_4 /kg VS]

C/N-forhold - Forholdet mellom karbon og nitrogen, []

COD - Chemical Oxygen Demand (kjemisk oksygenforbruk (KOF)), [mg/l]

Effluent – Biorest, masse som går ut i en anaerob nedbrytningsprosess

Fakling – Forbrenning av gass

FOS/TAC –TAC presenterer bufferkapasitet i systemet, FOC – er en indikator for VFA- innhold i massen
Brukes for å kontrollere syreinnhold og vurdere organisk belastning, [].

HRT- Hydraulic retention time, og brukes om gjennomsnittlig oppholdstid for væskefasen, [dag]

Influent – Substrat som går inn i en anaerob nedbrytningsprosess

Inokulum – Mikroorganismekultur som starter den anaerobe nedbrytningen

kWh – Kilowattimer, måling av energi

LCFA - Long-chain fatty acids – langkjedede fettsyrer, [mg/l]

Nm³ – Normal kubikkmeter

OLR - Organic Loading Rate, og oversettes til organisk belastning, [kg VS/m³ * dag]

pH – viser til konsentrasjon av H_3O^+ – ion i løsningen, surhetsgrad, []

$pK_a = -\log_{10} K_a$. K_a – syrekonstanten, karakteriserer syrestyrke, []

Reaktor - Beholderen der den anaerobe nedbrytningsprosessen finner sted. En lukket beholder der mikroorganismer bryter ned organisk materiale uten tilgang på oksygen

Spesifikk metanpotensial – Mengde metangass produsert per massenhet organisk materiale, [m³/t VS]

Substrat – Betegnelse på materialet som tilføres en anaerob prosess

TKB – Termotolerante koliforme bakterier

TS – totalt tørrstoff innehold, [%, g/l]

VFA – Volatile fet acid (flytende fettsyrer), [mg/l]

VS - Volatile solids (flytende fast stoff) - Andelen organisk materiale i substratet, [% av TS, g/l]

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn til oppgaven

I forbindelse med prosjektet SiEUGreen, som NMBU er koordinater til, skal arkitektfirmaet Niels Torp AS bygge miljøeffektive leilighetskompleks på tomten til det gamle sykehuset i Fredrikstad.

Det forutsettes at leilighetene skal bli mest mulig energieffektive med lokal avfallsgjenvinning, grønne tak, mulighet til lokal matproduksjon i oppvarmet drivhus, samt energiforsyning fra egen biogassreaktoren. For å sørge for mest mulig gjenvinning skal mat- og hageavfall brukes for produksjon av energi og gjødsel. Leilighetskompleks skal ha separate avløpsanlegg for grå- og svartvann med videre håndtering av avløpsvannet. Det planlegges å bruke en løsningsmetode med en påmontert kvern for findeling av matavfall for videre produksjon av biogass. Leilighetene vil bli utstyrt med vakuumpolett med lavt vannforbruk. Svartvann, samt kvernet matavfall og planterester fra matdyrking skal gå til biogass-produksjon.

I prosjektet er det aktuelt å se nærmere på sammensetningen av substratene, som sendes i biogassreaktoren for å kunne gi den største effekt for biogassproduksjon. Ettersom det er en blanding av mat- og hageavfall samt svartvann er det viktig å vurdere hvilket vanninnhold substratet skal ha.

Siden sammensetningen av biomassen som håndteres i reaktoren påvirker produksjonsprosess og resultatet, må det vurderes hvilken type avfall som skal ekskluderes fra kvernet mat. Faste rester etter gassproduksjon blir brukt som gjødsel, og må derfor bli tilstrekkelig hygienisert. Derfor er det viktig å opparbeide temperatur/tid- forhold i reaktoren, også med hensyn på å minimisere energiforbruk for prosessen.

For testing ble det valgt en ANTEC – biogassreaktor. Dette er en reaktor med høy effektivitet som gir lave kostnader og høy utgang av produsert gass.

Formål med oppgaven er å forsøke å beregne nødvendig reaktorstørrelsen/volum, samt estimere produksjonsmengde ut ifra antall innbyggere. I tillegg vil oppgaven vurdere kvaliteten til bioest etter biogassprosessen og muligheter for å bruke denne som gjødsel i matproduksjon, samt vurdere hygieniske kvaliteter og behov for etterbehandling.

1.2 Ressursgjennbruk

Problemer i forbindelse med miljøforurensing, ressursmangel og avfallshåndtering blir mer og mer aktuelle. Det er en stor etterspørsel etter teknologi for vannrens, avfallsgjenvinning, og ressurs- og energibesparelse. Nødvendigheten med ressursgjenvinning blir åpenbart for hvert enkelt menneske også i hverdagsliv. Teknologien går fra sentraliserte løsninger på fabrikknivå, som håndterte innsamlet avfall fra husholdninger, industri og landbruk, til lokale løsninger, hvor hver av oss skal bidra med ressursbesparelse i våre daglige aktiviteter.

De fleste kommuner i landet har innført avfallssortering. Hytter og hus som ikke koblet til sentralisert avløpssystem må installere egne lokale vannrenseanlegg. Brukte ting og klær samt avfall som inneholder farlige, giftige og forurensende stoffer samles på miljøstasjoner. Ubrukt medisin kan leveres til apoteket.

Problemer knyttet til avfallshåndteringen, spesiell miljøforurensing, er enda mer aktuelle i tettbefolkede land, som Kina, India, og enkelte EU-land. EU setter mer fokus på sirkulær økonomi med bedre ressursutnyttelse og avfallshåndtering.

1.3 SiEUGreen – prosjektet

Prosjektet SiEUGreen er en del av EU programmet Horisont 2020 (Løwe, 2018). Dette er et internasjonalt program som skal styrke urbant landbruk.

Prosjektet har til sammen 18 aktører i Europa og fem i Kina. Målet er å fremme nye teknologiske løsninger for tettbebygde områder som både kan hjelpe med å spare ressurser og miljø, samt å «flytte» naturen nærmere byene ved å gjøre disse områdene grønnere. Prosjektet forsøker å opparbeide praktiske løsninger for urban mat-dyrking og resirkulering, samt å utvikle lokal vannrenseteknologi og avfallshåndtering.

Prosjektet bruker byområder i Tyrkia, Danmark, Kina og Norge. I Norge det er Fredrikstad, hvor gamle Fredrikstad sykehuset skal bygges om til leilighets kompleks men nye teknologiske løsninger for avløp og avfallshåndtering, grønne takk og dyrkingsarealet for matproduksjon.

Prosjektkoordinatør er Petter Jensen som er professor ved Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA). Jensen beskriver det praktiske formålet med prosjektet som følgende: å «bygge energieffektive løsninger som gjør at man kan ha det komfortabelt hjemme med 10 % av dagens vannforbruk - og kanskje også 10 % av energi- og oppvarmingsforbruket vi har i dag» (Løwe, 2018).

Prosjektet inkluderer urbant landbruk, det vil si at innbyggere skal selv produsere sin egen mat. Dyrking av grønnsaker, bær og frukt skal være mulig i byen ved hjelp av innovative teknologier.

Fra Norges sin side deltar Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) i prosjektet. NMBU er koordinater for hele prosjektet (European Commission, 2017).

1.4 Formål med masteroppgaven

Leilighetskomplekset i Fredrikstad har som mål å være energieffektive og miljøbesparende. Matavfall fra husholdninger, sammen med svartvann og hageavfall, skal som nevnt brukes for produksjon av biogass.

Noen av formålene for prosjektet er å finne ut om avfallsutnyttelse via biogassproduksjon er lønnsomt, samt om biorest vil egne seg som gjødsel for matdyrking.

Det er tenkt å bruke en ANTEC – biogassreaktor. Dette er en UASB -reaktor som kan brukes på de fleste typer organisk avfall, og som viser seg å være veldig effektiv med opptil 98 prosent utnyttelse av biogasspotensielle med kort hydraulisk oppholdstid (Antec Biogas AS, 2015-2018).

I masteroppgaven skal jeg estimere avfallsmengdene fra husholdningene, svartvann og hageavfall, samt beregne nødvendig reaktorvolum. Jeg vil i tillegg estimere mengde biogass utfra avfallskaraktistikker.

Jeg skal også undersøke om ANTEC-biogassreaktoren kan tilby tilstrekkelig nærings- og hygienisk kvalitet på biorest ved termofil anaerob prosess slik at denne kan bli brukt som gjødsel til grønnsaksproduksjon.

2. Teori

2.1 Anaerob nedbryting

Ved anaerob nedbryting omdannes organisk materiale ved bakteriell nedbryting uten oksygen tilgang. Først omvandler syreproduserende bakterier organiske forbindelser til organiske syrer og alkoholer. Videre bryter en annen type metanproduserende bakterier disse produktene ned til metan (CH_4), karbondioksid (CO_2), vann og noe H_2S osv. Resten inneholder også faste stoff som består av biologisk tungt nedbrytende materiale, som ikke kan behandles i denne type anlegg. Normalt vil produsert biogass bestå av 65-70 prosent av CH_4 , og 30-35 prosent av CO_2 (Ødegård, 2014).

I naturen foregår anaerob nedbryting blant annet i myrer eller søppelfyllinger hvor naturlig biogass blir produsert. Anaerob nedbryting foregår også i septiktank som brukes for innsamling av avløpsvannet fra enkelt bolig for videre behandling på et renseanlegg.

Anaerob stabilisering brukes for behandling av blant annet avløps slam, matavfall, produksjonsrester av industri og landbruk. På denne måten kan man oppnå ressursgjennbruk og bedre ressursutnyttelse.

Anaerob behandling er foretrukket for ustrukturerte materialer med høyt innhold av lett nedbrytbare organiske forbindelser (Veeken & Hamelers, 1998, november).

For å øke hastigheten brukes det oppvarming av massen i tanken. Temperatur, behandlingstid og type organisk materiale påvirker nedbrytings prosess og sammensetning av sluttkomponentene. Prosessen gir et energioverskudd. Ved industriell energiproduksjon går en del av den produserte energien til oppvarming av rånetanken, mens resten kan brukes for andre formål.

Den produserte blandingen av CH_4 og CO_2 kalles biogass. Den produserte gassen trenger rensing før den kan brukes videre. Rensing innebærer fjerning av vanddamp og H_2S . Det ferdige produktet kan brukes for produksjon av elektrisitet, oppvarming, samt som biodrivstoff for transport.

Ved anaerob nedbryting dannes det et sluttprodukt - biorest eller biogjødsel, som er rik på næringsstoffer (Biogass Østfold, 2015). De fleste næringsstoffene beholdes i bioresten. Sinkes bare innholdet av karbon, som går for produksjon av metan og CO_2 . Følgende endres C/N forholdet. Andre elementer som K, N, P er fullt bevart i fast biorest.

Fosfor er et nødvendig næringsstoff for biomasse. Bruk av fosfor med andre elementer, som nitrogen og kalium i kunstgjødsel er aktuelt for landbruket. Behovet for dette øker, samtidig som kjente tilgjengelige ressursene av fosfor er begrenset. Derfor er det aktuelt med utvinning av næringsstoffer fra bioavfall, blant annet svartvann, siden urin er en av de største sekundære kildene til fosfor.

Følgende faktorer påvirker anaerobe prosessen:

- Fravær av oksygen
- Temperatur
- Syre-base balansen, pH (optimalt mellom 6 og 8)
- Ammoniakk (NH₃)- konsentrasjon
- Sammensetning av råstoffene, innhold av tørrstoff (TS%)
- C/N forhold (optimalt 16-19)
- Tilstedeværelse av mikroelementene som S, Ni, Co, Mo, Fe, Se, Wo, Zn, Cu, Mn (Wendland, januar, 2009).

2.1.1 Faser av anaerob nedbryting

Nedbrytingsprosessen kan deles inn i fire faser:

Hydrolysefase, hvor komplekse organiske molekyllære forbindelser brytes ned til mindre komplekse som kan bli brukt til næring for bakterier.

Acidogenese (fermentering)(Boe, 2006) – produkter til hydrolysefase oksideres til VFA (volatile fatty acids) – flyktige fettsyrer, alkohol og ammoniakk.

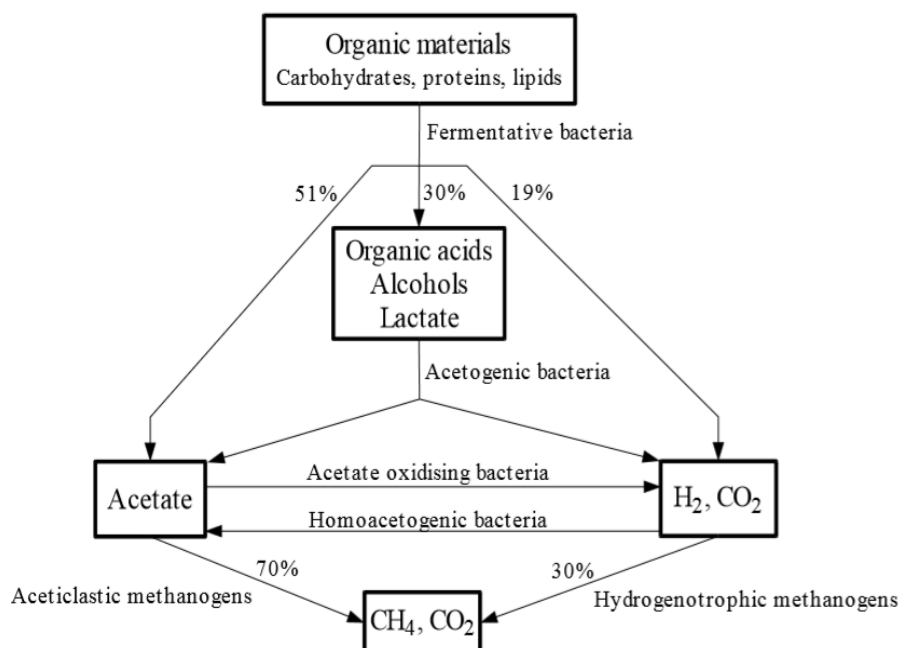
Acetogenese - alkohol og VFA omdannes til eddiksyre eller hydrogen og karbondioksid.

Metanogenese - eddiksyre, karbondioksid og hydrogen omdannes til metan og karbondioksid (Wendland, januar, 2009).

Det er mikroorganismer som driver prosessen, og disse er følsomme for livsbetingelsene. Hver av disse fasene trenger bestemte forhold for at reaksjonen blir stabil og har tilstrekkelig hastighet. Blant disse kriteriene er pH, temperatur, samt tilstedeværelse av mikroelementer som S, Ni, Co, Mo, Fe, Se, Wo, Zn, Cu, Mn (Wendland, januar, 2009).

Skjema for biogass prosessen gitt i Boe (2006) viser faser i prosessen, og forholdet mellom de produserte stoffene (figur 1).

Figur 1. Faser av metanogenese



2.1.1.1 Hydrolysefasen

I hydrolyse, eller desintegrering, deles organiske forbindelser som fett, proteiner, og karbohydrater ned til mindre komplekse organiske forbindelser som sukker og aminosyrer. Disse kan slippe gjennom cellevegger og blir tilgjengelig for videre nedbryting. Denne prosessen forgår ved hjelp av enzymproduserende bakterier.

Hastigheten til hydrolyseprosessen avhenger av organisk material størrelse, form, overflateareal, biomassekonsentrasjon, enzymproduksjon og adsorpsjon. Hydrolyse er derfor en funksjon av både biomasse og substratkonsentrasjon (Boe, 2006). Siden partikkelstørrelsen påvirker tiden mikroorganismer bruker på nedbryting, kan denne fasen bli begrensende for biogassprosessen hvis substratet ikke er homogent og inneholder dårlig oppmålt organisk materiell. Hydrolyse ble vist å være et hastighetsbegrensende trinn for fordøyelse av høyt partikulært substrat som svinavfall, storfe gjødsel og kloakkslam, mens metandannelse er det hastighetsbegrensende trinn for lett nedbrytbart substrat (Boe, 2006).

2.1.1.2 Acidogenese/fermentering

Fermentering er en mikrobiell prosess hvor det organiske molekylet skal deles opp i enklere biokjemiske forbindelser, som videre blir energikilder (næring) til mikroorganismer. En del av

molekylet som skal oksideres virker som en midlertidig elektronmottaker i fravær av eksogene elektronacceptorer som nitrat eller sulfat (Boe, 2006). Her dannes det forskjellige mellomstoff, som acetat, melkesyre, sprit eller VFA.

Den dominerende reaksjonstypen er avhengig av flere faktorer som substratkonsentrasjon, pH og konsentrasjon av oppløste hydrogen i substratet. Under meget høy organisk belastning blir melkesyreproduksjon betydelig. Ved lav pH (<5) økes produksjonen av etanol, mens høyere pH gir høyere VFA. Ved pH <4 kan alle fermenteringsprosesser avta (Boe, 2006). Hydrogenpartialtrykk har størst innflytelse på fermenteringstype. Ved lav partiell trykk av hydrogen blir fermenteringsveien til acetat og hydrogen favorisert (Boe, 2006).

Fra figur 1 viser karbonstrømningsdiagrammet at under stabile forhold bidrar fermenteringsveien til acetat og at hydrogen er den viktigste karbonstrømmen til metandannelse. Produktene fra gjæringstrinnet består av ca. 51 prosent acetat, 19 prosent H₂, og resten er mer reduserte produkter som høyere VFA, alkoholer eller laktat (Boe, 2006).

2.1.1.3 Acetogenese

I denne fasen skjer produksjon av eddiksyre, som er den viktigste næringskilde for en type av metanproduserende mikroorganismer. Fermenteringsprodukter som fettsyrer, lange karbonatforbindelse, og alkoholer kan ikke direkte brukes i metanproduksjon. Under acetogenese oksyderes disse produktene til eddiksyre og H₂.

Acetogenese utføres av to grupper av bakterier. Den første er representert av acetogene bakterier som fermenterer flyktige fettsyrer, noe som fører til dannelse av acetater og frigjøring av hydrogen. Den andre gruppen av bakterier er deltager i syntesen av eddiksyre ved reduksjon fra karbon og karbondioksid.

Temperaturen påvirker acetogene reaksjoner, og det forventes at den organiske syrenedbrytingen blir raskere under høy temperatur (Boe, 2006).

2.1.1.4 Metanogenese

Det er den siste stadium av anaerob nedbryting når selve metan og karbondioksid gass blir produsert fra eddiksyre og CO₂/H₂.

Metanogene mikroorganismer hører til en gruppe som heter Archaea eller arker (Fossum & Høyland, 2019). Det finnes forskjellige typer arkebakterier. Den metanogene arkea er i stand til å vokse direkte

på H₂/CO₂, acetat og annen en-karbonforbindelse som formiat, metanol og metylamin (Boe, 2006). Noen metanogener kan bare benytte ett substrat, andre metanogener er mer allsidige.

Man kan skille mellom 2 hovedtyper reaksjoner: acetatforbrukende og hydrogenforbrukende.

Metanogenese påvirkes av reaktorens driftstilstand, som temperatur, hydraulisk lasthastighet (HLR), organisk lasthastighet (OLR) og fôrblanding.

Tabell 1 viser de viktigste reaksjonstyper for metandannelse og deres energiforbruk.

Tabell 1. Energiforbruk for metanogenese (Boe, 2006)

	Reaction	ΔG° (kJ/mol)
Hydrogenotrophic methanogenesis	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-135.0
Aceticlastic methanogenesis	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-31.0
Acetate oxidation	$\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2$	+104.0
Homoacetogenesis	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$	-104.0

Hydrogenotrofisk metanogenese og homoacetogenese forbruker hydrogen, mens aceticlastisk metanogenese og acetat oksidasjon forbruker acetater.

Under standard temperaturer dominerer hydrogenotrofisk metanogenese over homoacetogenese, og aceticlastisk metanogenese dominerer over acetatoksidasjon. Hydrogenotrofisk metanogenese trenger høyt hydrogenpartialtrykk, mens aceticlastisk metanogenese er uavhengig av hydrogenpartialtrykk (Boe, 2006).

Ved høyere temperaturer (> 30 °C) blir acetatoksidasjon gunstigere. Imidlertid fungerer aceticlastiske metanogenese også ved høy temperatur, og de vil derfor konkurrere om acetat. Ved høye acetatkonsentrasjoner er aceticlastisk metanogenese dominerende over acetatoksidasjon. I ekstreme termofile forhold (> 65 °C), som ligger utenfor den optimale temperaturen (63 °C) til aceticlastisk metanogen, dominerer acetatoksidasjon.

Under psykofile forhold (<15 °C) er aktiviteten til hydrogenforbrukere (hydrogenotrofisk metanogenese og homoacetogenese) svært lav. Homoacetogenese tar over som den viktigste hydrogenfjerningen, og metandannelse gjennom aceticlastiske metanprodusenter blir dominerende.

Imidlertid er aceticlastisk metanogenese mer følsom for ammoniakk enn hydrogenforbrukende metanogenese. Acetatoksidasjon kan dominere ved moderate temperaturer (mesofile eller under) hvis høye ammoniumkonsentrasjoner hemmer de aceticlastiske metanogener.

I de ordinære anaerobe reaktorene er acetat forløperen for opptil 70 prosent av total metandannelse mens resten kommer fra H_2/CO_2 (Boe, 2006).

I psykrofil tilstand er acetoklastisk metanogenese kjent for å være den dominerende reaksjonstype for metanproduksjon.

Metanogenese fjerner hydrogen og acetat fra systemet og har dermed sterk innflytelse på både acetogenese og fermentering. Hydrogenotrofe metanogenese opptrer syntrofisk samtidig med acetogenese. Hydrogenotrofisk metanogenese er en primær regulator i den anaerobe prosessen, og dens funksjonsfeil vil påvirke de acetogene bakteriene og fermenteringsprosessen som helhet (Boe, 2006).

I en kontinuerlig reaktor foregår alle disse prosessene parallelt samtidig og gassproduksjon skjer kontinuerlig. Likevel har de forskjellige bakterietypene og arker spesifikke krav til oppholdsmiljøet for å kunne utføre vitale funksjoner, samt for produksjonsprosessens effektivitet.

Anaerob nedbryting av biomasse trenger en balanse mellom hydrolyse og metanogenese fordi metanproduserende arker er langt mer følsomme overfor akkumulering av VFA og tilsvarende pH-fall i forhold til surogene og fermenterende bakterier. Hvis hydrolysehastigheten er høyere enn metanogenhastigheten, kan akkumulering av VFA og hydrogen føre til irreversibel surgjøring av reaktoren (Veeken & Hamelers, november 1998,).

2.1.2 Substrat påvirkning

Resulterende mengde av metan er avhengig av tilgjengelig COD eller VS i substratet. Utbyttet blir større hvis det organiske materiale er lettere nedbrytbar.

På denne måten blir en kontinuerlig prosess avhengig av mengde tilsett substrat. I tilfeller hvor metning av reaktoren skjer for fort, øker mengden av VFA, noe som igjen synker pH og inhiberer metanogenese (Boe, 2006).

2.1.3 Temperaturepåvirkning

Det skiller mellom tre temperaturregimer for anaerob nedbryting: psykrofil - ved temperatur mellom 10 til 20 °C, mesofil – ved temperatur mellom 20 til 40 °C, og termofil mellom 50 til 60 °C. Ved hver av disse temperaturintervallene er det spesifikke mikroorganisme grupper som dominerer i prosessen.

Ved lave temperaturer (psykrofil prosess) foregår bakterieveksten langsommere, noe som resulterer i lengre retensjonstid og større reaktorvolumer, det vil si lav effektivitet. Imidlertid kan psykrofil anaerobprosess være fordelaktig i regioner med lave sesongmessige temperaturer (vinter).

De fleste av anaerobe systemer opereres ved mesofile forhold fordi de mesofile mikroorganismene er mer robuste, og det finnes i flere arter av disse.

Termofil nedbryting er mer følsom for operasjonelle problemer. Den velges som regel når er det strenge krav til fjerning av patogener.

2.1.4 Ph – påvirkning

Hydrolyse fase foregår best med pH – verdi rund 6.0. Den optimale pH for metanogenese er mellom 6,5 og 7,5. For lave pH (surt miljø) er kritiske for metanogenese, der prosessen kan sakke ned eller stoppe opp. Ved metanogenese, hvis metandannelse går saktere enn syredannelse, faller pH og dette er kritisk til metanproduserende bakterier.

2.1.5 Inhibering av nitrater

Inhibitorer for anaerob nedbryting er VFA, LCFA, salt, ammonium og sulfider, samt tung metaller og antibiotika (Boe, 2006).

I svartvann finnes det nitrogen i form av urea. Det blir videre spaltet ned til ammonium-ion NH_4^+ og karbonat ion CO_3^{2-} . Nitrogen er nødvendig for veksten av mikroorganismer i den anaerobe prosessen. Derfor er tilstedeværelse av ammonium positivt.

Ammonium-ion NH_4^+ og fri ammoniakk NH_3 er i likevekt i substratet. Denne likevekten styres av temperatur og pH. Det er den frie ammoniakk NH_3 som er hemmende for metandannelse. Likevel virker høy konsentrasjon av ammoniakk inhiberende på metanproduksjon. De metanproduserende arkene er sensitive til ammoniakk. Dette gjelder i høyere grad mikroorganismer som bearbeider acetat (aceticlastic metanogenese), i forhold til de som bruker hydrogen (hydrogenotrophic metanogenesis) (Wendland, januar 2009).

Dersom temperatur eller pH øker, øker også konsentrasjonen av fri ammoniakk og bakterievekst hemmes. Siden eddiksyredannelse stopper, øker konsentrasjon av VFA, som igjen fører til lavere pH. På denne måten oppstår en ny balanse. Termofil prosessen sees på som mer sensitive til ammoniakk inhibering (Wendland, januar 2009).

2.1.6 C/N forhold

Forholdet mellom karbon og nitrogen i substratet kan påvirke prosessen. Begge elementene er nødvendige for cellevekst. Karbon skal brukes for metan og CO₂ produksjon. For mye nitrogen (lavt C/N forhold) i forhold til karbon vil forårsake ammonium akkumulering og pH økning, som er negativt for metanproduserende arker. Ifølge Substrathåndbok (Carlsson, februar 2009) bør C/N forholdet bli ikke lavere enn 10-15, men ikke høyere enn 30. Ved for mye karbon i forhold til nitrogen reduseres nedbrytingen. Hvis nitrogennivået er begrensende (høyt C/N-forhold), hindres mikroorganismens vekst, populasjonen holdes liten, og nedbrytningsprosessen minker. Det tar derfor lengre tid for mikroorganismer å konvertere det tilgjengelige organiske materialet.

2.2 Substrat

Substratet som var planlagt å bruke for biogassproduksjon skulle bestå av svartvann, matavfall fra husholdninger, planterester fra egen matdyrking, samt avfall fra plenklipp og blomsterkasser. Senere dette var endret til bare matavfall og svartvann, hagerester skal gå til kompostering.

2.2.1 Svartvann

Svartvann er avløpsvann fra toalettet som inneholder, urin, fekale masser, dopapir og vann. Med bruk av vakuumtoalettet kan vannmengden bli betydelig redusert. Et standard vakuumtoalett bruker ca. 1. liter vann i vanlig bruk. I husholdningen brukes det en del vaske- og desinfeksjonsmidler for toalettvaske som inneholder kjemiske midler som klor, og dette kan påvirke nedbrytningsprosesser. I prosjektet er det ikke kjent hvordan rengjøring av vakuumtoalett vil gjøres, og om det vil bli brukt kjemiske midler. Der er mulig også å sortere bort dopapir. Komposisjon av svartvann fra vakuumtoalett blir da annerledes fra ordinært svartvann.

Svartvann er rikt på organisk stoff som karbon, fosfor og nitrogen, noe som gjør det attraktiv som gjødsel for jordbruk. Samtidig er det en kilde for patogene mikroorganismer og parasitter, og det er derfor nødvendig med hygienisering. Urin og avføring fra mennesker inneholder også medisinrester. Et spørsmål er dermed om disse vil brytes ned i reaktoren eller om de kan videreføres til gjødselsprodukt og videre til produsert mat.

I Norge stilles det strenge krav for biogjødsel som produseres ved konvensjonelle storskala renseanlegg av avløsslamm fra sentralisert avløpsanlegg. Dette er av hensyn til mulig smittefare. Hva med svartvannslamm? Gir anaerob behandlingen tilstrekkelig hygienisering ved bruk av ANTEC-reaktoren? Blir bruk av

produsert gjødsel godkjent av mattilsynet? Gjødselvarer med innhold av avløpsslam har vesentlige begrensninger i bruksområdet (Lovdata, 2019).

2.2.2 Matavfall

Det er tenkt at det skal brukes en kvern montert i kjøkkenbenken og ikke i selve vaskekudden. Dette er for å redusere mengde vann i substratet. Det vil også bli nødvendig å opparbeide en løsning for hvordan kvernet masse skal føres inn i innsamlingstank, samt om det vil bli begrensninger for hvilke typer matavfall som skal kunne brukes.

Matavfall kan inneholde rester av innpakning som plast og papir, beinrester, fett, olje, salt, nitrater (grønnsaker), konserveringsmidler, kunstige smakstilsetninger og fargestoff.

Resulterende gass og biorest struktur, samt prosessen er avhengig av sammensetningen av substratet. Det betyr at sluttproduktet kan ha sesongvariasjon i forhold til hvilken type mat som er mest brukt under visse perioder som jul, påske og sommerferie.

Miljødirektoratet anslår at mengden av matsvinn fra norske husholdninger tilsvarer 46,6 kg per person årlig (Energi- og Miljøkomiteen, 15. februar 2018).

Energi- og miljøkomiteen setter i sin innstilling til Stortinget blant annet fokus på reduksjon av matsvinn fra husholdninger samt fra matindustrien og dagligvarebransjen (Energi- og Miljøkomiteen, 15. februar 2018, s. 21). Komiteen kom til fram følgende forslag:

Stortinget ber regjeringen fremme forslag om matkastelov som omfatter næringsmiddelindustrien og matvarebransjen. Loven bør omfatte påbud om å donere all spiselig overskuddsmat til veldedige formål og sekundært til dyrefor, samt påbud om å offentliggjøre nøkkeltall knyttet til matsvinn og reduksjon av matsvinn.

(Energi- og Miljøkomiteen, 15. februar 2018, s.36)

2.2.3 Hageavfall

Substratet bør være mest mulig homogent, det vil si inneholde stoffer med nærmest lik nedbrytingstid. Planterester kan øke det organisk innhold i substratet, men trenger lengre tid for nedbrytingen enn rene matavfall. Tungt nedbrytbare partikler, som hemicellulose og lignin, går videre til faste fraksjon av biorest.

Det kan være aktuelt med forbehandling av hagerester med mulig bruk av kjemiske stoffer som eskalerer fermentering, som for eksempel NaOH (Morken et al., 2017). Det er forutsatt at planterester fra terrassekasser og drivhus skal brukes sammen med andre komponenter i substratet. Det brukes ofte kjemikalier for å hindre plantesykdommer eller for å øke produksjonen. Disse benyttes både ved industrielt og privat landbruk. Husholdninger kan kjøpe blomster og potteplanter som ikke er spiselige vekster, og som kan inneholde uønskede stoffer, mikroorganismer eller miljøgifter. Det stilles spørsmål om disse kan påvirker prosessen eller gå over i biorest. Det bør derfor vurderes hvor høy konsentrasjonen slike forurensende stoffer kan bli i bioresten.

Planterester fra egne drivhus og hage via produsert biorest kommer til å bli ført tilbake på samme arealer. Med tanke på å redusere faren for akkumulering av miljøgifter kan det forutsettes økologisk dyrking uten bruk av kjemiske plantemidler.

Hageavfall bidrar til høyere tørrstoffprosent i substratet. Likevel vil mengde og innhold av tørrstoff i mange av hagevekstene variere i løpet av året, og i vinterperioder produseres det ikke hagerester. Det kan derfor bli nødvendig å lagre og om mulig forbehandle hageavfall for å kunne bruke det jevnt gjennom hele året. Det kan også vurderes om det er mulig å ta imot planterester fra andre kilder som landbruksrester, plenklipp fra offentlig grøntarealer og private hager utenom prosjektet.

2.3 Biorest

Under den anaerobe nedbrytningsprosessen dannes det gasser som CH₄, CO₂, H₂S, og biorest. Avhengig av utgangsmateriale og prosessbetingelser kan mellom 40-80 prosent av det organiske materialet brytes ned i en biogassreaktor. Biorest er rikt på næringsstoffer, men det kan også som delvis nevnt over inneholde tungmetaller, organiske miljøgifter, plantevernmidler og patogene mikroorganismer.

Mesteparten av karbon fra substratet brukes for biogassproduksjon, og en mindre del går til mikrobiell biomasse. Innholdet av andre mineraler og næringsstoffene forblir nærmest uendret. De passerer gjennom reaktoren uten å bli forbrukt, men under nedbrytningsprosessen frigjøres næringsstoffer fra organisk bundet til mineralsk form og blir lettere tilgjengelig for plantevekst. Organisk bundet nitrogen blir til ammonium, og organisk bundet fosfor til ortofosfat eller lavmolekylære organiske fosforforbindelser. Sulfat, S og organisk svovel blir til H₂S.

Hvis biorest skal brukes som gjødsel er det viktig for hver type avfall å vurdere om substratet inneholder tilstrekkelig næringsstoffer. I tillegg bør det bli undersøkt om det inneholder noe som ikke er egnet til å bli tilført landbruksarealer som salt, vaskemidler, konserveringsmidler, plastpartikler, og

medisinrester. De innkommende råmaterialene er avgjørende for produktets kvalitet, og derfor må potensielt skadelige stoffer unngås (Mattilsynet, 2019).

Biogjødsel skal tilfredsstille myndighetenes krav for innhold av næringsstoffer, tung metaller og miljøgifter, samt oppfylle hygieniske krav. Krav til hygienisering kan gjøre det nødvendig med flere trinn eller betingelser under produksjonsprosessen som kan være energikrevende og medføre ekstra kostnader. Dette kan innebære pasteurisering eller surgjøring, forgjæring, kverning av hageavfall, termofil biogassprosess, kjemikalier til P-utvinning i form av struvitt, etterbehandling av biorest, lagring, eller blanding med komposterte materialer.

2.3.1 Aspekter ved bruk av biorest som gjødsel

I Norge er det Mattilsynet som holder kontroll på kvaliteten til gjødselvarer. Avhengig av bruk vil Gjødselvarerforskriften, Forskrift om animalske biprodukter som ikke er beregnet på konsum (Animaliebiproduktforskriften), Forskrift om plantehelse, Forurensningsloven eller Avfallsforskriften komme til anvendelse (Serikstad, 2015).

Gjødselvarerforskriften (Forskrift, 2008) deler gjødslingsmidler etter kvalitet i fire klasser. Bare klasse 0 har ikke begrensninger angående bruk for arealer for matproduksjon, med unntak av at tilførselen ikke må overstige plantenes behov.

I Gjødselvarerforskriften (vedlegg 1) defineres biorest som «råtnerest»: «*Råtnerest*: Restprodukt fra anaerob omsetning av organisk materiale» (Vedlegg 1. Definisjoner).

Hvis vi ser på bestanddelene i et substrat hver for seg kan vi peke på hvilke komponenter som kan være problematiske og vurdere nødvendig behandlingstiltak for at biorest skal kunne brukes til gjødsling ved matproduksjon.

2.3.1.1 Innholdet i svartvann

Mattilsynet definerer svartvann som avløpsslam (Aas, 2019). Gjødselvarerforskriften legger begrensninger i bruk for gjødselvarer som inneholder avløpsslam. Disse blant annet kan ikke brukes på arealer, hvor det dyrkes grønnsaker, poteter, bær eller frukt (Forskrift, 2008, §25). Mattilsynet kan gi dispensasjon fra regelverket når det kan dokumenteres at «innholdet av tungmetaller er særlig lavt og/eller behandlingsprosessen har gitt en vesentlig høyere kvalitet på produktet enn det råvaren skulle tilsi» (Forskrift, 2008, §31).

Svartvann kan representere en smitterisiko. Avføringsmasser og urin kan inneholder patogene mikroorganismer, parasitter, smittsomme sykdomsfremkallende bakterier og virus, og må derfor hygieniseres.

Hygienisering består av reduksjon/desimering av patogene mikroorganismer og inaktivering av parasitter.

Koliforme bakterier er ikke nødvendigvis patogene i seg selv, men deres tilstedeværelse indikerer fekal forurensning. Termostabile koliforme bakterier (TKB) indikerer fersk fekal forurensning og potensiell forekomst av typiske patogene bakterier som *Salmonella* sp og *Enterococcus* sp, og parasitter som rundorm og bendelorm.

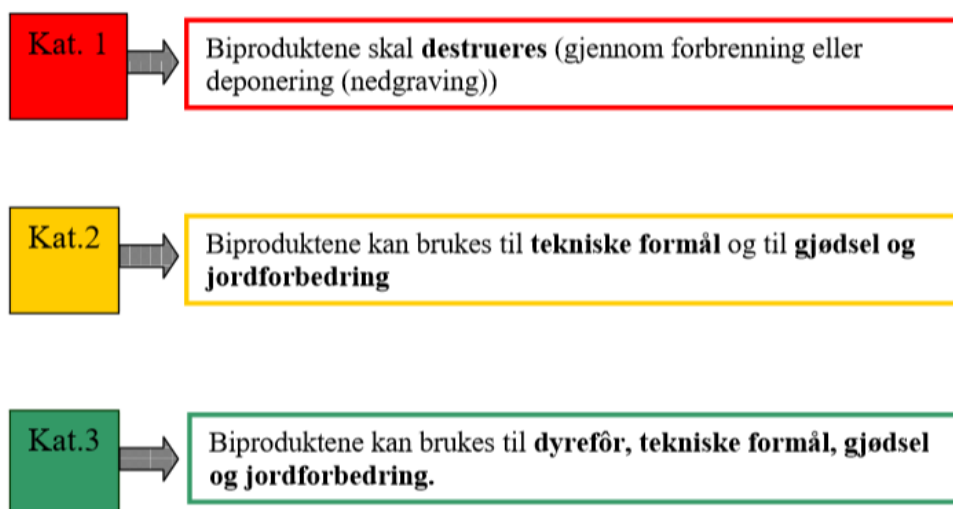
En mesofil anaerob prosess vil i seg selv gi en reduksjon av patogener grunnet oksygen mangel, fermentering, pH variasjoner og høy sulfidkonsentrasjon, men denne reduksjonen er ikke nok for å tilfredsstille krav til WTO eller nasjonale myndigheter (Wendland, januar 2009). En termofil anaerob prosess med en temperatur på 55°C og høyere er mer sikker, men vil ifølge (Wendland, januar 2009) heller ikke gi 100 prosent garanti for hygienisering. Wendland viser da til forbehandling i form av pasteurisering, surgjøring eller etterbehandling i form av pasteurisering, kalking (tilsetning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ eller CaO) eller etterlagring (Wendland, januar 2009).

Innehold av tungmetaller i svartvann er lavt i forhold til konvensjonelle avløp (Tervahauta, 2014). Likevel kan det som nevnt inneholde medisinrester, hormoner og andre stoffer som skilles ut fra menneskekropp og som kan videreføres til planteproduksjon. Mattilsynet har per i dag ikke målbare krav til innehold av disse stoffene.

2.3.1.2 innholdet av matavfall

For matrester er det den Animaliebiproduktforskriften som er aktuell. Forskriften deler alle animalske produkter inn i tre kategorier avhengig av behandlingskrav (figur 2).

Figur 2. Kategorier av animalske biprodukter (Mattilsynet 2007, veileder).



Ifølge (Mattilsynet, 2007), kommer kjøkken- og matavfall under kategori 3:

Kjøkken og matavfall inkluderer organisk avfall fra stor- og småhusholdninger: restauranter, cateringvirksomhet, kantiner og kjøkkener, inkl. private husholdninger som produserer ferdige matvarer til direkte konsum på stedet eller til levering ut av huset. Det omfatter ikke detaljhandlere som supermarkeder, heller ikke næringsmiddelbedrifter som produserer for detaljhandel (Mattilsynet, 2007).

Ved bruk som råstoff i biogassframstilling kreves det at animalske biprodukter i kategori 3 på forhånd er pasteurisert ved 70 °C i 60 minutter (Serikstad, 2015). Pasteurisering ved høy temperatur fremmer hydrolyseprosessen, noe som virker positivt på metanproduksjonens volum.

2.3.1.3. Innholdet av hageavfall

Med bruk av planterester i substratet kan det forbindes en risiko for å spre med gjødselen plantesykdommer, skadeinsekter eller spiredyktige ugressfrø. Det kan også forventes innhold av pesticider og plantevernmidler.

Serikstad (2015) konkludert med at risiko for spredning av ugrasfrø ved biorestgjødsel er liten. I en dansk studiet ble det undersøkt syv ugress arter. Ved termofil prosess døde alle frøene i løpet av to dager. Med mesofil prosess var alle frøene av floghavre, åkersennep og kanadagullris døde etter én uke. Da var fremdeles 7 prosent av meldestokk-frøene og 1 prosent av raps- og åkervindel-frøene spiredyktige. Etter 11 døgn var ingen frø lenger spiredyktige (Serikstad, 2015).

2.3.1.4 Krav til biorest som helhet

Animaliebiproduktforskriften FOR 2016-09-14 1064 «Forskrift om animalske biprodukter som ikke er beregnet på konsum» stiller krav til godkjenning av biogassanlegg. Operatøren må dokumentere at mikrobiologiske standarder opprettholdes. Prøver fra råtnerester skal ikke inneholde konsentrasjoner av patogene bakterier høyere enn tillatt.

Krav er som følgende:

Escherichia coli: $n = 5$, $c = 1$, $m = 1\ 000$, $M = 5\ 000$ i 1 g; eller Enterococcaceae: $n = 5$, $c = 1$, $m = 1\ 000$, $M = 5\ 000$ i 1 g; og Salmonella: ikke påvist i 25 g: $n = 5$, $c = 0$, $m = 0$, $M = 0$

n = antall prøver som skal undersøkes,

m = terskelverdien for bakterietallet; resultatet betraktes som tilfredsstillende dersom bakterietallet i samtlige prøver ikke overstiger m ,

M = største bakterietall; resultatet betraktes som ikke tilfredsstillende dersom bakterietallet i én eller flere prøver er lik eller høyere enn M , og

c = antall prøver der bakterietallet kan ligge mellom m og M , idet prøven alltid betraktes som akseptabel dersom bakterietallet i de andre prøvene er lik eller lavere enn m .

Råtnerest, som ikke oppfyller krav, skal bearbeides pånytt eller destrueres i samsvar til regler (Mattilsynet, 2013).

Gjødselsvareforskriften stiller følgende krav (tabell 2):

Tabell 2. Mattilsynets krav til innhold av tungmetaller i gjødselvarer (Gjødselvarerforskriften)

Følgende maksimumsgrenser for tillatt innhold av tungmetaller angitt i mg/kg tørrstoff (totalinnhold) gjelder:

Kvalitetsklasser:	0	I	II	III
	mg/kg tørrstoff			
Kadmium (Cd)	0,4	0,8	2	5
Bly (Pb)	40	60	80	200
Kvikksølv (Hg)	0,2	0,6	3	5
Nikkel (Ni)	20	30	50	80
Sink (Zn)	150	400	800	1500
Kobber (Cu)	50	150	650	1000
Krom (Cr)	50	60	100	150

Mattilsynet kan sette strengere krav til dyrkingsmedier framstilt av råvarer listet opp i vedlegg 4.

Når det gjelder organiske miljøgifter og plantevernmidler definerer ikke Mattilsynet krav til maksimum innhold ettersom det dreier seg om små mengder og er vanskelig å måle. Mattilsynet stiller dog krav til aktsomhet for å minimisere eller unngå slike stoffer i gjødselvarer.

Angående hygienisering skal ikke produkter representere smittefare for mennesker og dyr, eller inneholde salmonellabakterier eller infektive parasittegg. Innholdet av termotolerante koliforme bakterier (TKB) skal være mindre enn 2 500 per gram tørrstoff (TS).

Andre krav er at produktet må være stabilisert. Dessuten skal ikke produktet inneholde spiredyktige frø av floghavre.

Totalinnholdet av plast, glass eller metallbiter med partikkelstørrelse større enn 4 mm skal ikke utgjøre mer enn 0.5 vektprosent av totalt tørrstoff.

Kildesortert matavfall fra husholdninger og storhusholdninger, samt planterester fra landbruks produksjon er godkjent som råstoff for økologisk biogassproduksjon. Det vil si at råtnerester etter disse komponentene kan brukes for økologisk landbruk.

2.3.2 Etterbehandling av biorest for gjødsling

Konsistensen av biorest etter anaerob behandling varierer avhengig av reaktor- og prosessstype. For å praktisk kunne utnytte næringssalter fra bioresten må den i mange tilfeller bearbeides/etterbehandles.

Biorest i CSTR og UASB-reaktorer kommer i flytende og faste former. Flytende biorest kan brukes direkte for gjødsling på landbruksjord med vanlig spredningsutstyr. Avhengig av sesongen og

avstanden til landbruksarealet kan denne type utnyttelse medføre enkelte utfordringer. Biorest produseres kontinuerlig og trenger derfor lagringsplass mellom spredningstidspunktene, og transport kan bli kostbar ved lange avstander. For å redusere lagringsbehov kan vannfasen inndampes for å konsentrere opp næringssalter (Morken et al., 2017).

Spredningsmulighetene er begrenset hvis avløpslam inngår i substratet (Mattylysynet, 2019).

Den faste massen av biorest separeres fra vannfasen ved sentrifugering, filtrering eller annen oppkonsentreringsmetode. Den kan blandes med annet organisk materiale til kompost og brukes til jordforbedring.

Vannfasen etter oppkonsentreringer kan ikke slippes ut uten rensing grunnet blant annet høyt innhold av næringsstoffer, noe som kan føre til eutrofisering av naturlig resipient.

I det som gjelder næringsstoffer, konsentrerer fosfor seg mest i den faste fasen, mens mineralisert nitrogen beholdes i oppløst form. For at gjødselen skal ha god kvalitet er det viktig å opprettholde P/N balansen. Konsentrasjon av fosforet i de forskjellige fasene kan styres under avvanningsprosessen (Morken et al., 2017).

I en UASB-prosess behandles substrater med veldig lavt tørrstoffinnhold. Biorest fra disse reaktorer er lik vannfasen fra avvannet biorest etter CSTR-prosessen. Hvis den faste fasen ble fraseparert før reaktoren, gjennomgår den ikke metanprosessen og derfor kan ikke betraktes som biorest (Morken et al., 2017).

Hvis biogassprosess foregår i en fast fase, blir bioresten i fast form. Disse biorestene må stabiliseres før videre bruk som gjødsel (Morken et al., 2017).

2.4 Reaktortyper

Biogassreaktorer kan fordeles i grupper avhengig av størrelser, teknologi, og brukte råstoffer.

2.4.1 Størrelser

Biogassreaktorer finnes i store og små størrelser avhengig av behov. Små biogassreaktorer for enkelte husholdninger eller gårdsbruk er tatt i bruk i India, Kina og andre land i Sør-Øst Asia, hvor tilgang på sentralisert elektrisitet- og varmforsining er begrenset. I India og Kina var programmet for implementering av biogassanlegg støttet av myndighetene (Wendland, januar 2009). I Europa er det

mer vanlig med storskala industrielle biogassanlegg hvor det blir utnyttet kombinert bioavfall fra industri, landbruk og husholdninger. Små gårdsanlegg er også representert.

2.4.2 Tørre og våte prosesser

Substratene for biogassproduksjon etter konsistens kan fordeles på tørre og flytende. I flytende substrat må TS-innhold være på 10-15 prosent (Tasherzadeh & Richards, 2016). Tørre substrater inneholder 25-40 prosent TS. Tilsvarende skilles det mellom teknologier og reaktortyper for utnyttelse av disse to substrattypene.

Tørr biogassprosess kan foregå med perkolasjon av vann gjennom fast substrat i batch-reaktoren eller i plug-flow reaktoren, hvis prosessen er kontinuerlig. Plug-flow reaktoren kan tåle TS på 20-35 prosent (Morken et al., 2017).

2.4.3 Tilføringsfrekvens

Etter prosesstype kan man skille mellom batch eller kontinuerlig reaktortyper. I batch-reaktorer skjer tilføring av substrat i porsjoner. Neste porsjon tilføres etter at biogassprosessen fra forrige porsjon har blitt fullført og reaktoren tømmes ut. I kontinuerlige reaktorer oppnår man en stabil prosess. Mating av reaktorer skjer kontinuerlig med flere porsjoner daglig, og sluttprodukter dannes med stabil hastighet.

2.4.4 Antall trinn

Man kan separere trinnene i biogassprosessen fra hverandre i forskjellige tanker. Siden de forskjellige mikroorganismene fungerer som tidligere nevnt optimalt med forskjellige pH, temperatur og stoffkonsentrasjoner kan man øke utnyttelse av råstoffer ved å separere dem fra hverandre. Ofte deles prosessen i to trinn - det skilles mellom hydrolyse og acidogenese i et trinn og selve metanogesen på neste trinn (Tasherzadeh & Richards, 2016).

2.4.5 Voksested for mikroorganismene

I CSTR lever mikroorganismer på substratet. Ved oppstart av prosessen må inokulum tilsettes til substratet. Ved uttak av biorest mistes det en del mikroorganismer. Det er viktig at det beholdes igjen tilstrekkelig av massen til å vokse opp på nye substratporsjonen. Ved batch-prosessen må inokulum tilsettes hver gang. Man kan beholde 10 prosent av biorest som podemateriale og blande med nytt

råstoff. Mikroorganismer trenger tid til å vokse, og dette trenger oppholdstid i reaktoren i minst åtte dager (Morken et al., 2017).

I granulbaserte- og biofilmreaktorer lever mikroorganismene permanent i reaktoren. Mikroorganisme kan samle seg i granuler eller vokse på biofilm. Denne teknologien passer best for flytende fortynnet substrat som kan bevege seg gjennom reaktoren. Mikroorganismer blir ikke mistet med bioest. Denne teknologien tillater å redusere oppholdstiden til to til fem dager.

2.4.6 Vanlige reaktortyper

CSTR – Continuous Flow Stirred Tank Reactor. Dette er en kontinuerlig reaktor normalt med stabil biogassprosess. Den brukes for flytende pumpbare substrater. Mikroorganismer vokser opp på substanspartikler og forlater reaktoren sammen med bioest. Dette følger til lengre hydraulisk oppholdstid (HRT) for prosessen.

Batch-reaktor kan brukes både for pumpbare og faste substrat (TS 20-30 prosent) (Morken et al., 2017). Denne lastes opp med en porsjon av substrat og tømmes igjen etter at biogassprosessen er gjennomført. Mikroorganismer vokser på substratet. Batch prosess kan forlenges til maksimal utnyttelse av metanpotensialet og er ofte bruk for forskningsforsøk.

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket reaktor. I reaktoren foregår det kontinuerlig biogassproduksjon. Beregnes for flytende substrat med lav TS%, hvor næringsstoffer er i oppløst tilstand. Mikroorganismer vokser opp på et teppe (biofilm) og forblir i reaktoren. Reaksjon i slike reaktorer foregår fortere og HRT er kortere.

PRF - Plug Flow -reaktor. Dette er en horisontal plassert reaktor hvor massen beveger seg gjennom reaktoren (Morken et al., 2017). Den kan brukes for forskjellig konsentrasjon av tørrstoff. Mikroorganismer vokser som biofilm på et medium inne i reaktoren. ANTEC-reaktoren er av denne typen.

3. Materialer og metoder

3.1 Biogassreaktor og substrat

3.1.1 Beskrivelse av prosjektanlegg

ANTEC- biogassreaktoren ble valgt for testing for å undersøke om denne kan bli brukt i Fredrikstad prosjektet.

ANTEC BIOGAS AS er en av de ledende bedriftene på ny biogasssteknologi i Norge. De utviklet en reaktor som mer effektivt utnytter organisk materiale. Dette er en kompakt biofilm- gjennomstrømnings reaktor («plug flow»), hvor mikroflora oppholder seg fast i tanken.

Reaktortanken er bygget som en liggende sylinder. Gjennom senter av reaktoren går en aksling som dreier kamrene inne i reaktoren rundt. Kamrene er bygget for at substratet skal strømme gjennom kammeret, samt for å få god kontakt med de anaerobe bakteriene som har festet seg til veggene i kammeret.

Forsøksreaktoren har fem kamre som til sammen har en overflate på 350 m², og som er dekket av bakterier. Én gang hver time tilføres reaktoren og det første kammer nytt substrat. Når nytt substrat pumpes inn, forskyver organisk masse i reaktoren seg fra kammer til kammer. Etter siste kammer pumpes biorest (effluent) ut til sluttlager.

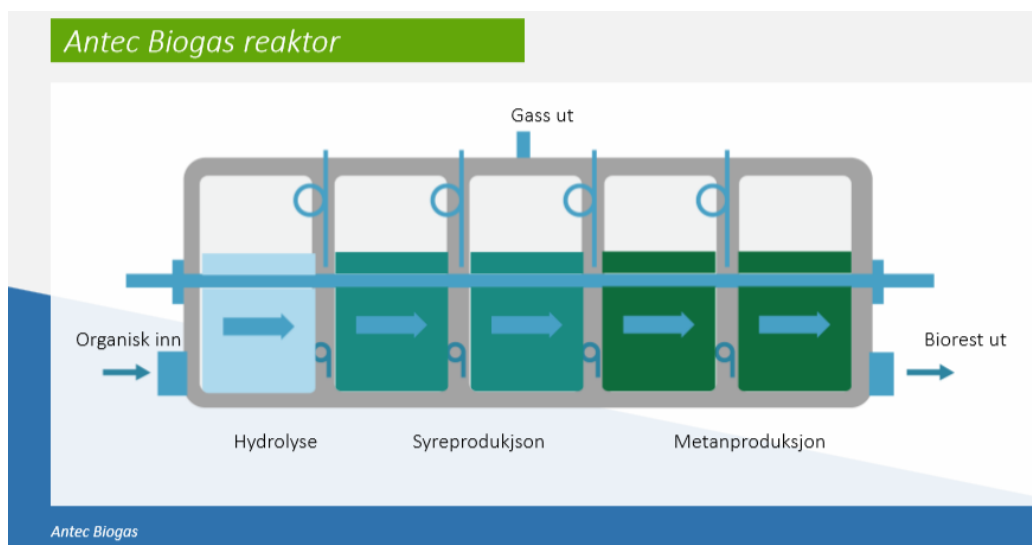
Mikrofloraen blir stabil og stasjonær når innmating av nytt substrat tilføres jevnlig. Bakteriekultur vokser på alle overflater i kamrene, og dette gir et stort berøringsareal for biologisk behandling.

Reaktoren kan utnytte forskjellige typer organisk materielle som husdyrgjødsel, matavfall, industriavfall, og avløpsslam.

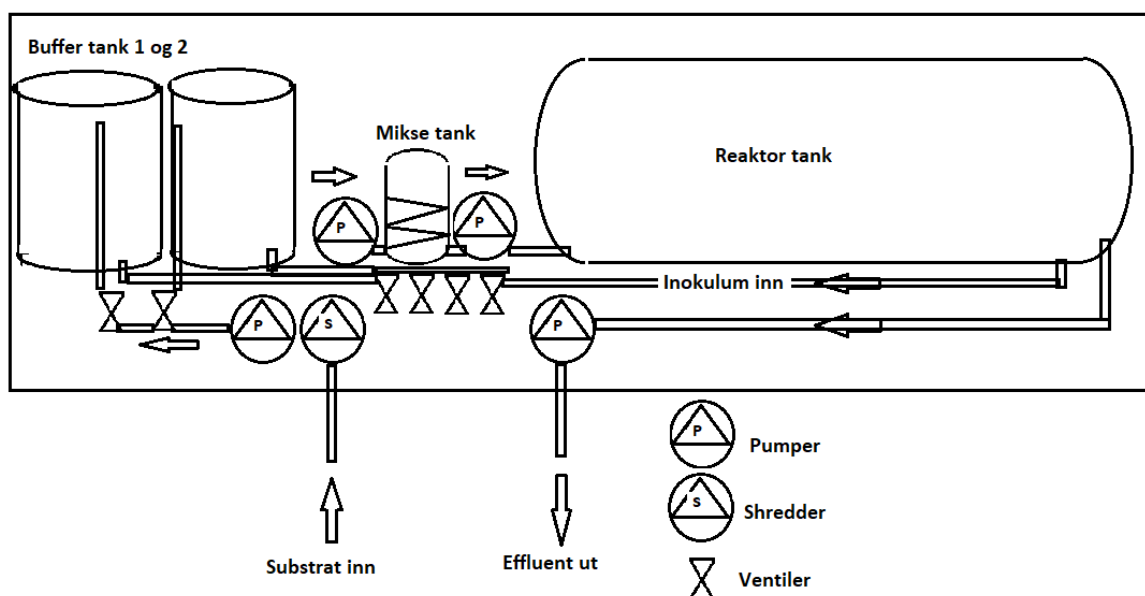
Fordelene ved ANTEC-reaktoren i forhold til andre reaktorer ifølge bedriften selv, er lave kostander, kort oppholdstid, og høy utnyttelse av biomasse. Dette er med på å gjøre reaktoren lønnsom (Antec Biogas AS, 2015-2018).

Reaktor kan tilpasses i størrelse til volumet av innkommende råvarer.

Figur 3. Prinsippskisse til ANTEC – biogassreaktor. Tatt fra <http://gasskonferansen.com/images/foredrag/EgilAndersen.pdf>
 Innovative Biowaste Technology, Presentasjon for Gasskonferansen 2016



Figur 4. Skjema av testanlegg (Andersen, 2019)



Forsøksanlegget består av reaktortank, miksetank, to buffertanker, kvern, pumper, ventiler og et rørsystem som binder alt i sammen. Tankene er også utstyrt med volum og temperatur sensorer. En PLS som er montert i styreskapet, styrer alle funksjonene i forsøksanlegget (figur 4).

Forsøksreaktoren har volum 3 m^3 og er plassert i en 40 fots konteiner. Substratet ble blandet manuelt ute i 1000 l beholdere etter beregnede konsentrasjoner (bilde 1). Når substrat pumpes inn, kutter en kvern alt organisk opp i mindre biter, før det pumpes inn i buffertankene. Dette for å kutte opp matrester og lange strå. Buffertankene har et volum på 3 m^3 , og dekker én ukes produksjon med ti dagers oppholdstid.

Fra buffertankene pumpes substratet videre til miksertanken. I miksetanken blandes substratet med inokulum fra reaktoren og varmes opp til $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Blandingen blir sirkulert hvert 20 minutt gjennom en pumpe med kuttekniver, for å knuse alt organisk (Andersen, 2019). Biogassanlegget ble satt på manuell drift når buffertankene ble fylt. På større industrielle anlegg gjøres dette automatisert. Hydrolyseprosessen starter i miksertanken. Inokulum som blir tilført fra reaktortanken starter prosessen. Dette kan ses på som en forbehandling av substratet, som vil redusere oppholdstiden i reaktortanken. Gjennomsnittlig oppholdstid for substratet i miksertanken er på ca. seks timer (ved middelvolum på 75 liter og inn- og utpumpingsrate på 12,5 liter i time).

Miksertank var en 200 liters tank som ble ombygd med en kappe for vannbåren varme. Den fylles med $70 \text{ }^\circ\text{C}$ varmt vann som sirkuleres mellom en varmtvannstank og kappen. Når substratet er varmet opp til $55 \text{ }^\circ\text{C}$, stopper sirkulasjonen av varmtvann. Varmekappen reduserte miksetankens volum til 100 liter. Maksimal fyllingsgrad i tanken er 80 prosent. Først tilføres inokulum fra reaktoren, 10-15 liter, ca. 12 prosent. Deretter tilføres det nytt substrat fra én av buffertankene, 40 – 45 liter, ca. 45 prosent.

Miksetanken tømmes aldri 100 prosent. Det gjenstår alltid 10 – 15 liter, ca. 15 prosent, for å unngå at det skal komme luft inn i reaktoren. Substratet blandes godt med inokulumet, med en sirkulasjonspumpe som kutter og mikser (Andersen, 2019). Det er ikke tilrettelagt til å ta prøver fra hverken buffertankene eller miksertank, noe som er en ulempe. Under testing viste det seg at det kunne være fordelaktig å fange opp hvor de ulike prosessene starter, og hva skjer med substratet når det blandes, lagres og utsettes for oppvarming.

Bilde 1. Konteiner og lagringstankene på anleggsområdet. Biorest pumpes ut og substrat inn via rørledningen.



Bilde 2. Buffertankene, miksertank, pumper, ventiler, rør og annet utstyr inne i konteineren



Innpumping til reaktoren skjer hvert 60 minutt. Innpumpingstid er satt til 65 sekunder (styrt av pumpens kapasitet). Ved beregnet HRT på 10 dager, pumpes det 300 liter substrat inn i reaktoren daglig, det vil si 12,5 liter pr time. Totalt pumpes det inn ca. 18 liter substrat og inokulum.

Oppholdstiden i kamre er avhengig av innmatings hastighet. Volumet som pumpes inn, avgjør hvor lang tid substratet oppholder seg i kamrene og i reaktoren. Det er fem kamre i reaktoren, ved HRT på 10 dager vil oppholdstiden i hvert kammer bli på to dager. Mellom kamrene er det en 15 cm åpning. Når substratet kommer ut av det første kammeret, blandes substratet sammen før det pumpes inn i neste kammer. På denne måten flytter substratet fra kammer til kammer. Reaktortanken er isolert. Under isolasjonen er det et system med vannrør som går rundt tanken. Varmt vann sirkulerer mellom en varmtvannstank og reaktoren for å holde stabil temperatur. Når substratet har passert alle kamrene, pumpes det ut av reaktoren til en lagertank. Lagertankene for bioest er plassert utenfor konteineren. Reaktoren er av sylindrisk form, har en diameter på 1200 mm og en lengde på 3000 mm, med arbeidsvolum på 3 m³. På toppen av sylindere er 20-25 cm er forbeholdt til gass innsamling. Kamrene i tanken har en diameter på 1000 mm, og er 500 mm lange. Mellom kamrene er det en åpning på 150 – 200 mm. I denne åpningen blandes substratet sammen igjen, før det pumpes inn i neste kammer.

Reaktoren har vinduer i hvert kammer for kunne følge med på fyllingsnivå og observere prosessen (bilde 3).

Bilde 3. Sylindriske vindu i reaktorvegg for observasjon og temperaturmåler, som viser temperatur i konteineren utenfor reaktoren



Det er en mulighet til å tappe substratet ut fra hvert av de fem kamrene via kraner for uttak av substrat. Fra siste kammer i enden av reaktoren tappes det biorest. Kranene blir brukt for prøvetaking (bilde 4).

Bilde 4. Reaktorvegg med kraner for uttak av substrat



Den produserte gassen samler seg i øvre delen av tanken. Over hvert kammer er det montert et rør for uttak av gass. Et nytt rør samler opp gassen som går ut til en sikkerhetsventil. Denne er fylt med vann for å kjøle gassen, samt for å ta ut kondens av gassen. Gassen blir ført videre til gassmåleren, før den går til fakkell for forbrenning. Gassmåleren er installert på ytre vegg av konteineren. Dette er en standard gassmåler som brukes til gassmålinger i husstander i Europa. Måleren er bygget opp med en enkel propell som roterer når det strømmer gass gjennom. Gassmålinger gjøres manuelt ved daglig avlesning. Det er ikke automatisk registrering av gassproduksjon ved forsøksreaktoren.

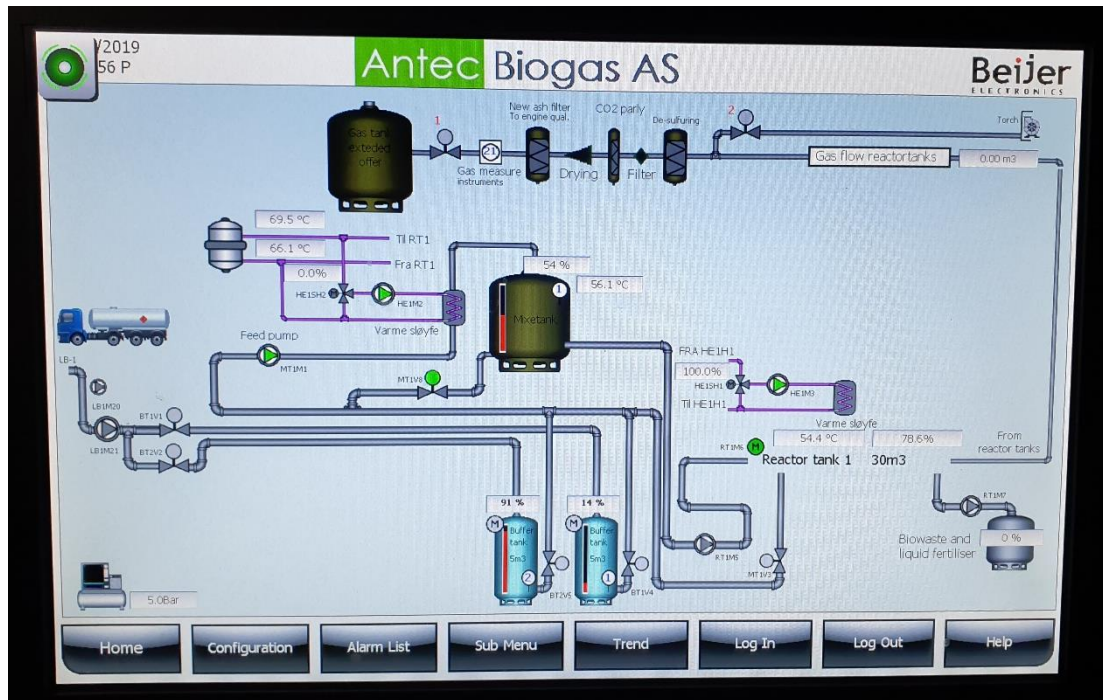
Sensorer som er montert i tankene styrer alle funksjoner. Det er volumsensorer i alle tanker, temperatursensorer i miksetank og reaktortank. Volumsensorene bestemmer maks og minimum volum i tanken, det vil si stopp og start av pumper. Temperatursensorer styrer temperaturen i miksetanken og reaktortanken.

Innpumping til reaktortanken styres av tid. I styringspanelet (sett meny) settes tid mellom hver innpumping (60 min), samt tiden pumpen skal gå (65 sek). Når maks volum er oppnådd i reaktortanken starter utpumping til minimum nivå, som ligger i styringsprogrammet. Maks nivå er satt til 80 prosent og minimum nivå er satt til 70 prosent. Når pumpen starter oppstår det trykkendringer i tanken. Et trykkfall som et kort sekund viser 70 prosent er nok til og å stanse utpumping. Det vil si at utpumping ofte stopper ved ca. 75 prosent (Andersen, 2019).

Styringssystemet har varsling i panelet, og kan sende varsel til mobil når feil oppstår, eller lagertanker er fulle eller tomme. Volum- og temperatursensorene sender et alarmsignal når grenseverdier blir overskredet. Når buffertankene blir tomme stanser anlegget. Kun vedlikeholdsvarme og omrøring i reaktoren opprettholdes. Prosessen i reaktortanken er viktig å holde stabil.

Reaktorens kontrollsystem kan være fjernstyrt og man kan overvåke prosessen via PC eller mobil. Et program må lastes ned, og reaktorens IP ligger på en minnepinne som settes i PC'n. Dette ble ikke brukt på testanlegget i prøveperioden på grunn av problemer med ruter og signaler. Det var ikke internett tilgang på forsøksområdet. Programmet som brukes er utviklet av Beijer (bilde 5) (Andersen, 2019).

Bilde 5. Styringspanelet med merørings funksjoner



Prosessene kan styres manuelt ved å trykke på bilder av pumper eller ventiler på styringspanelet for å starte og stoppe funksjoner. Verdiene kan endres via en meny. Er det oppstått problemer, kan alarmer

åpnes og feilmeldinger avleses (Andersen, 2019). Normalt står anlegget i automat og programmet styrer alle funksjoner. Data om gassproduksjon og biorest volum ble ikke registreres i forsøket.

3.1.2 Substrat

Opprinnelig substrat skulle inneholde svartvann, kvernet og fortynnet matavfall, samt hagerester. Grunnet mangel av svartvann ble dette erstattet av fortynnet svinegyfle. For å tilnærme blandingen mest mulig til sammensetning av svartvann var også do-papir tilsatt i mengde 3.75 kg/m³ substrat. Hagerester ble ikke inkludert i det praktiske eksperimentet. Komponentene ble blandet sammen og plassert i 1000 l plastbeholdere utenfor reaktorkontaineren. Det ble pumpet inn 300 l substratet daglig.

Reaktor startet med massene fra en tidligere test. Hydraulisk oppholdstid i reaktoren ble beregnet med ti dager. Opprinnelig substrat manglet do-papir. Dette ble tilsatt 04.04.19.

Sammensetning og konsentrasjon av komponentene ble valgt til å være mest mulig lik den som kunne forventes i planlagt boligkomplekset. Det ble tatt prøver av hver komponent separat og av miksblanding.

3.2 Målinger

De aktuelle problemstillingene for dette arbeidet er som følger:

1. Finne biogassutbytte, nedbrytingsgrad, virkningsgrad i ANTEC-reaktoren for substratet bestående av fortynnet svinegyfle (erstattet svartvann) do-papir og matavfall med forholdsvis liten TS% (estimert TS på 1-3%).
2. Teste hygienisering – patogen reduksjon gjennom ANTEC - reaktor med termofil prosess.
3. Vurdere masse- og energibalanse for reaktoren og substratet.
4. Vurdere biorestkvalitet med innhold av nitrogen og fosfor, tungmetaller og mikroelementer.

Vurdering av disse spørsmål ble basert på data fra eksperimentelle forsøket i periode 28 mars - 10 mai. Prøver fra reaktoren, samt biorest, rå substrat komponenter og substratblanding ble testet for TS%, VS% av TS, pH, N, P, COD, FOS/TAC, FVA. Det ble tatt prøver av biogass og registret biogassproduksjon i testperioden. Biogassprøver ble testet for CH₄ og CO₂ sammensetning, samt noen prøver for H₂S innhold.

3.2.1 Prøvetaking

Følgende prøver ble tatt og analysert:

1. Fra rå substrat ute i beholdere, både de forskjellige komponentene og blandingen.
2. Fem kammer i reaktoren, inkludert bioest i det siste kammeret.
3. Bioest i lagertankene ute.
4. Uttaksledning fra reaktoren.
5. Biogassprøver.

Det er som tidligere nevnt ikke tilrettelagt til å ta prøver direkte fra miksertank eller buffertankene. Dette ville ha vært fordelaktig for å undersøke substratet på vei inn i reaktorkammer. Istedenfor ble det tatt prøver fra beholdere med rå substratet ute i dagen.

Grunnet tekniske problemer med tilkobling av reaktoren og mangel på substrats komponenter ble ikke det eksperimentale arbeidet startet før midten av mars.

Prøvene ble tatt i en periode på syv uker med første dato den 28. mars, med frekvens to ganger i uka. Prøvene ble tappet i 300 ml flasker og transportert til laboratoriet for analyser (bilde 6).

Bilde 6. Flasker med prøver fra de fem kamrene i reaktoren



En del praktiske utfordringer fulgte med arbeidet i oppstartsfasen. I fravær av tilgjengelig svartvann ble det som nevnt bestemt å erstatte det med fortynnet grisegylle. Grisegjødsel innehold en del sagflis, som ble brukt som underlag for dyrene og naturlig kom med inn i substratblanding. Det er ukjent i hvilken grad TS- målingene og de andre data har blitt påvirket av sagflis innhold.

Det viste seg at suspenderte partikler i prøvene ble raskt tappet ut av reaktoren. Dette gjorde at det var praktisk vanskelig å sørge for jevn konsentrasjon av partiklene under overføring fra beholderen til prøveflaskene.

Det visste seg at bunnfelte partikler samlet seg i rørene som ble tilknyttet kraner for prøvetaking. Disse ville påvirke prøvene. For å kunne redusere feil var det ved prøvetaking bestemt å tappe noen volum av væske (ca. 10 liter) fra hver kran før prøveinnsamling. Det er uvisst om dette tiltaket var tilstrekkelig.

På grunn av høy temperatur i reaktoren (termofil prosess) vandamp fulgte med i gassblandingen, oppstå det kondensat i gassmåleren. Gassmåleren ble satt ut av bruk og målingene ble da ikke kontinuerlige. Etter installasjon av dampfang startet målingene opp på nytt. Det ble ikke tilrettelagt til prøvetaking, og det ble ikke tatt gassprøver med de første prøvetakene.

Gassprøvene fra uttaksrøret ble samlet i gassposer av type RESTEK (bilde 10) og behandlet videre på laboratoriet.

3.2.2 Tester på laboratoriet

Flaskene med prøvene av substratet ble tatt med til NIBIO laboratoriet på Vollebakk for analyse. Målingene ble gjennomført på prøvene fra alle kammer i reaktoren, så det var som regel fem flasker med biomassen på hver analyse. I tillegg var analysert prøver fra rå substrat-miks og komponentene - grisegylle og matavfall, biorest fra tanken og fra utløpsrør fra reaktoren.

Det ble gjort følgende analyser av prøvene: tørrstoff innhold - TS%, Organisk stoffinnhold - VS% av TS, pH -målinger, Kjemisk Oksygen Forbruk – COD, innhold av Flytende Fettsyrer – VFA, FOS/TAC-forholdet og vurdering av restpotensiale til substratet og komponentene.

Enkelte prøver ble også sendt til EUROFINs – laboratoriet i Moss for bestemmelse av næringsstoff og mikroelementer i biorest, samt innhold av patogene bakterier.

Det ble foretatt bestemmelse av TS% og VS%, og pH målinger (bilde 7). De andre mer avanserte kjemiske testene fikk jeg hjelp fra erfarne medarbeidere på laboratoriet, som jeg takker dem mye for.

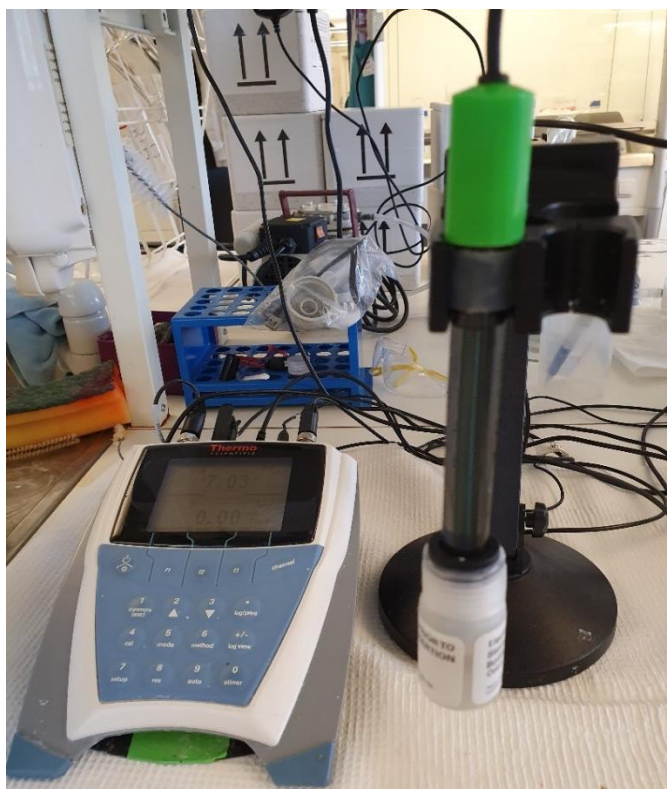
Bilde 7. Forberedelse av prøver for VFA-analyse. NIBIO laboratoriet på Vollebakk.



pH-målinger

Det ble foretatt målinger med pH-måler på ferske substratprøver. Apparatet Thermo Scientific Orion har et avvik på ± 0.01 pH (bilde 8).

Bildet 8. pH- måleren med elektroden. NIBIO-laboratoriet på Vollebakk



TS% og VS% bestemmelse

Innholdet av prøvene ble fordelt på tre skåler og plassert i tørkeskapet for 105 °C for 24 timer (bilde 9). Deretter ble tørkede prøver satt inn i ovn med temperatur på 550 °C i minst to timer for forbrenning av organisk materiale. For veiing av prøvene ble det brukt vekt Sartorius BP 221S med feil på ± 0.1 mg. For beregningene ble det brukt gjennomsnittlig verdi av de tre prøvene.

TS% – tørrstoff - prosentandel av slammet etter tørking av prøven ved 105 °C i 20 timer;

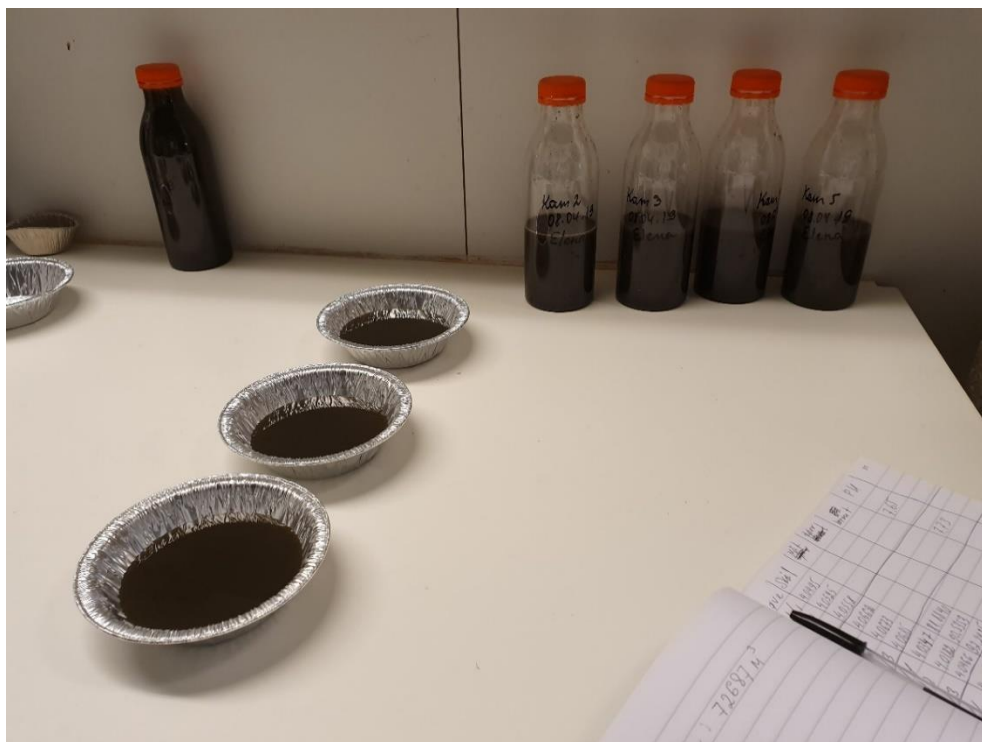
$$\text{TS\%} = \frac{\text{tørr vekt ved } 105 \text{ oC}}{\text{vekt av våt prøve}} \times 100\% \quad (1)$$

VS % - andel av slammet, som er til etter forbrenning av prøven ved 550 °C i to timer

$$\text{VS\% av TS} = \frac{\text{tørr vekt ved } 105 \text{ oC} - \text{tørr vekt ved } 550 \text{ oC}}{\text{Tørr vekt ved } 105 \text{ oC}} \times 100\% \quad (2)$$

VS% er viktig indikator for biogasspotensial, sammen med COD.

Bilde 9. Skål med prøver for bestemmelse av tørrstoff og organisk stoff innhold. NIBIO laboratoriet på Vollebakk



COD - analyser

COD – kjemisk oksygenforbruk, indikerer kjemisk nedbrytbare organiske stoff i prøven. Under anaerob prosess bør oksygeninnholdet synke etter at oksygen blir brukt i biologiske og kjemiske prosesser. Ved å måle oksygenmengde kan det observeres endring i det totale nedbrytbare organiske stoffet. COD analyser ble gjort av personalet på laboratoriet.

VFA – analyse

VFA - Volatile fatty acids eller flyktige fettsyrer. VFA omfatter en gruppe på seks forbindelser - eddiksyre (acetat), propionsyre, smørsyre, valeriansyre, kapronsyre, og enanthinsyre, hvorav acetat er dominerende. Fettsyrer (eddiksyre) forbrukes i biogassproduksjon, og deres konsentrasjon bør synke under nedbrytingsprosessen. VFA akkumuleres ved prosess ubalanse og virker da som en inhiberende faktor. Høy VFA kan være et tegn på at den organiske belastningen er for høy. Konsentrasjonsgrensen for VFA-inhibering avhenger av bufferkapasiteten (pH) (Boe, 2006). For å få en stabil biogassprosess må ikke total VFA i reaktoren overstige 500 mg/l eddiksyre. Ved VFA-konsentrasjoner over 1500 - 2000 mg/l kan biogassproduksjon hindres av inhibering (Labatut & Gooch).

Boe (2006) nevner at individuelle studier for enkelte av fettsyrer kan gi informasjon om prosessen. Spesielt propionsyre er regnet som en god indikator for prosessubalanse. Under prosessoverbelastning eller stressforhold kan økninger i hydrogenpartialtrykk termodynamisk påvirke nedbrytningen av propionat til andre VFA.

Det er viktig med overvåking VFA- nivå periodisk (for eksempel to ganger i uken) for å oppdage problemer, og foreta de nødvendige operasjonelle endringer før problem oppstår (Labatut & Gooch).

VFA- analyse ble utført av personalet på NIBIO.

FOS/TAC - forholdet

FOS / TAC-forholdet er en indikator for vurdering av fermenteringsprosesser. TAC-verdien er en estimering av bufferkapasiteten til prøven, og FOS-verdien tilsvarer innholdet av flyktige fettsyrer. Den beregnes empirisk i henhold til Nordmann-metoden. En prøve titreres med en svovelsyreløsning for å finne mengden som nøytraliserer bufferkapasitet i prøven.

TAC: H_2SO_4 -forbruk fra startverdi til pH 5.0 brukes til å beregne bufferkapasitet av karbonatsystem.

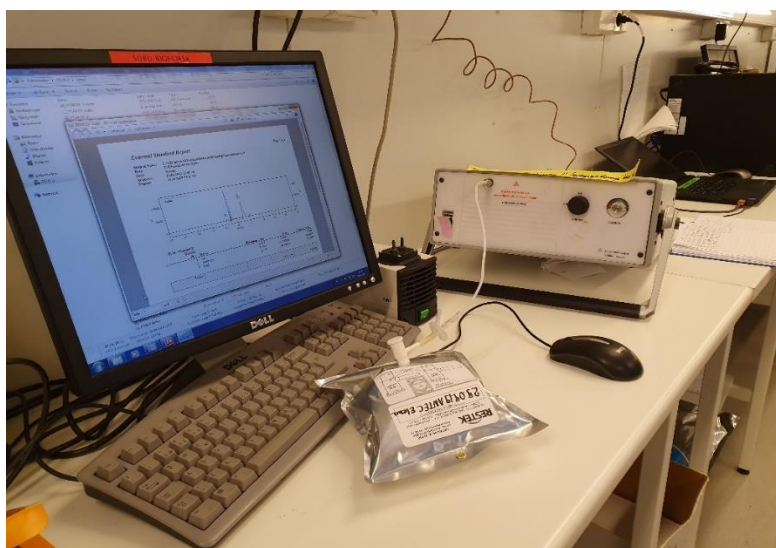
Måles i mg/l kalsiumkarbonat.

FOS: H_2SO_4 -forbruk fra pH 5.0 til pH 4.4. Utrykk for summen av organiske syrer, mg/l eddiksyre.

pKa-verdiene til organiske syrer er mellom 5.0 og 4.4. H_2SO_4 -syre dissosiasjonskonstanten er 3.9. Derfor vil organiske syrer bli konsumert av H_2SO_4 under titrering og H_2SO_4 -volumet kan uttrykkes som summen av VFA (UOSA). Metoden gir ikke konklusjoner om den enkelte mengden av hver syre i prøven. Den eneste syren som kan omdannes direkte til CH_4 ved anaerob nedbryting, er eddiksyre. Hvis konsentrasjonen av andre syrer er høy på grunn av en inhibering, må andre prosessparametere kontrolleres (UOSA). FOS/TAC – analyse ble gjort av personalet på laboratoriet.

Biogass fra prøvene ble undersøkt for innhold av metan og karbondioksid. De andre gassene ble ikke estimert. Analysene ble gjort ved hjelp av gassanalysator av type Agilent Technologies 3000A (bilde 10).

Bildet 10. Gasskromatograf men gassprøve. NIBIO laboratoriet på Vollebakk



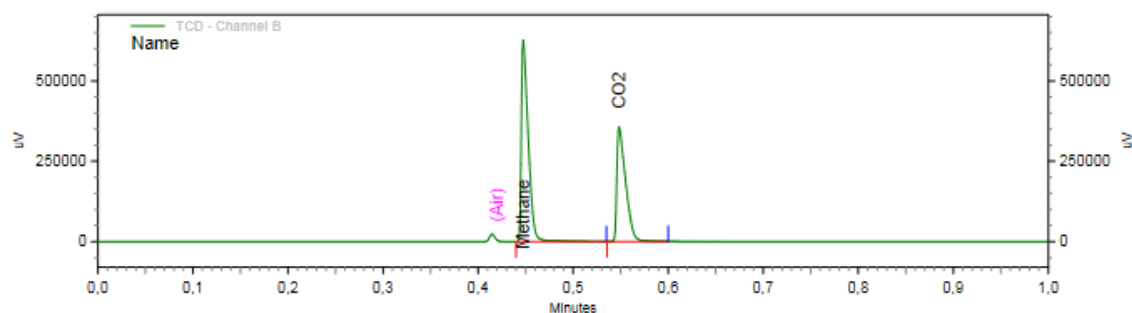
Som resultatet ble levet prosentforholdet mellom CH_4 og CO_2 . Det ble registrerte både normaliserte og ikke normaliserte verdier. Eksempel på gassanalyse er gitt i figur 5.

Figur 5. Eksempel på gassanalyse rapport (ikke normaliserte verdier)

External Standard Report

Page 1 of 1

Method Name: C:\EZChrom SI\Projects\Default\Method\gmlmetode8ms.met
 Data: C:\Elena\15.04.19 -3.dat
 User: System
 Acquired: 15.04.2019 16:48:26
 Printed: 15.04.2019 16:50:28

**TCD - Channel B
Results**

<i>Pk #</i>	<i>Name</i>	<i>Retention Time</i>	<i>Area</i>	<i>Concentration</i>
	Air			0,000 BDL
1	Methane	0,448	31964000	68,090
2	CO2	0,548	22796539	35,229

Totals			54760539	103,319
--------	--	--	----------	---------

På enkelte prøver ble det utført også kontroll av H₂S – innholdet. Hydrogensulfid ble målt med gass analysator GA 2000 (Geotechnical Instruments). Disse målingene ble gjort av spesialister på laboratoriet.

3.3 Beregningsmetode

For å bestemme prosesskarakteristikkene og vurdere effektiviteten av reaktoren ble det foretatt følgende beregninger. Formler er fra (Morken, 12.10.2017).

HRT - Hydraulisk Oppholdstid – tiden substratet oppholder seg inne i teaktoren

$$HRT = \frac{V_r}{m_o} [d] \quad (3)$$

Hvor:

V_r – arbeidsvolum til reaktor, m³;

m_o – input masse t/d.

OLR - Organisk Belastning – mengde organiske materiale, som bearbeides i reaktoren daglig

$$OLR = \frac{C_o * m_o}{V_r} = \frac{C_o}{HRT} \text{ [kg VS/m}^3 \text{ arbeidsvolum og dag]} \quad (4)$$

Hvor:

C_o – konsentrasjon av organisk materiale, kg VS/m³.

$$C_o = 1000 * \frac{TS\%}{100} * \frac{VS\%}{100} \text{ [kg]} \quad (5)$$

Hvor:

TS% - tørrstoff innhold og VS% - flyktig organisk stoff innhold (se 3.2.2.1)

Y – Biogassutbytte – mengde produsert biogass fra kg av organisk stoff

$$Y = \frac{Q_b}{C_o * m_o} \text{ [m}^3 \text{/kg]} \quad (6)$$

Hvor:

Q_b – volum av produserte biogass, m³;

η – reaktorens virkningsgrad – er et mål på effektiviteten;

$$\eta = \frac{Q_b}{V_r} \text{ [l]} \quad (7)$$

SP – Metanutbytte – mengde metan produsert per enhet av organisk stoff. (Benytter formel fra (Enevoldsen, 2018)).

$$SP = \frac{\Sigma \text{ Metan gass ut [m}^3]}{\Sigma \text{ Mengde VS inn [kg]}} \text{ [m}^3 \text{/kg]} \quad (8)$$

D - Nedbrytingsgrad – betegner hvor stor andel av tilgjengelig organisk materiale i substrat har gått for biogassproduksjon. Nedbrytingsgrad ble beregnet ved hjelp av formel gitt av (Linjordet, 2019), hvor forholdet mellom askerester i substrat og biorest er brukt.

$$D = \frac{Ab - As}{Ab * (1 - As)} * 100\% \text{ [%]} \quad (9)$$

Hvor:

Ab – askeinnhold i biorest, %;

As – askeinnhold i substrat, %;

$A = 100\% - VS\%$.

COD – forbruk. Viser mengde av oksygen, som ble brukt med kjemiske reaksjoner under biogassprosess. Bruker formel fra (Wendland, januar 2009).

$$\mathbf{COD\ forbruk = \frac{COD\ input - COD\ output}{COD\ input} 100\% \text{ [%]}} \quad (10)$$

Hvor:

COD input – COD I substratblandingen, mg/l;

COD output – COD I biorest, mg/l.

4. Resultater og analyser

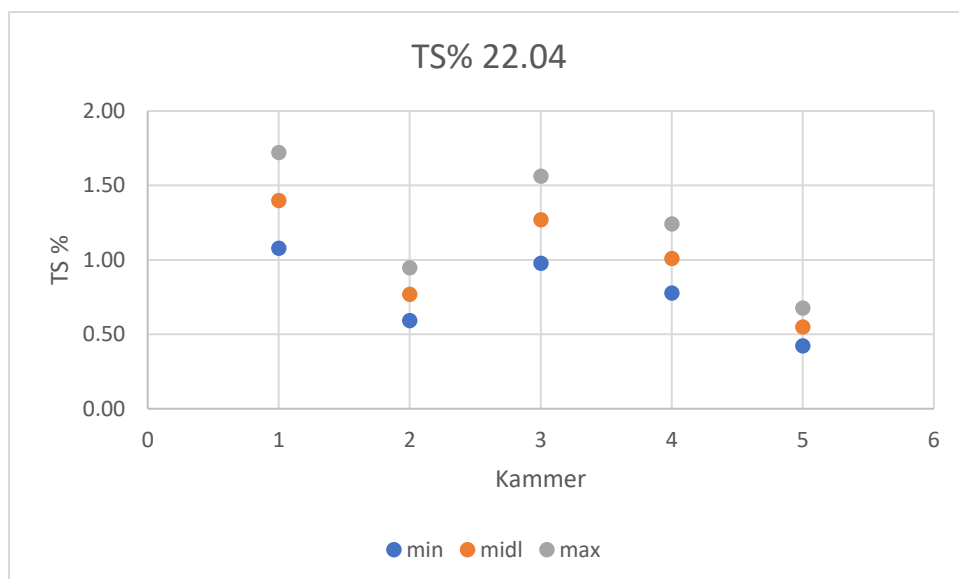
4.1 Metodetesting

Opprinnelig var det tenkt å analysere biogassprosessen ved substratbevegelse gjennom reaktoren. Prøvene som ble tatt fra de fem uttaksplassene viser endringer av TS%, VS%, COD, FOS/TAC mellom de forskjellige kamre. Etter noen uker med prøvetaking og primær analyse av TS% og VS% ble det klart at prøvene ikke viser en entydig klar trend i endringene (se tabeller 3 - 8, figurer 6 - 11). Prøvetaking med tre paralleller har gitt relativ standard avvik på TS% som varierer fra 3.5 prosent (kammer 5) til 55.9 prosent (kammer1) Gjennomsnitt relativ standardavvik for metoden er på 23.3 prosent (se vedlegg 1 Målingsdata, 25.04.19). Testene for VS% har gitt lavere avvik, som varierer fra 2.1 prosent (kammer 3) til 10.1 prosent (kammer 4) og i gjennomsnitt er på 4.8 prosent (se vedlegg 1 Målingsdata, 25.04.19). Prøver på COD har heller ikke vist en klar tendens med endring av kjemisk oksygen forbruk (tabell 9, figur 12).

Tabell 3. TS% i reaktoren den 22.04.19.

TS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
22.04.19					
min	1.08	0.59	0.98	0.78	0.42
middd	1.40	0.77	1.27	1.01	0.55
maks	1.72	0.95	1.56	1.24	0.68

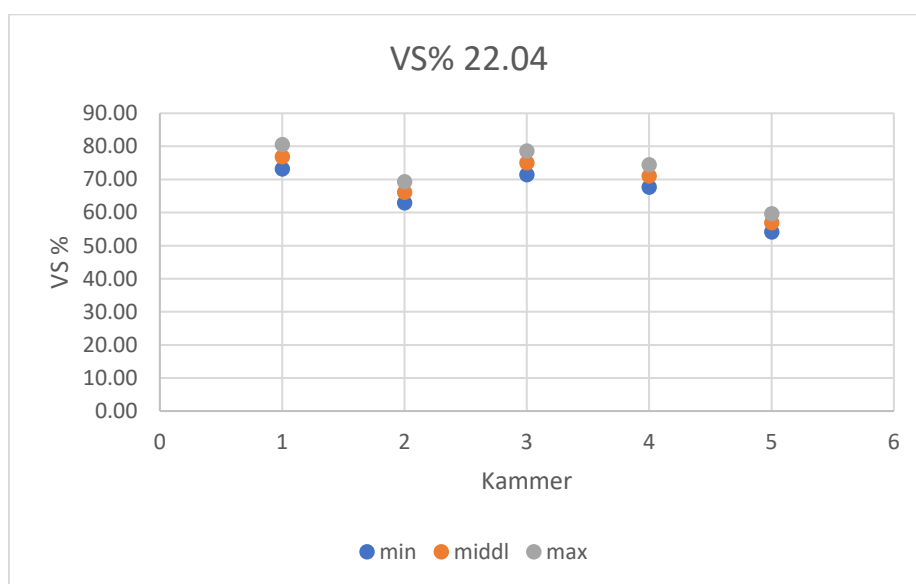
Figur 6. TS% i reaktoren den 22.04.19.



Tabell 4. VS% av TS i reaktoren den 22.04.19.

VS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
22.04.19					
min	73.13	62.93	71.43	67.61	54.16
middl	76.82	66.10	75.03	71.02	56.89
maks	80.51	69.27	78.63	74.43	59.62

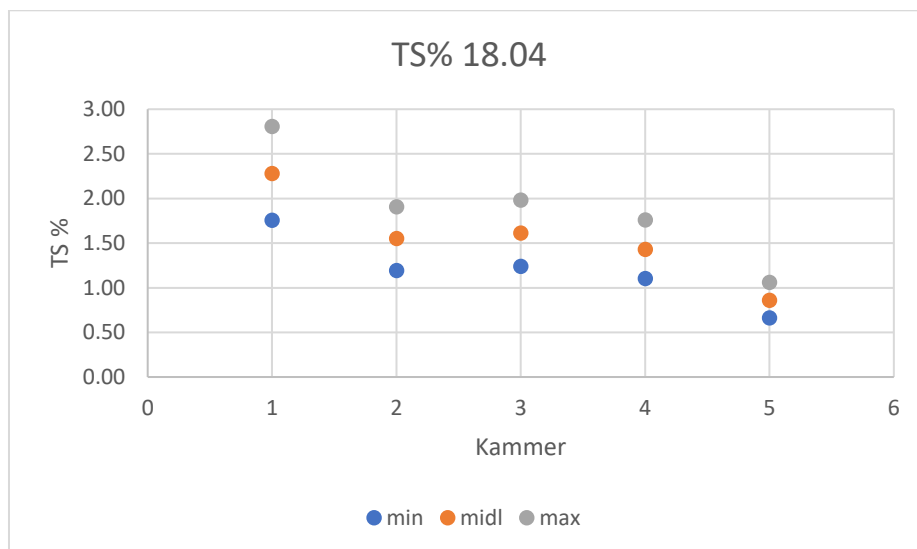
Figur 7. VS% av TS i reaktoren den 22.04.19.



Tabell 5. TS% i reaktoren den 18.04.19.

TS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
18.04.19					
min	1.76	1.19	1.24	1.10	0.66
middl	2.28	1.55	1.61	1.43	0.86
maks	2.80	1.91	1.98	1.76	1.06

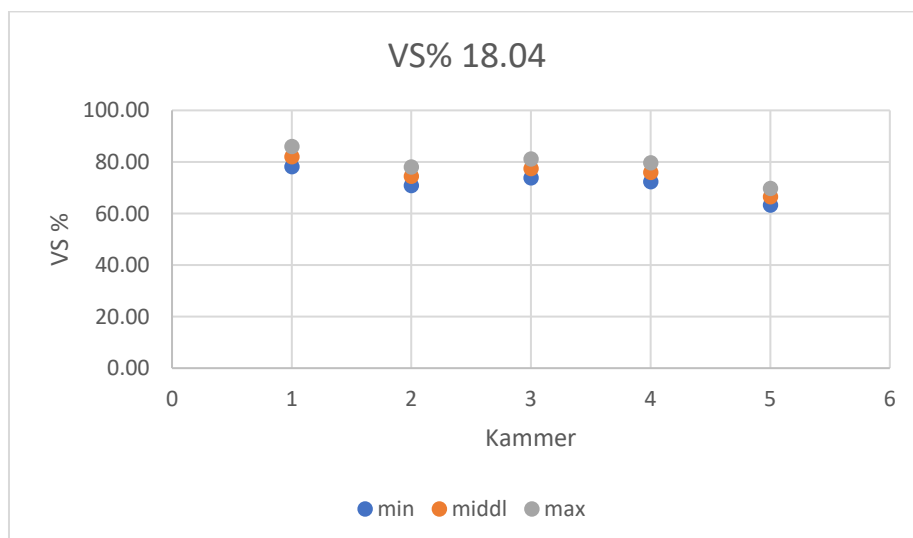
Figur 8. TS% i reaktoren den 18.04.19.



Tabell 6. VS% av TS i reaktoren den 18.04.19.

VS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
18.04.19					
min	78.09	70.82	73.72	72.27	63.27
midl	82.03	74.39	77.44	75.91	66.46
maks	85.97	77.96	81.16	79.55	69.65

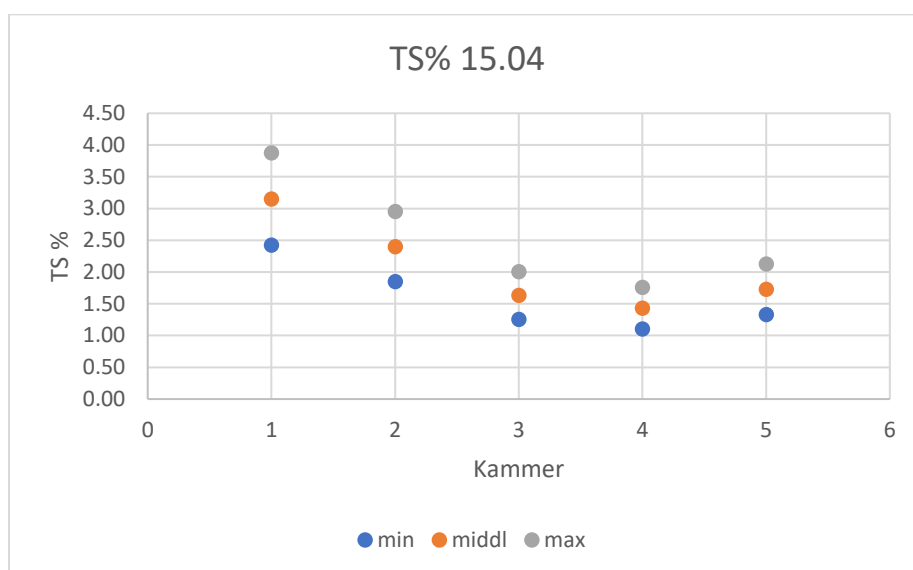
Figur 9. VS% av TS i reaktoren den 18.04.19.



Tabell 7. TS% i reaktoren den 15.04.19.

TS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
15.04.19					
min	2.43	1.85	1.26	1.10	1.33
middl	3.15	2.40	1.63	1.43	1.73
maks	3.87	2.95	2.00	1.76	2.13

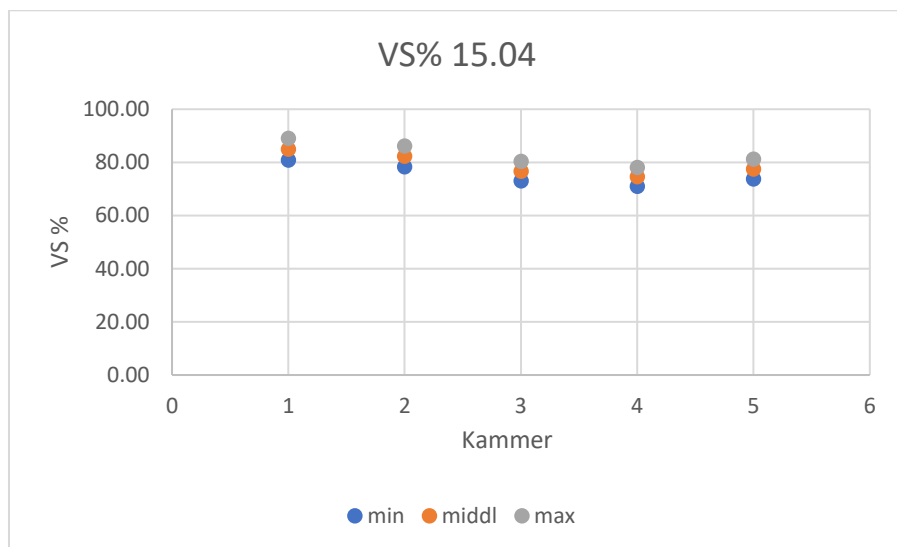
Figur 10. TS% i reaktoren den 15.04.19.



Tabell 8 VS% av TS i reaktoren den 15.04.19

VS%	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
15.04.19					
min	80.82	78.27	72.95	70.93	73.76
middl	84.89	82.22	76.63	74.51	77.48
maks	88.96	86.17	80.31	78.09	81.20

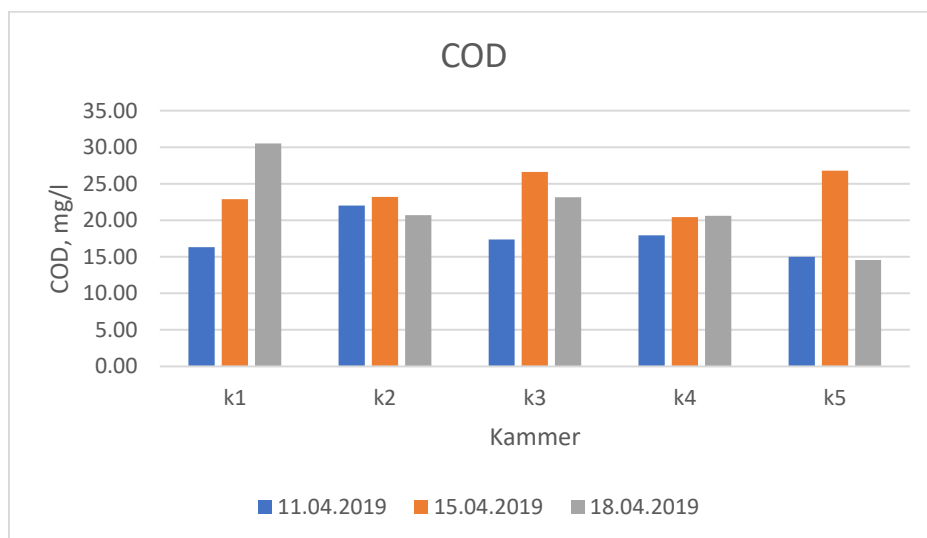
Figur 11. VS% av TS den 15.04.19.



Tabell 9. COD i reaktoren den 11, 15 og 18.04.19.

COD, g/l	k1	k2	k3	k4	k5
11.04.2019	16.33	22.02	17.39	17.93	15.00
15.04.2019	22.88	23.20	26.62	20.45	26.79
18.04.2019	30.52	20.71	23.14	20.59	14.58

Figur 12. COD i reaktoren den 11.15. og 18.04.



Selv om både TS%, VS % og COD har en liten antydning til reduksjon fra det 1. til det 5. kammer etter vurderingen kan ikke disse data brukes for å ta noen konklusjoner, og blir derfor ikke brukt for prosessanalyse og beregninger.

Det ble også tatt prøver fra biorest tank og uttaksrør fra reaktoren til tanken for biorest lagring. Prøvene fra 06.05.19 og 08.05.19 viser betydelig forskjell i TS% og VS% mellom disse to (se tabell 10).

Tabell 10. TS% og VS% av TS i kammer 5 og i biorest-tank

dato	Kam5		Biorest-tank	
	TS%	VS% av TS	TS%	VS% av TS
06.05.19	1.08	49.16	2.03	76.97
08.05.19	0.62	60.70	2.03	80.31

Tallene viser at tørrstoffinnholdet i biorest-tanken var mer enn dobbelt så høyt enn i prøvene fra kammer 5 i reaktoren.

Konklusjon kan være at valgt prøvetakings metode ikke er egnet til denne oppgaven. Dette kan forklares med for lav konsentrasjon av tørrstoff i substratet generelt, som er under grenser for målefeil, påvirkning av sagflis fra grisekjøtsel, strømningsforholdene i reaktoren, når de største partiklene avsettes ved uttaksåpningene, eller grunnet andre årsaker. For å kunne undersøke endringer i kjemiske og biokjemiske forhold i substratet bør det derfor velges en annen metode. I tillegg bør mulige uttaksåpninger omplasseres for å gi et mer representativt bilde av substratkonsentrasjon.

4.2 Vurdering av reaktoren

4.2.1 Prosesskarakteristikker

Eksperimentell del startet som nevnt i midten av mars og avsluttet i midten av mai. Kontinuerlige gassmålinger finnes fra 04.04 til 10.05.19. Data for rå substrat er registrert først den 01.04.19, men da var ikke do-papir tilsett. Med det at HRT var 10 dager, blir for rå substrat brukt data som er gjennomsnitt av målinger 04 - 29.04, mens for biorest er det brukt målinger fra suspendert fraksjon av biorest.

For rå substrat TS% = 2.29%, VS% av TS = 86.23%

For biorest TS% = 0.92%, VS% av TS = 67.34%

Organisk belastning (formel 4):

$$\text{ORL} = 1.97 \text{ kg/m}^3$$

Hydraulisk oppholdstid (bestemt):

$$\text{HRT} = 10 \text{ dager}$$

Nedbrytingsgrad (formel 9):

$$D = 67.1\%$$

Biogassutbytte (formel 6):

$$Y = 0.567 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Virkningsgrad (formel 7):

$$\eta = 1.16$$

Som følger av beregninger er virkningsgraden er relativ lav.

4.2.2 Resultater av kjemiske analyser

4.2.2.1 COD – forbruk

For beregningen av COD – reduksjon ble brukt gjennomsnittlige verdier for COD i substrattanken, kammer 5 og biorest tanken (se tabell 11). Beregninger ble gjort på formel (10).

Tabell 11. COD i substrat og biorest.

Substrat	15.04	18.04	midl
COD, mg/l	40.71	33.27	36.99

Biorest	6.05	8.05	midl
COD, mg/l	25.23	29.21	27.22

kam 5	midl
COD, mg/l	15.12

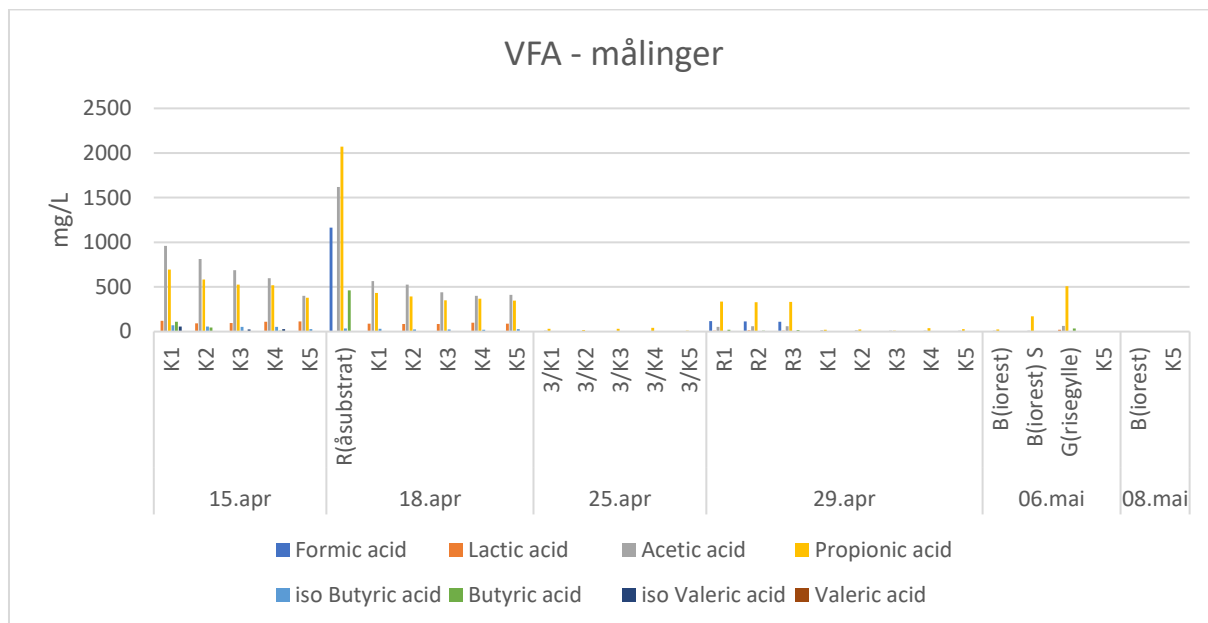
COD reduksjon mellom substrat og biorest-tank er på 26.4 prosent, som er relativt lite. Hvis vi bruker data for den 5. kammer, blir omsetningsgrad 59.1 prosent.

COD på samme måten som TS og VS konsentrasjon i biorest tank ser ut til å gi for store verdier, noe som kan knyttes til oppsamling av sagflis i biorest-tanken

4.2.2.2 VFA - målinger

VFA – analyse ble utført av personalet på NIBIO – laboratoriet. Resultatene er presentert i figur 13

Figur 13. VFA – målinger i substratet, biorest og i de forskjellige kammer i reaktoren



Ut ifra grafen i figur 13 er det synlig at VFA – konsentrasjon endrer seg vesentlig fra den 15. og 18. april, når total konsentrasjon av VFA i kammer 1 tilsvarende er 2012 mg/l og 46 mg/l.

Propionsyre er høy både i substratet i prøver fra reaktoren og i biorest, og i enkelte prøver høyere enn eddiksyre.

4.2.2.3 FOS/TAC – analyser

Data for FOS/TAC forholdet for perioder med målinger er gitt i tabeller 12 – 14.

Tabell 12. Verdier for FOS/TAC i de forskjellige kamre

dato	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
29.04	0.4	0.35	0.33	0.32	0.32
25.04		0.28	0.23	0.23	0.19

Tabell 13. FOS/TAK-forholdet i starten og i enden av reaktor

dato	kam1	kam5
11.04	0.42	0.43
15.04	0.35	0.37
18.04	0.34	0.28

Tabell 14 FOS/TAC verdi i prøver fra kam 5 og biorest-tank

dato	kam 5	tank
6.05	0.41	0.44
8.05		0.43

(Biogas World, 2019) anbefaler følgende vurderinger (tabell 15):

Tabell 15. Vurdering og handling ved de forskjellige FOS/TAC-forhold

FOS/TAC forhold	Begrunnelse	Handling
>0.6	For høy biomasse belastning	Stoppe mating av reaktor
0.5 – 0.6	For høy biomasse tilgang	Legge til mindre biomasse
0.4 – 0.5	Anlegget er tungt lastet	Overvåke prosessen
0.3 – 0.4	Biogassproduksjon er maksimal	Hold biomasseinngang konstant
0.2 – 0.3	Organisk belastning er for lav	Øk langsomt biomasseinngang
< 0.2	Biomasseinngangen er for lav	Øk raskt biomassetilgang

Målte FOS/TAC verdiene ligger i intervallet fra 0.19 (25.04) til 0.44 (06.05, biorest-tank). Dette indikerer at prosessen er stabil med biogassproduksjon nærmest til den optimale.

Lave verdier den 25.04 kan sammensettes med fallende biogassproduksjonen i perioden 22-25.04 (laveste endringene) og høyeste metanprosent (70 - 71% den 22 - 25.04)). Dette kan eventuelt knyttes til driftsproblemer med for lav omrørings hastighet. Dette trenger likevel videre vurdering med mulig bruk av flere dataanalyser.

4.2.2.4 Sammenligning av VFA, COD og FOS/TAC resultater.

Ut ifra fra VFA-data ble det valgt ut to dager med ulike målinger: den 15. og den 25. april. Prøveresultater for VFA, COD og FOS/TAC for disse dager er vurdert i sammenheng.

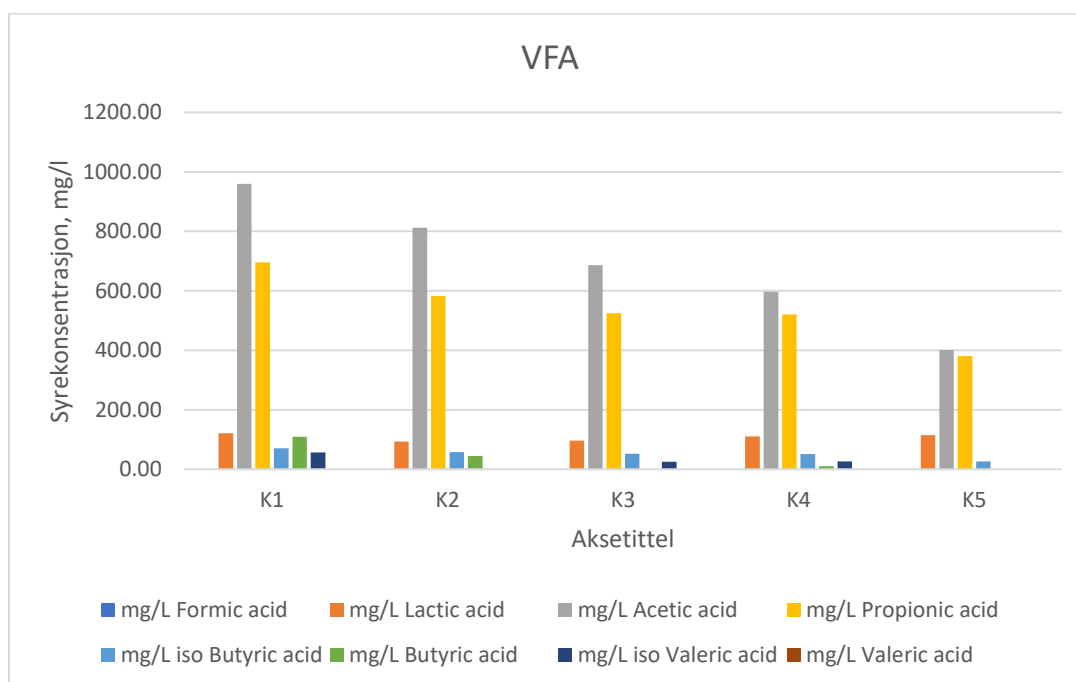
Mulige feilkilder har kan være: prøvetaking, prøveoppbevaring, prøvehåndtering, og målingsfeil.

Målingsdata for den 15. 14 er vist i tabell 16 og figurer 14 og 15.

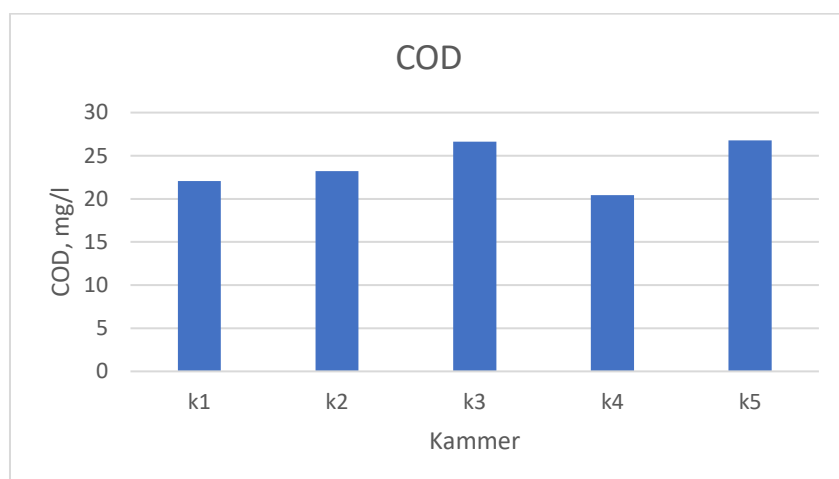
Tabell 16. VFA, COD og FOS/TAC målinger for prøver fra reaktorkammer den 15.04.19

		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
		Formic acid	Lactic acid	Acetic acid	Propionic acid	Iso Butyric acid	Butyric acid	Iso Valeric acid	Valeric acid	Totalt VFA	COD	FOS/TAC
15.apr	K1	0.00	120.66	959.84	696.27	70.25	108.76	56.52	0.00	2012.30	22.08	0.35
	K2	0.00	93.17	812.27	582.47	57.61	44.52	0.00	0.00	1590.04	23.20	
	K3	0.00	96.66	686.23	524.44	52.34	0.00	25.60	0.00	1385.27	26.62	
	K4	0.00	110.54	596.86	520.14	51.47	10.47	26.40	0.00	1315.87	20.45	
	K5	0.00	114.85	401.06	380.40	26.52	0.00	0.00	0.00	922.84	26.79	0.37

Figur 14. VFA – målinger fra de 5 kammer i reaktoren den 15.04



Figur 15 . COD – målinger for de 5 kammer i reaktoren den 15.04



Total konsentrasjon av VFA i reaktoren er forholdsvis høy - fra 2012 i den første kammer til 923 i den femte. Dominerer eddiksyre og propionsyre, hvorav mengde av eddiksyre er høyre. VFA synlig reduseres fra kammer til kammer.

COD – målinger viser ikke tendens til reduksjon.

FOS/TAC – forholdet er innenfor de optimale grenser.

Gjennomsnittlig daglig biogassproduksjon i perioden fra 15.04 til 18.04 er 4.4 m³. Metanprosent er 67.6%.

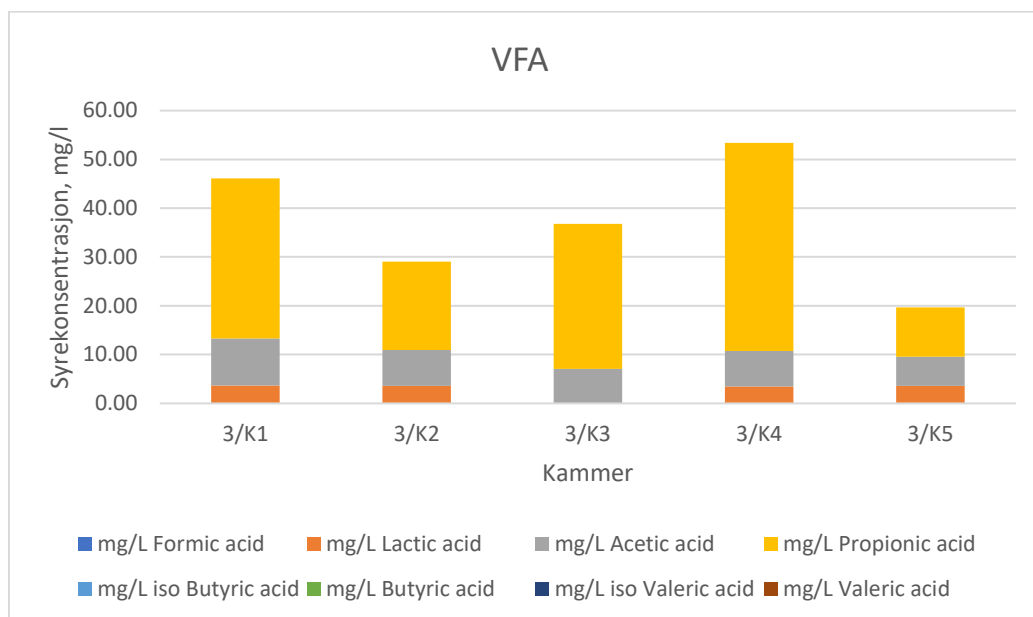
Prosessen ser ut til å være stabil.

Målingsdata for den 25.04 vist i tabell 17 og figurer 16 og 17.

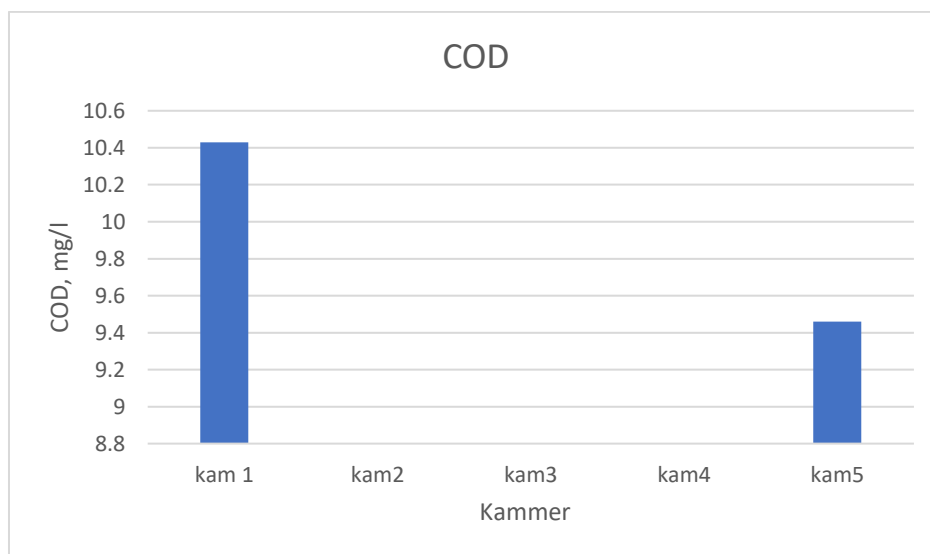
Tabell 17. VFA, COD og FOS/TAC målinger fra reaktorkammer den 25.04.19

		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
		Formic acid	Lactic acid	Acetic acid	Propionic acid	iso Butyric acid	Butyric acid	iso Valeric acid	Valeric acid	Totalt	COD	FOS/TAC
25.apr	3/K1	0.00	3.64	9.65	32.82	0.00	0.00	0.00	0.00	46	10.43	
	3/K2	0.00	3.60	7.36	18.07	0.00	0.00	0.00	0.00	29		0.28
	3/K3	0.00	0.00	7.06	29.72	0.00	0.00	0.00	0.00	37		0.23
	3/K4	0.00	3.44	7.30	42.65	0.00	0.00	0.00	0.00	53		0.23
	3/K5	0.00	3.58	5.96	10.10	0.00	0.00	0.00	0.00	20	9.46	0.19

Figur 16. VFA målinger i de 5 kammer i reaktoren den 25.04



Figur 17. COD målinger den 25.04.19



Som vi kan se fra målinger er total mengde av VFA liten og endrer seg fra 46 i kammer 1 til 20 i kammer 5, med den største verdi på 53 i kammer 4. Tendens til reduksjon er ikke entydig. Propionsyre er dominerende.

COD – målinger finner bare for den 1. og det 5. Kammer, og de viser ubetydelig reduksjon av COD på totalt 66 mg/l.

Metanproduksjon rundt denne datoen sank til ca. 1.68 m³/dag, mens metanprosent har økt til rundt 71.

Lav biogassproduksjon og dominans av propionsyre kan være et tegn på et problem med i prosessen med mulig inhibering.

FOS/TAC tall ligger fra 0.28 til 0.19 og tyder på lav organisk belastning.

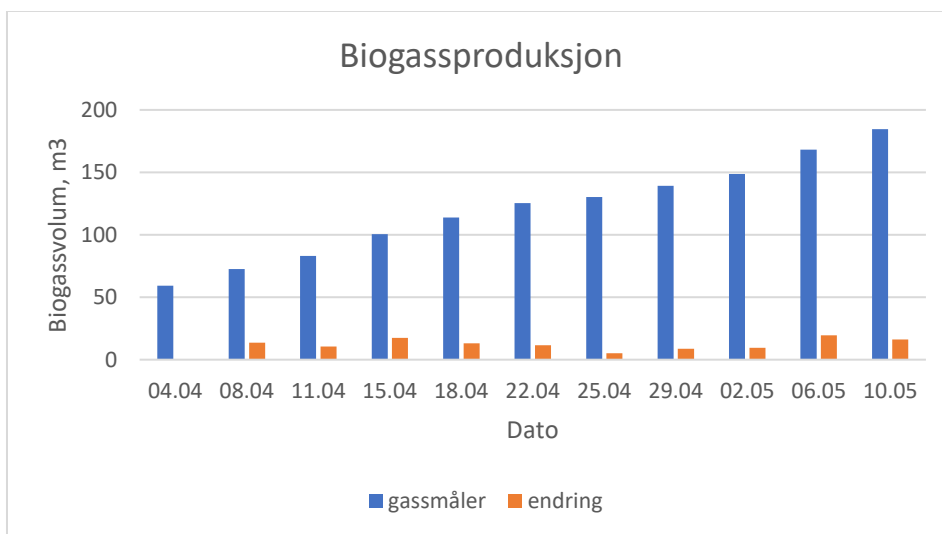
4.2.2 Biogass mengde og kvalitet

I perioden for målinger (04.04 – 10.05.19) ble det produsert totalt 125.31 m³ biogass. Målingsresultater er presentert i tabell 18 og i figur 18.

Tabell 18. Gassmålinger

Dato	04.04	08.04	11.04	15.04	18.04	22.04	25.04	29.04	02.05	06.05	10.05
gassmåler	59.176	72.687	83.115	100.632	113.829	125.312	130.367	139.236	148.687	168.294	184.486
endring		13.511	10.428	17.517	13.197	11.483	5.055	8.869	9.451	19.607	16.192

Figur 18. Biogassproduksjon, akkumulert og endringen fra uke til uke.



H₂S – målingene presenter i tabell 19.

Tabell 19. Mengde av H₂S i gassprøvene

dato	25.04	29.04	02.05	03.04	06.05	10.05
H ₂ S, ppm	2375	2750	2350	2100	2150	2175

H₂S - målinger viser et relativt høyt innhold av hydrogensulfid. Dette er en giftig gass. Ved forbrenning av hydrogensulfid dannes det svoveldioksid, som reagerer med luften og danner korrosiv svovelsyre (Morken et al., 2017). Ved eventuell etterbehandling og foredling av biogass må det tas hensyn til dette. I forsøket ble det som nevnt brukt grisegylle. Mengde av H₂S kan være annerledes for svartvann.

I forsøksperioden (04.04 - 10.04) ble produsert metangass beregnet til 80.06 m³. Dette er basert på produsert biogass samt målinger av gass-sammensetning av CH₄ og CO₂ (tabell 20). Tabellen viser at prosentandelen av metan var høy.

Tabell 20. Biogass sammensetning (periode 04 – 29.04)

dato	4.04	8.04	11.04	15.04	18.04	22.04	25.04	29.04	2.05	6.05	10.05	midl
CH ₄ , norm, %	69.14	68.97	67.66	66.17	67.64	70.70	71.02	67.29	66.10	67.16	66.13	68.0
CO ₂ , norm, %	30.86	31.03	32.34	33.84	32.36	29.30	28.98	32.71	33.91	32.84	33.87	32.0

Spesifikke metanutbytte ble beregnet etter formel (8). Spesifikke metanutbytte SP er 0.4 m³/kg organisk stoff.

Spesifikke metanutbytte for de forskjellige komponentene i rå substrat er:

- Grisegjødsel, bløt – 268 m³/t VS
- Kvernet og fortynnet matavfall husholdninger – 470 m³/t VS
- Do-papir – 160 m³/t VS (ved 0°C, beregnet av NIBIO) (Linjordet, 2019).

4.3 Biorestkvalitet

4.3.1 Reduksjon av patogene mikroorganismer

For å kunne bevise tilstrekkelig reduksjon av patogene bakterier gjennom prosessen er prøvene av substrat og biorest blitt sendt til EUROFINS - laboratoriet for analyse. Prøveresultatene visst i tabell 21.

Tabell 21. Reduksjon av patogene bakterier

Prøve	Prøverefranse	Salmonella	Termotolerante koliforme	Total tørrstoff
		/25 g	MPN/g	%
Nr1	Grisegylle	Ikke påvist	> 16 000	9,2
Nr2	Substratmiks	Ikke påvist	3 000	3,7
Nr3	Kammer 5	Ikke påvist	< 20	1,1
Nr4	Biorest-tank	Ikke påvist	< 20	1,6

Innholdet av salmonella er ikke påvist i noen av prøvene.

Ut ifra resultatene er det synlig at reduksjon i Termotolerante koliforme bakterier (TKB) er fra 3000 MPN/g i substratmiks til under 20 MPN/g i prøver både fra kammer 5 i reaktoren og i biorest-tank. Kravet fra Mattilsynet til TKB er som tidligere nevnt i oppgaven mindre enn 2500/g tørrstoff. Dette bekrefter at termofil anaerob prosess gir god reduksjon av patogene og sikker biorest kvalitet.

Resultat er som forventet for en termofil prosess. Substratet forvarmes til temperatur på 55 °C allerede i miksertank før denne mates inn i reaktoren. Mating skjer med intervall på én time, som er den korteste oppholdstid for substratet i miksertanken. Videre holdes substratet ved 55 °C i ti dager i reaktorens kamre.

4.3.2 Litium - test

NIBIO har foretatt en test med tilsetning av en mengde litium - løsning i substratet. 13.5 g LiOH.H₂O (lithiumhydroksidmonohydrat) ble løst i 0.5 liter vann og tilsatt i miksertanken. Det ble tatt prøver fra hvert kammer i løpet av ti dager etter tilsetningen. Prøver fra tre dager ble analysert (tabell 22).

Tabell 22. Litium spredning gjennom reaktorkamre i tre dager etter tilsetning av traseer

	Litium - konsentrasjon, mg/l				
	kam 1	kam 2	kam 3	kam 4	kam 5
dag 1	0.68	0.47	0.23	0.14	0.83
dag 2	1	0.95	0.94	0.92	1
dag 3	0.97	0.94	0.96	0.96	0.91

Med å måle litium – konsentrasjon i alle fem kammer i reaktoren over tid kan man observere massebevegelse inne i reaktoren og mellom kamrene. Normalt i en plug – flow reaktor skal substratet bevege seg konsekvent fra kammer til kammer med antatt oppholdstid i hvert kammer. Ifølge analyse (Tabell 22) spredde litium seg over hele volumet raskt. Litium var påvist i alle kamrene første dag etter tilsetning og konsentrasjonen var nesten lik i alle kamrene dag 2. Dette kan vise at en del av substratet kan passere fra første til femte kammer raskere enn antatt oppholdstid på ti dager.

Eksperimentet påvist at enkelte fraksjoner kan ha oppholdstid mindre enn 24 timer, mens noen har mer enn ti dager. Teoretisk kan den korteste oppholdstiden være én time.

Relater til patogen reduksjon kan testen peke på en fare for at bakterier passerer raskere gjennom reaktoren enn antatt og nødvendig reduksjon ikke blir oppnådd. Dette kan også følge til lavere metanproduksjon siden en del av substratet får ikke nok oppholdstid (Linjordet, 2019).

Grunnen til det kan være lav TS%. Substratet er veldig tyntflytende og renner i små åpninger mellom kammerveggene og skilleveggene mellom kamrene, og med dette sprer seg i hele volumet.

4.3.3 Næringsstoff

Prøveanalyser var forsinket grunnet tekniske problem hos EUROFINS. Næringsinnholdet blir derfor ikke omtalt i dette kapitlet.

5. Masse- og energibalanse

5.1 Massebalanse

Massebalanse beregnet for en valgt periode med kjente gassmålingene. Kontinuerlige gassmålingene er gjort fra den 04.04 til den 10.05. Daglige mengde av substratet, som pumpes inn i reaktoren er 300 l. Det er antatt at det pumpes ut 300 l biorest daglig. Gassproduksjonen er funnet av gassmåleravlesninger.

Prøvene fra biorest-tanken og fra utgangen av reaktoren (kammer 5) ble begge analysert. Biorest ble separert på den faste og den flytende faser som ble videre analysert hver for seg. TS og VS fra den suspenderte fasen var også brukt for beregninger av massebalanse.

For substratet ble det brukt gjennomsnittlige verdier av målingene den 04.04, 15.04, og 18.04. For biorest-tanken ble målingene fra den 02.05, 06.05, 08. 05 og 10.05 brukt. For det 5. kammer ble målingene valgt for perioden fra den 15.04 til den 08.05.

5.1.1 Massebalanse for prøvene fra biorest-tank

Resultater for massebalanse er presentert i tabellene 23 og 24.

Tabell 23. Massebalanse TS (biorest-tank)

TS inn	TS ut	Volum biogass	Vekt biogass	Summ vekt ut	Omsetnings grad TS	Differansen vekt inn - vekt ut	
kg/dag	kg/dag	m ³ /dag	kg/dag	kg/dag	%	kg/dag	%
6.87	5.43	3.48	3.75	9.18	20.96	-2.31	-34

Tabell 24. Massebalanse VS (biorest-tank)

VS inn	VS ut	Differansen VS inn - VS ut	Volum biogass	Omsetnings grad VS	Nedbrytingsgrad VS	Beregnet biogassutbytte
kg/dag	kg/dag	kg/dag	m ³ /dag	%	%	m ³ /kg VS
5.92	4.19	1.74	3.48	29.31	46.16	1.273

Tabell 24. (Fortsettelse)

Realt biogassutbytte	Differanse biogassutbytte		Beregnet metanutbytte	Realt metanutbytte	Differansen metanutbytte	
	m ³ /kg	%			m ³ /kg	%
0.588	0.68	116.48	0.866	0.400	0.466	116.40

Tabellen 23 gir liten omsetningsgrad (20.96 prosent) og mye større masse ut av reaktoren (34 prosent) enn den som kommer inn.

Som følger fra tabellen 5.2, er det usannsynlig store biogass- og metanutbytte (1.273 m³/kg VS og 0.866 m³/kg VS) og forholdsvis liten nedbrytingsgrad (46.16 prosent).

Dette kan tide på at TS og VS i biorest-tanken har for høye verdi. Oppkonsentrering av tørrstoff i biorest-tanken kan skyldes gradvis akkumulering av flispartikler i reaktorrommet med videre utvasking via utløpsrør. Partiklene passerer forbi uttaket av 5. kammer, som forklarer den store forskjellen i TS% og VS% mellom kamera 5 og biorest-tank. Sagflispartikler fra biorest er med i VS%, men er tungt nedbrytbare og deltar i liten grad i biogassproduksjon.

5.1.2 Massebalanse for kammer 5

Resultatene er presentert i tabellene 25 og 26.

Tabell 25. Massebalanse TS (kammer 5)

TS inn	TS ut	Volum biogass	Vekt biogass	Summ vekt ut	Omsetningsgrad TS	Differansen vekt inn - vekt ut	
						kg/dag	%
6.87	2.49	3.48	3.75	6.24	63.76	0.63	9

Tabell 26. Massebalanse VS (kammer 5)

VS inn	VS ut	Differansen VS inn - VS ut	Volum biogass	Omsetningsgrad VS	Nedbrytingsgrad VS	Beregnet biogassutbytte
5.92	1.54	4.39	3.48	74.05	74.06	0.794

Tabell 26. (Fortsettelse)

Realt biogassutbytte	Differansen biogassutbytte		Beregnet metanutbytte	Realt metanutbytte	Differansen metanutbytte	
	m ³ /kg	%			m ³ /kg VS	m ³ /kg
0.588	0.21	34.95	0.540	0.400	0.140	34.90

Ut ifra tabell 25 er det synlig at masse ut av reaktoren er 9 prosent større enn massen av tilsatt substrat. Forskjellen kan forklares med unøyaktighet i målingene. Omsetningsgrad TS er høy (63.76 prosent).

Tabellen 26 viser nedbrytingsgrad VS på 74.05 prosent. Beregnede biogass- og metanutbytte er nærmere til de reelle tall, men forskjellen er relativ stor (ca. 35 prosent).

5.1.3 Massebalanse for suspenderte fraksjonen

Resultatene er vist i tabellene 27 og 28.

Tabell 27. Massebalanse TS (suspendert fraksjon)

TS inn	TS ut	Volum biogass	Vekt biogass	Summ vekt ut	Omsetningsgrad TS	Differansen vekt inn - vekt ut	
						kg/dag	%
6.87	2.76	3.48	0.00	3.75	59.83	0.36	5

Tabell 28. Massebalanse VS (suspendert fraksjon)

VS inn	VS ut	Differansen VS inn - VS ut	Volum biogass	Omsetningsgrad VS	Nedbrytingsgrad VS	Beregnet biogassutbytte	Realt biogassutbytte
5.92	1.86	4.07	3.35	68.63	67.07	0.824	0.588

Tabell 28. (Fortsettelse)

Differansen biogassutbytte		Beregnet metanutbytte	Realt metanutbytte	Differansen metanutbytte	
m ³ /kg	%	m ³ /kg VS	m ³ /kg	m ³ /kg	%
0.24	40.14	0.560	0.400	0.160	40.08

TS - massebalanse beregnede på suspenderte fraksjonen fra biorest gir laveste avvik i masse av tørrstoff ut og inn i reaktoren (5 prosent).

Beregnete verdier for biogassutbytte (0.824 m³/kg) og metanutbytte (0.560 m³/kg) er høyre enn for kammer 5 og gir feil på ca. 40 prosent.

Alle beregningene gir usannsynlig stort biogassutbytte. Ved nedbrytingsgrad 74 prosent biogassproduksjon er på 0.794 m³/kg VS, men ved 67 prosent er 0.824 m³/kg VS. Dette virker usannsynlig og indikerer en feil med inngangsdata.

Biogassutbytte på basis av organisk belastning og gassmålinger er på 0.588 m³/kg VS. Dette tilsvarer VS på 6.04 kg (gassproduksjon er 3.48 m³). Ved VS vekt inn på 6.87 kg må vi ha omsetning VS på 88 prosent.

Feilen kan begrunnes med unøyaktighet med prøvetaking både for substrat og biorest.

5.1.4 Massebalanse på COD

COD var bestemt i utvalgte prøver i biorest-tank og reaktorkammer. Beregningsresultater er presentert i tabell 29. For biorest er middelvei brukt for målingene fra den 15.04 og den 18.04. For biorest-tank er det tatt gjennomsnitt av data fra 06.05 og 08.05. For det 5. kammer regner gjennomsnitt for alle kjente data for kammer 5.

Tabell 29. COD massebalanse for biorest-tank og kammer 5

COD Sub.	COD Biorest	COD Kam 5	COD omsatt		Metan beregnet		Metan produsert	Differanse	
			Biorest	Kam 5	Biorest	Kam 5		Biorest	Kam 5
g/l	g/l	g/l	%	%	m ³ /dag	m ³ /kg dag	m ³ /dag	%	%
36.99	27.22	15.12	26.4	59.1	1.03	2.30	2.22	53.8	-3.4

Som vist i tabellen 29, er daglig produsert metan beregnet på omsatt COD er 1.03 m³/dag på data fra biorest-tank og 2.30 m³/dag på data fra kammer 5. I sammenligning med den produserte metanen, som er 2.22 m³/dag i gjennomsnitt, gir biorest-tank mer enn halvparten mindre metanvolum enn det som reelt produsert – 53 prosent avvik. Resultat fra kammer 5 gir 3.5 prosent avvik. Denne forskjellen kan forklares med målings og beregningsnøyaktighet.

5.2 Energibalanse

Normal energi forbruk for egen drift av en biogassreaktor er estimer til 25 prosent av egen produksjon (Morken et al., 2017).

Ifølge (Bachmann & S.A, 2013) består energibehov til en biogassreaktor av følgende hovedkomponenter: energi for oppvarming av substratet, kompensasjon for energitap gjennom reaktorvegger, samt kompensasjon for energitap med fordamping av vann.

I testanlegget varmes substratet opp i miksertanken til temperatur på 55 grader og kommer inn i reaktoren allerede oppvarmet. Oppvarming i miksetank og i reaktoren skjer ved vannledning og varmevekslere. Vannet varmes opp til 70 grader for å holde substrattemperatur på 55 °C.

Avlesninger fra strømmåler ble brukt for å vurdere daglig strømforbruk for anlegget. Separat var også registrert elektrisitetsforbruk for fylling av buffertankene (innpumping av råsubstrat). Fylling av buffertanker tok ca. to timer mer i forhold til bruk av en pumpe.

Registrert strømforbruk for en dags anleggsdrift er på 86.56 kWh. Strømforbruk for innpumping av substrat er 4.33 kWh.

Ifølge (Meteorologisk institutt, 2019) var gjennomsnitt temperatur i april 2019 på 7.7 grader.

5.2.1 Energibehov for oppvarming av substratet

Energibehov for oppvarming av substrat beregnes ved følgende formel (Bachmann & S.A, 2013):

$$P_o = R * C * \Delta T \quad (11)$$

Hvor:

P_o – energibehov for oppvarming av substratet, J/s

R – gjennomsnittlig mattingshastighet, g/s

C – spesifikk varmekapasitet for vann, C= 4.186 J/g*K

ΔT – temperaturforskjell mellom substrat og reaktoren, K

Oppvarming av substratet foregår i miksertank. Matingshastighet til miksertank er den samme som for reaktoren – 300 l av rå substrat i døgn, noe som utgjør 12.5 i timen.

Reaktortank hadde ikke tilstrekkelig isolasjon og med termofil prosess har den avgitt en god del varme til omgivelser. Lufttemperatur inne i konteineren kom noen ganger opp i 20 – 25 grader. Ute-temperatur i april på dagstid var relativt høy, og kom opp til 20 grader enkelte dager. Buffertanker var ikke isolert og substratet inne kan også ha vært påvirket av varme. Det var ikke tilrettelagt til temperaturmålinger i buffertanker, men det er sannsynlig at substratet inne i buffertankene hadde samme temperatur som luften i konteineren. Dette kunne starte opp biokjemisk aktivitet allerede før blanding med inokulum.

Beregninger er presentert i tabell 30.

Tabell 30. Energibehov for oppvarming av substratet

T substrat	T ute	Innmatings hastighet, R	Spesifikk varmekapasitet	Energibehov	Energibehov $1J=2.78*10^{(-7)}$ kWh	Energibehov daglig
grad	grad	kg/h	J/kg*grad	J	kWh	kW/dag
55	7.7	12.5	4183	2473199	0.69	16.50

5.2.2 Energibehov for kompensasjon for varmetap gjennom reaktorvegg

Energitap via rektorvegg kan beregnes på følgende formel (Bachmann & S.A, 2013):

$$Pv = \Delta T' * S * U \quad (12)$$

Hvor:

Pv – varmetap gjennom reaktorens overflate, W.

$\Delta T'$ – temperaturforskjell mellom klima inne og utenfor reaktoren, K

S – overflate til reaktoren, m²

U – varmeoverføringskoeffisient for reaktorens veg, U = 4.65 W/m² K, (Rennuit & Sommer, 2013)

Oppvarmingssystem i reaktoren er av samme prinsippet, som for miksertanken – varmeveksling ved oppvarmet til 70 grader vann.

Beregninger er presentert i tabell 31.

Tabell 31. Energibehov for å dekke varmetap gjennom reaktorvegg

Reaktorvolum, S	Varmeoverføringskoeffisient, U	T reaktor	T ute	Energibehov, Pv	Energibehov Pv daglig
m ³	W/m ² *grad	grad	grad	kWh	kW/dag
13.56	4.65	55	7.7	2.98	71.60

5.2.3 Energibehov for kompensasjon for vannfordamping

Eksperimentet forgikk med termofil prosess, noe som førte til økt fordamping av vann i reaktoren. Vanndamp var blandet med biogass og ble ført ut av reaktoren. Dette forårsaket et teknisk problem under eksperimentet. Installert gassmåler var overfylt av kondensert vann og det ble montert en ventil med en beholder for å samle opp kondens. Volumet av innsamlet kondensert vann var estimert til ca. 8 l for hele perioden med målingene.

Normalt energitap for kondens er neglisjerbar i forhold til andre energibehov.

Energitap ved fordamping beregnes ut på formel (Bachmann & S.A, 2013):

$$P_s = F * E * Sat \quad (13)$$

Hvor:

P_s – energitap ved fordamping, J

F – hastighet til utstrømning av biogass, m³/s

E – fordampingsentalpi, kJ/kg,

Sat – vannmengde i produsert biogass, kg/m³

Beregninger er presentert i tabell 32.

Tabell 32. Energibehov for å dekke fordampingstap

Utstrømningshastighet biogass, F	Fordampingsentalpi, E	Vanninnhold Sat	Energibehov Psat	Energibehov Psat	Energibehov Ps daglig
m ³ /h	kJ/kg	kg/m ³	J	kWh	kW/dag
0.145	2.26	0.064	20.926	5.81741E-06	0.00013962

5.2.4. Totale energibehov og registrerte strømforbruk

Totalt beregnet daglig energibehov for biogassreaktoren og registrerte energiforbruket for et døgn er presentert i tabell 33.

Tabell 33. Beregnede totale energibehov og registrerte energiforbruk for anlegget

Beregnet			Totalt	Avlest
Po	Pv	Ps	Ptot	
kW	kW	kW	kW	kW
16.50	71.60	0.000139	88.11	86.56

Som det følger fra tabellen 33 ligger estimert energibehov nært til det registrerte strømforbruket. Forskjellen kan forklares med at utetemperatur denne dagen var høyere enn gjennomsnitt.

Daglig metanproduksjon på anlegget var i gjennomsnitt på 2.37 m³. Energi produsert fra 1 m³ metan er ca. 10 kW. Dette gir energiutbytte for reaktoren på 27.7 kW/dag, som er betydelig mindre enn behovet.

For å gjøre reaktoren mer effektiv bør både energiforbruk synkes og metanproduksjon økes.

Det eksperimentale anlegget var ikke konstruert med tanke på å redusere energiforbruk. Pumpene som var installert hører med en større reaktor, og isolasjon av tanker er utilstrekkelig. Ved nødvendige konstruktive endringene i utformingen av anlegget og installasjonselementene kan energibehovet reduseres.

For å redusere energibehov kan følgende foreslås:

1. Øke reaktorens volum (Lilleby & Morken, 2017). Dette krever også økt mengde råstoff.
2. Gå over til mesofil prosess (krever hygieniserings trinn i forbehandling, som kan være energikrevende).
3. Plassere reaktoren inne i et rom med konstant temperatur.
4. Isolere de aktuelle tankene.
5. Installere pumper og annet utstyr med tilpasset energiforbruk.

Økningen i metanproduksjon kan oppnås ved å eventuelt øke organisk belastning. For eksempel ved å øke TS% til 5 prosent øker mengde av produsert metan fra dagens 2.37 m³/dag til 5.17 m³/dag (ved antagelse at VS%, biogassutbytte og metanprosent er uendrede).

6. Anslagsberegninger

For prosjektet kan det være fordelaktig å kunne vurdere kostnader og lønnsomhet ved investeringer og drift av det lokale biogassanlegget. For å kunne forhåndsbergne den økonomiske effekten er det ønskelig at reaktorvolumet, forventet biogassproduksjon og metanproduksjon, samt andre relevante prosesskarakteristikkene estimeres. I tillegg bør forbehandling av substratet vurderes. For vurdering av videre bruk av biorest er det også av interesse å estimere innhold av næringsstoffer, tørrstoffinnhold og volumet av effluent.

Det brukes beregningsgrunnlag (Morken, 12.10.2017) for å anslå karakteristikkene, noe som kan ha betydning for økonomisk vurdering av biogassanlegg. Selve økonomivurderingen er ikke behandlet i denne oppgaven.

6.1 Substratmengde

Etter data oppnådd fra prosjektleder, forventes det at antall beboere i leiligheter blir på ca. 130 personer. I fravær av målinger hadde det vært interessant å finne fram til data man kunne bruke som inngangsparametere. Det er svært sprikende statistikk angående svartvann og avfallsmengde basert på kilder som er funnet. Det er dermed stor usikkerhet med grunnleggende data og resultatene kan bli misvisende.

6.1.1 Anslag av svartvannsmengde

Svartvann består som tidligere nevnt av vann, urin, avføring og dopapir. Disse komponentene vil bli sett på hver for seg.

Avføringsmengden er individuell og avhengig av kosthold. Den øker med andel vegetar mat og er mindre hos mennesker som foretrekker animalske produkter. Daglig fecal masse for de amerikanske og britiske innbyggere i gjennomsnitt er 100 - 200 g, og ofte mindre enn 100 g. Folk som bor på landsbygda i Uganda, har gjennomsnittlig avføringsvekt per dag på omtrent 470 g, og den voksne befolkningen i India - 311 g, mens i Russland og Ukraina ligger gjennomsnittet på 250-300 g (Водорпай, 2013). (Britannica, 2002) gir tall for mengde av menneske avføring på 100-250 g. person/dag og inneholder i gjennomsnitt 75 % vann og 25 % tørrstoff.

Ifølge Aftenposten produserer et menneske i gjennomsnitt 500 l urin og 152 kg avføring årlig ved kroppsvekt på 80 kg (Engan, 2013).

Urin inneholder 95 prosent vann. Spesifikk vekt varierer fra 1,005-1,030 g/ml. Mennesker produserer 1.0 – 1.5 l per dag (Aarnes & Kierul, 2018).

Ifølge (Rose et al., 2015) er median-fekal våt masseproduksjon 128 g/person*dag, med et gjennomsnittlig tørrstoff innhold på 29 g/person*dag. Fecal våte masseverdier ble økt med en faktor på 2 i lavinntektsland (høyt fiberinntak) sammenlignet med verdier som ble funnet i høyinntektsland (lavt fiberinntak). Gjennomsnittlig urinmengde var 1,42 liter/person*dag med et tørrstoffinnhold på 59 g/person*dag.

Dopapir er med på å øke tørrstoffinnhold. Ifølge (TA, 2007) bruker nordmenn 9,3 kg dopapir årlig.

Vakuumtoaletter reduserer vannmengde med 40-90 prosent og bruker fra 0.5 til 1.0 liter vann per spyling avhengig av modellen med trykk på 0.3 – 0.5 bar (Wendland, januar 2009).

Jeg valgte å basere meg på data fra artikkelen: «Biogas and nutrients from blackwater, lawn cuttings and grease trap residues—experiments for Hamburg's Jenfelder Au district», forfattere S. Hertel*, P. Navarro, S. Deegener and I. Körner.» De beskriver et forsøk på samutråning av svartvann, fettfelle rester og plen klipp.

Ifølge (Hertel* et al., 2015) produserer en person ca. 500 liter urin og 50 liter avføring per år. Installasjonen av vakuumtoaletter reduserer som nevnt mengden vann fra tidligere 6-8 liter til omtrent 1 liter per bruk. I forsøket går forskere ut ifra at det brukes 1 l vann per vask i vakuumtoalett og 15 kg toalettpapir per person/år i gjennomsnitt. Den spesifikke frekvensen av svartvann fra vakuumtoaletter er gitt med 6 l per person/dag i gjennomsnitt.

Samme kilde oppgir for svartvann TS = 0.6%, VS = 65% av TS og gjennomsnittlig biogasspotensial med 500 l/kg av VS (Hertel* et al., 2015).

Disse tallene er relevante for beregningene i denne oppgave, siden forhold i Tyskland kan være tilnærmet like norske forhold.

Detter gir:

1,37 l urin, 0,137 l avføring, 6 l vann, 0,04 kg dopapir per person /dag, til sammen 7,55 l svartvann person/dag.

Ut ifra arbeidstiden skal daglig mengde svartvann reduseres med 1/3 (åtte timers arbeidsdag), tilsvarende blir 5,03 l/person/dag.

Estimert mengde svartvann i den framtidige leilighetskompleks er 5 l/person/dag.

6.1.2 Anslag av kjøkkenavfallsmengde

Det representerer vanskelighet å estimere forventet volum av kjøkkenavfall. Forskjellige kilder kommer med tall som varierer i størrelse og beregningsmetode.

I Substrathåndbok (Carlsson, februar 2009) er det oppgitt tall på ca. 128 kg matavfall per person per år fra svenske husholdninger, restauranter, catering og butikker. Det anslås at matavfallet fra husholdningene representere 80 prosent av denne mengden (Carlsson & Uldal, februar 2009). Det vil si en beregnet mengde av husholdnings matavfall på 102.4 kg/person*år.

SSB sine tall for «matavfall og annet våtorganisk avfall» er 192 000 tonn/år av 2 255 000 tonn/år total vekt (Statistisksentralbyrå, 2018)(se tabell 34). Dette gir per innbygger ca. 36.3 kg/person*år.

Ifølge (Wendland, (januar 2009) er jo høyere urbaniseringsfrekvensen er, desto lavere volum av oppsamlet organisk avfall per innbygger. I de fleste landområder er volumet av oppsamlet organisk avfall 122 kg/person*år i motsetning til store byer med kun 22 kg/person*år (Wendland, januar 2009). Denne summen inkluderer kjøkkenavfall, samt mykt og grovt hageavfall. For Tyskland brukte Wendland i sitt arbeid 73 kg/person*år.

Tabell 34. «Husholdningsavfall fordelt på materiale. 1000 tonn» (Statistisksentralbyrå, 2018)

Hushaldsavfall fordelt på materiale. 1000 tonn. ¹			
	2015	2016	2017
I alt	2 288	2 277	2 255
Restavfall	986	977	950
Papp og papir	270	260	251
Glass	60	63	66
Plast	37	40	44
Metaller	84	90	91
EE	48	50	50
Matavfall og annet våtorganisk avfall	181	189	192
Tre	283	284	283
Hageavfall	164	153	149
Tekstiler	0	0	2
Utsortert brennbart	34	34	38
Farlig avfall	62	62	66
Annet	79	75	73

¹ Avfallsmengden er korrigeret ned dersom næringsavfall er innblanda i hushaldsavfallet
 Rettet 10. august 2018.

I samråd med veiledere har man kommet fram til at gjennomsnittlig mengde av kjøkkenavfall er 0.25 kg/person daglig. Matavfall skal transporteres fra kjøkkenkvern med en mengde vann som er estimert

til 3,78 L per bruk. Hvis man antar at kjøkkenkvernen brukes en gang daglig og det bor ca. 3 person hver leilighet, blir mengden av ferdig kvernet matavfall på ca. 1.51 kg/person* dag.

6.1.3 Anslag av hageavfallsmengde

Hageavfall er 149 000 tonn eller ca. 28,13 kg per innbygger (Statistisksentralbyrå, 2018).

I (Hertel* et al., (2015) ble mengde av tilgjengelig hageavfall estimert med områdespesifikke veksthastigheten. De områdespesifikke veksthastighetene var på 1,7 kg/m² for klipp fra fellesarealer og 1,0 kg/m² for klipp fra private områder, basert på litteraturkilder. Det var også beregnet potensiale for grønnmassen fra plenklipp i nærliggende område med radius fem km. Denne tilsvarte 21 000 t/a.

Generelt er det en angitt mengde av 1-2 kg/m²*år i sesongen mars til oktober.

Det kunne være mulig å gjøre tilsvarende vurderinger for grøntareal i tilhørende leilighetskompleks i Fredrikstad, men grunnet manglende data om dyrket areal for leilighetskomplekset oppgaven tall fra SSB som er 28.1 kg/person/år hageavfall.

6.2 Beregninger

Beregningene gjennomført i vedlegg 5 Anslagsberegninger. Beregningene ble utført på formler gitt i Beregningsgrunnlaget (Morken, 12.10.2017).

Resultatene er gitt i tabell 35.

Tabell 35. Beregningsresultater

	mengde r kg, person år	mengde kg/ person/da g	TS%	VS% av TS	Metan potensial e m3 CH4/tonn VS	Biogass potensiale m3/tonn VS	Biogass produksjo nm3/døgn	N tot kg/dag	NH3-N kg/år mineralisert	P tot kg/år	Spredning sareal, daa
Matavfall	551.15	1.51	10	80	470	723.077	11.355	0.009	1.881	27.227	7.78
Hageavfall	28.10	0.08	40	90	300	476.190	1.716	0.148	32.439	4.384	1.25
Svartvann	1825.00	5.00	0.6	83	315	500.000	1.619	1.092	290.166	38.435	10.98
Total	2404.25	6.59					14.689		324.486	70.045	20

TS% substrat	3.22 %	
Konsentrasjon VS	26.33	kg/tonn
Reaktorvolum	5.41	m ³
Metanproduksjon, reel	5.69	m ³ /døgn
Spesifikk biogassproduksjon	651.59	m ³ /tonn substrat
Spesifikk metanutbytte	0.42	m ³ /kg VS
Mineraliseringsgrad (valgt)	60 %	valgt
Virkningsgrad	3.26	
Estimert energiproduksjon	42.67	kWt/døgn
Nødvendig spredningsareal	20	daa

Som nevnt tidligere er det svært stor usikkerhet med tanke på inngangsdata. Det også ble brukt følgende antagelser:

HRT 5 dager

Biogass tar 20 prosent av reaktorvolum

Metanproduksjon på 60 prosent

Internt energiforbruk på 25 prosent

Av beregninger kommer det fram at svartvann gir største bidrag til næringsstoffer, mens matavfall sørger for mesteparten av metanproduksjon.

Konsentrasjon av tørrstoff og følgende organisk stoff i substratet er lav, og dette fører til stort volum av flytende biorest som må håndteres. Det kan være aktuelt å ytterligere redusere vannmengden i vakuumpolett og i matavfallsblandingen. Det er spesielt ugunstig at det fører til tap av rent vann.

7. Diskusjon og konklusjon

I forbindelse med SeeEUGreen - prosjektet er det tenkt å bygge et leilighetskompleks i Fredrikstad. Prosjektet skal blant annet vurdere «grønne» teknologiske løsninger for vann og energi besparelse, samt avfallshåndtering. Bygningen skal ha grønntak, separat avløpssystem, vakuumpolett, og kjøkkenvern for matavfall. Det er planlagt oppvarmet drivhus hvor innbyggere kan dyrke selvprodusert mat. Svartvann og kjøkkenrester fra leilighetene er tenkt brukt for energiproduksjon via anaerob prosess i biogassreaktoren. Metan fra reaktoren skal gå til oppvarming av drivhuset og biorest brukes som flytende og fast gjødsel.

Denne oppgaven skulle vurdere biogassproduksjon, mengde og kvalitet til biorest produsert av de aktuelle råstoffene. For det eksperimentelle forsøket ble det valgt en ANTEC-biogassreaktoren, som var testet for å kunne brukes i Fredrikstad.

7.1 Prøvetakingsmetode

For å kunne overvåke kjemiske og biokjemiske forhold under gassproduksjonsprosessen ble forsøksreaktoren ombygd for å kunne ta substratprøver fra hvert kammer. Innholdet fra kamrene kunne tappes via kranåpninger.

Den grunnleggende hypotesen var at innholdet av TS% og VS% i substratet skulle synke fra kammer til kammer med økt oppholdstid i reaktoren. Det var fem kammer i reaktoren. Substratet skulle oppholde seg i to dager i hvert kammer. Antagelig starter hydrolyse allerede i miksertanken, hvor substratet blandes med inokulum, kvernes og oppvarmes til 55 grader. De påfølgende trinn, som fermentering, eddiksyredannelse og metandannelse skulle skje under bevegelse av substratet gjennom reaktorkamre.

Ut ifra dataene kunne ikke gradvis reduksjon av TS og VS bli bekreftet med sikkerhet. Både TS%, VS% og COD-målingene gir ikke et entydig bilde av konstant reduksjon av organisk materiale i substratet. Selv om det kan tyde på en trend til reduksjon fra første til siste kammer, varierte målingene i begge retninger, både reduksjon og økning. Konklusjon kan være at den valgte metoden egnet seg ikke til denne oppgaven. Grunnen til dette kan være at konsentrasjon av TS i substratet var generelt lav (ca. 2 prosent), noe som kan være lavere enn målefeil. Det beregnede relative standardavviket for prøvetaking er på 23 prosent i gjennomsnitt. Det andre grunnen kan være sirkulasjons-strømmer i reaktoren som fører til ujevn fordeling av tunge partikler i rommet. Antageligvis avsettes en del av de tunge tørrstoffpartiklene i uttaksrørene til kraner. Ved hver prøvetaking ble det tappet ca. 5-8 liter

med substrat for å unngå for stor konsentrasjon av partikler. Samtidig kunne det heller gitt underestimerte data.

Fortynnet grise gjødsel ble brukt i forsøket grunnet mangel av svartvann. Grise gjødsel inneholder en del sagflis, noe som var med på å øke TS%, samtidig er den tungt nedbrytbar i anaerob prosess. Det er uvisst i hvor stor grad denne har bidratt til biogassproduksjon. På denne måten vil målingsdata til konsentrasjon av nedbrytbare organiske stoffer i substratet kunne være misvisende.

Prøvene fra rå substratet og ferdig produsert bioest (suspendert fraksjon) viser reduksjon i TS% på 60 prosent og VS% på 69 prosent som gir ca. 67 prosent utnyttelse av den organiske komponenten (nedbrytingsgrad).

7.2 Reaktorvurdering

Det var beregnet følgende resultater.

Organisk belastning (Biogas World) 1.97 kg/m³, biogassutbytte 0.588 m³/kg VS, virkningsgrad 1.16, spesifikke metanutbytte 0.40 m³/kg VS.

Ut ifra biogassutbytte og spesifikke metanutbytte virker reaktoren til å være effektiv. Likevel hvis man ser på beregnet virkningsgrad, som er på 1.16, er den veldig lav. Tiltak for å øke virkningsgrad kan være å øke OLR, som er i sin tur avhengig av substratkonsentrasjonen (vanninnhold). Hvis man øker TS% i substratet med inntil 5 prosent, (ved forutsetninger at VS% ved dette forblir den samme, reaktorvolum og matingshastighet er uforandret og biogassutbytte er uendret) vil daglig biogassproduksjon øke til 7.33 m³. Flere eksperimentelle forsøk er nødvendig for å verifisere at eventuelt økt organisk belastning ikke medfører driftsproblemer og gir økt metanproduksjon, samt at det ikke påvirker biogass og metan utbytte.

Et mulig problem kan knyttes til lav konsentrasjon av den faste fraksjon i substratsblandingen. Tyntflytende substratet (TS ca. 2%) kan det være utfordrende. Det er påvist at en del av substratet kan passere gjennom reaktoren vesentlig fortere enn den antatte oppholdstid (avsnitt 4.3.2). Dette kan redusere det potensielle biogassutbytte. Her kunne det være fordelaktig å undersøke substratbevegelse med traceere (Linjordet, 2019).

7.2.1 Biogassproduksjon

Kontinuerlige gassmålingene startet 04.04.19. For en periode på 36 dager (04.04.19 – 10.05.19) var det produsert totalt 125.2 m³ biogass. Produksjon var forholdsvis stabil på ca. 3.5 m³ biogass daglig,

med ett unntak av perioden fra den 22.04 til den 29.04, hvor dagsproduksjon sank til ca. 2. m³ daglig. Lavest produksjon var på ca. 1.7m³/dag i perioden fra 22. til 25.05. Dette kan forbindes med en teknisk svikt i systemet, når omrøringshastighet i reaktoren var for lav. Dette kunne føre til at lettflytende fraksjoner fra do-papir kun har konsentrerte seg i den øvre delen av reaktoren og har laget en slags ekransom forhindret biogass fra å forlate substratet. Den 22.04 og 25.04 ble det registrert den høyeste metanprosent på rundt 70 – 71 prosent.

Ut ifra VFA og FOS/TAC analyse ser biogassprosess ut som relativt stabil, men er følsom til ORL og propionsyre konsentrasjon.

7.2.2 Metanutbytte

Prosentandel av metan er 68 prosent, noe som viser et høyt innhold av metan. Beregnet biogassutbytte er på ca. 0.57 m³/kg organisk stoff. Spesifikke metanutbytte for substratet og reaktorer er på 0.4 m³/kg organisk stoff. Spesifikt metanutbytte for komponentene i substratet var for henholdsvis matavfall – 470 m³/t VS; do-papir – 160 m³/t VS; bløt grisegjødsel – 268 m³/t VS. Dette viser en relativt høy metanproduksjon. Ifølge disse dataene ble substratet utnyttet bra i reaktoren med utgangspunktet i organisk belastning på 1.97 kg VS/m³.

7.2.3 Massebalanse

Massebalanse var beregnet på TS og VS basis for prøver fra tre forskjellige beholdere – kammer 5, biorest-tank og separert suspendert fraksjon.

For TS – balanse er beste resultater har gitt beregninger for suspenderte fraksjon med bare 5 prosent feil mellom vekt inn og vekt ut.

Biogassutbytte beregnet på basis av forbrukt VS er betydelig større enn den som beregnet på basis av organisk belastning og gassmålingene. Årsaken til dette er ukjent.

For VS – balanse var det beste resultatet fra kammer 5 med feilen på ca. 35 prosent.

Tilstedeværelse av sagflis i substratet forårsaket problemer for beregning av massebalanse. VS-konsentrasjon i bioresttanken er betydelig større enn i prøvene fra kammer 5 i enden av reaktoren (15.6 g VS/l biorest mot 5.3 g VS/l biorest). Sagflis er med på å påvirke VS% (forbrennes), men er som tidligere beskrevet tungt nedbrytbar og deltar i liten grad i biogassproduksjon. Grunnet hydrauliske forhold i reaktoren er konsentrasjonen av TS i utløp av kammer 5 lavere enn i utløpsrør til lagringstank.

Nedbrytingsgrad som beregnes på basis av VS% har en viss usikkerhet, noe som er vesentlig for vurdering av reaktorens effektivitet.

Som det ble sagt over, skjedde det opphoping av TS i biorest-tank grunnet sagflis. Tilsvarende problem er ikke relevant til de reelle forhold med svartvann i substratet.

Kjemisk oksygenforbruk (COD) var analysert i utvalgte prøver fra reaktoren, biorest-tank og substratbeholder. Massebalanse på COD- reduksjon var beregnet for biorest tank og fra kammer 5.

Beregningene for biorest-tank gir daglig metanproduksjon på 1.03 m³/dag, som er 53.8 prosent mindre enn de registrerte data på 2.22 m³/dag.

Beregninger for kammer 5 ligger nærmere til den observerte metanproduksjon med 3.4 prosent avvik. Beregnet daglig metanproduksjon blir på 2.30 m³/dag, som er litt mer enn gjennomsnittlig (2.22 m³/daglig).

COD- massebalanse bekrefter resultater for VS-massebalanse om at prøvene fra biorest-tank har for høye verdier av organiske stoff og ikke gjenspeiler den reelle VS-forbruk.

7.2.3 Energibalanse

Energibalanse viser at egen energiproduksjon er mindre enn det nødvendige behovet for drift av anlegget. Dette gjelder umiddelbart for det eksperimentelle anlegg, som er bygd opp med fokus på prosess studie. Volumet av reaktoren er liten og overflaten er stor ved termofil prosess energiforbruk for å dekke varmetap er høy.

For å kunne verifisere de teoretiske beregninger var det registrert daglig strømforbruk for drift av reaktor-anlegg. Tallene stemmer bra med hverandre. Beregnet energiforbruk er 88.11 kW og registrert etter strømmåleravlesing 86.56 kW (1.2% avvik).

For å gjøre reaktoren lønnsom kan foreslås følgende.

- Gå over til mesofil prosess. Dette forutsetter forbehandling av substratet (to timer med T 70 °C), (som er også energikrevende, energiforbruk for hygienisering bør undersøkes nærmere)
- Øke reaktorvolum - dette forutsetter øking av avfallsmengde
- Øke konsentrasjon av organiske komponenten i substratet (større TS%).

Eventuelt gå over til batch- prosess med høyere utnyttelse av metanpotensiale og reaktoren med lavere energibehov for drift.

7.3 Substratvurdering

Metanpotensiale i råstoffene i substratet:

Matavfall – 470 m³/T VS (Carlsson & Uldal, februar 2009)

Grisegjødsel – 268 m³/T VS (Carlsson & Uldal, februar 2009)

Do-papir – 160 m³/T VS (restpotensial – studie NIBIO) (Linjordet, 2019).

Ut ifra biogass- og metanutbytte fungerer blanding av matavfall og grisegylle bra med biogassutbytte 0.567 m³/kg og metanutbytte 0.400 m³/kg VS. Om det kan forventes liknende tall for blanding med svartvann trenges flere undersøkelser.

I (Hertel* et al., 2015) har det gitt biogasspotensiale for svart vann på 500 m³/kg. Ved antakelse metanprosent på 65 prosent blir metanpotensiale til svart vann på ca. 0.325 m³/kg. Dette er betydelig høye enn for bløt grisegjødsel. Biogasspotensiale for en blanding av fett vaskevann, svartvann og forbehandlet hageavfall oppgitt for 0.800 m³/kg VS.

Mennesker har mer variert kosthold, som kan påvirke både biogassgassutbytte og selve nedbrytings prosess. Spesielt gjelder dette medisinrester og patogene virus og bakterier. Dette kan være et område for en nærmere undersøkelse.

Mens arbeidet med prosjektet pågikk var det bestemt at det ikke skal brukes hageavfall i substratet. Så vurderingen av hageavfall er ikke aktuell.

7.4 Biorestkvalitet

Svartvann beregnes som avløpsslam av norske myndigheter. I tilfellet når svart vann inngår som en del i substratet for biogassprosess, kan ikke biorest automatisk brukes for gjødsling av matvekster. Det kreves bevis på at det holder kvalitet angående tungmetaller, miljøgifter, patogene bakterier og virus.

Termofil prosess gir sikker behandling av biorest med tanke på patogene bakterier. Dette ble bekreftet med prøveanalyse fra kammer 5 og biorest-tank. Dette resultatet var som forventet. Samtidig etter Litium - test er det klart at oppholdstid i reaktoren for enkelte substratfraksjoner kan være kortere enn 24 timer. Dette er betenkelig med tanke på patogenreduksjon. Substratkonsistens kan ha spilt en rolle (Luděk Kamarád, 2013).

Siden næringsstoff ikke blir forbrukt under biogass produksjon er det å forvente samme mengde fosfor kalium og nitrogen som er i opprinnelig substratet. Det kan være aktuelt å finne ut hvor mye av det

som har gått over til minerasert form, samt hva som er fordelingen mellom fosforet i den faste og den flytende faser.

Angående mulige miljøgifter og forurensinger skiller svartvann seg fra grisegjødsel. Det trenges derfor eksperimentelle forsøk med de originale substratskomponentene.

7.5 Anslagsberegninger

Planlagt antall innbyggere i leilighetskomplekset er som nevnt 130 personer. Ut ifra antall innbyggere er estimert mengde av organisk avfall på ca. 856.7 kg/dag. Dette inkluderer også hagerester. Ut ifra beregninger tilsvarer dette en reaktor med volum på 5 m³.

Forventet metan produksjon 5.69 m³/dag. Spesifikt metanutbytte er 0.42 m³/kg VS, som er ikke langt ifra det som er fått i eksperimentet med grisegjødsel (0.40 m³/kg VS).

Mengde produsert biorest krever spredningsareal på 20 daa.

Mens arbeidet pågikk, ble det som nevnt over bestemt at hageavfall ikke skal benyttes i biogassreaktoren. Dette reduserer avfallsmengde og følgende daglig biogassproduksjon betraktelig. Selv med et energibesparende anlegg kan produsert energi bli for lavt til å dekke driftsbehov og gi et overskudd.

7.6 Konklusjon

Substrat bestående av svartvann og matavfall har høy metanpotensiale og egnet seg godt for energi produksjon. Matavfall bidrar mest for biogassmengde, mens svartvann er en hovedkilde til næringsstoff i biorest.

Ut fra anslaget er tilgjengelig daglig substratsmengde er lav - ca. 6.52 kg/person daglig. Hvor tørrstoff konsentrasjon er på ca. 2 prosent, og den organiske komponenten er på 0.15 kg/person daglig. Estimert metanpotensiale for substratet er 0.445 m³/kg VS (data fra (Hertel* et al., 2015) og (Carlsson & Uldal, februar 2009)).

ANTEC – reaktoren utnytter substratet med liknende TS – konsentrasjon relativt bra (metanutbytte 0.4 m³/kg VS, metanprosent ca. 68 prosent ved eksperimentale forsøk). Samtidig litium - test av NIBIO viste at noen fraksjoner kan passere reaktoren fortere enn beregnet oppholdstid, noe som kan øke faren for overlevelse av patogener og følge til lavere utnyttelse av organisk materiale.

Termofil prosess gir sikker reduksjon av patogene mikroorganismer, men krever høyt energiforbruk for oppvarming. For å redusere varmetap bør reaktor ha god isolasjon. Med noen tekniske inngrep kan anlegget utformes for lavere energiforbruk. Det kan også være aktuelt å gå over til mesofil prosess med en god pasteurisering av substratet i forbehandlings steg.

Ved testing av termofile forhold i reaktoren virket biogass prosessen til å være stabil. Dette bør testes videre med svartvann.

Energiproduksjon med beregnet mengde substrat ser ut til å være liten for å gi et nødvendig overskudd. Virkningsgrad til reaktoren er lav - 1.16. For å øke energiutbytte kan følgende foreslås:

- å øke reaktorens volum og daglig forbruk av substratet,
- å øke substratskonsentrasjon. I tilfellet økt TS% substratet til 5 prosent og anta samme nedbrytingsgrad kan daglig gassproduksjon økes til 5.17 m³/dag

Ut ifra eksperimentelle forsøk kan det tenkes at i tilfellet ANTEC – reaktoren skal brukes i Fredrikstad, må anlegget konstrueres med minst mulig energiforbruk, og dette kan oppnås ved tekniske inngrep.

Siden det i forsøket ble brukt grisegjødsel, er det vanskelig å vurdere om biorest med svartvann i substratet vil egne seg som gjødsel for spiselige vekster grunnet mer variert kosthold hos mennesker. Det vil være nødvendig å gjennomføre forsøk med svartvann.

Litteratur

- Aarnes, H. & Kierul, P. (2018). *Urin*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://sml.snl.no/urin> (lest 23.02.2019).
- Aas, T. O. (2019). E-post fra Tor Olav Aas, Fagrådgiver/spesialinspektør, Mattilsynet, Region Stor-Oslo, Avd. Østfold og Follo (01.03.2019).
- Andersen, U. (2019). *Intervju og skriftelig materiale fra Uno Andersen, NIBIO* (april - mai 2019).
- Antec Biogas AS. (2015-2018). *ANTEC Biogas*. Internet. Tilgjengelig fra: <https://www.antecebiogas.com/omrader> (lest 12.06.2019).
- Bachmann & S.A, N. E. (2013). *Design and Engineering of Biogas Plants*.
- Biogas World. (2019). *Monitoring FOS/TAC*. Tilgjengelig fra: <https://www.biogasworld.com/biogas-plant-monitoring/> (lest 12.06.2019).
- Biogass Østfold. (2015). *Om biogass*. Tilgjengelig fra: http://www.biogassostfold.org/?page_id=177 (lest 20.01.2018).
- Boe, K. (2006). *Online monitoring and controll of the biogas prosess*.
- Britannica. (2002). *Feces*. Tilgjengelig fra: <https://www.britannica.com/science/feces> (lest 23.02.2019).
- Carlsson, M. & Uldal, M. (februar 2009). *Substrathandbok för biogasproduktion. Svenskt Gastekniskt Center – Februari 2009*.
- Energi- og Miljøkomiteen. (15. februar 2018). *Innstilling til Stortinget fra energi- og miljøkomiteen: Energi- og miljøkomiteen*. Tilgjengelig fra: <https://www.stortinget.no/globalassets/pdf/innstillinger/stortinget/2017-2018/inns-201718-127s.pdf> (lest 12.06.2019).
- Enevoldsen, K. (2018). *Anaerob behandling av avløpsslam ved Søndre Follo Renseanlegg – Forsøk med biofilm plug-flow reaktor pilotanlegg til Antec Biogas AS: Norges Miljø- og Biovitenskapelig Universitetet*.
- Engan, Ø. (2013). Dette produserer kropeen din i løpet av et år. *Afrenposten*. Tilgjengelig fra: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/MKznm/dette-produserer-kroppen-din-i-loepet-av-ett-aar>.
- European Commission. (2017). *Sino-European innovative green and smart cities*. CORDIS. Tilgjengelig fra: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/212412/factsheet/en> (lest 10.06.19).
- Forskrift. (2008). *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951> (lest 25.02.2019).
- Fossum, S. & Høyland, K. (2019). *Arker. I: Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/arker> (lest 14.06.2019).

- Hertel*, S., Navarro, P., Deegener, S. & Körner, I. (2015). Biogas and nutrients from blackwater, lawn cuttings and grease trap residues—experiments for Hamburg’s Jenfelder Au district *Energy, Sustainability and Society*. doi: 10.1186/s13705-015-0057-5.
- Labatut, R. A. & Gooch, C. A. *Monitoring of anaerobic digestion process to optimize performance and prevent system failure*: Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY. Tilgjengelig fra: <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/36531/21.Rodrigo.Labatut.pdf?sequence=1> (lest 28.05.2019).
- Lilleby, O. B. & Morken, J. (2017). *Vurdering av produksjonsanlegg for biogass ved Orklas virksomheter i Rygge med fokus på valg av reaktorteknologi samt avfallets karakteristikk og metanpotensial*. Evaluation of biogas production facilities at Orkla's operations in Rygge with focus on choice of reactor technology as well as the characteristics of the waste and methane potential: Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Linjordet, R. (2019). *Intervju, tilsendte skriftelige materialer og e-poster* (januar - juni 2019).
- Lovdata. (2019). *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951> (lest 03.06.2019).
- Luděk Kamarád, S. P., Günther Bochmann, Michael Harasek. (2013). Determination of mixing quality in biogas plant digesters using tracer tests and computational fluid dynamics. *ACTA UNIVERSITATIS AGRICULTURAE ET SILVICULTURAE MENDELIANAE BRUNENSI*.
- Løwe, K. (2018). *NMBU-ledet prosjekt om urbant landbruk har fått innvilget finansiering fra det prestisjefylte EU-programmet Horisont 2020*. Tilgjengelig fra: <https://www.nmbu.no/aktuelt/node/32777> (lest 12.06.2019).
- Mattilsynet. (2007). *Veileder til biproduktforordningen*. Veilder fra Mattilsynet. Tilgjengelig fra: <http://hrs.no/wp-content/uploads/2012/11/Veileder-Biproduktforordning-Mattilsynet.pdf> (lest 25.02.2019).
- Mattilsynet. (2013). *Bioest og kompost skal oppfylle mikrobielle krav fastsatt i Animaliebiproduktforskriften*. internett. Tilgjengelig fra: https://www.mattilsynet.no/fisk_og_akvakultur/animalske_biprodukter/bioest_og_kompost_skal_oppfylle_mikrobelle_kvav_fastsatt_i_animaliebipoduktsforskriften.7340 (lest 24.02.2019).
- Mattilsynet. (2019). *Veiledning til forskrift 4. juli 2003 nr. 951 om gjødselvarer mv. av organisk opphav*. Tilgjengelig fra: https://www.mattilsynet.no/om_mattilsynet/gjeldende_regelverk/veiledere/veileder_til_forskrift_om_gjodselvarer_mv_av_organisk_opphav.5967/binary/Veileder%20til%20forskrift%20om%20gjodselvarer%20mv%20av%20organisk%20opphav (lest 25.02.2019).

- Meteorologisk institut, N. (2019). *Yr. Ås (NMBU) målestasjon (17850)*. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/sted/Norge/Akershus/Ski/Ski/statistikk.html> (lest 31.05.2019).
- Morken, J. (12.10.2017). Beregningsgrunnlag for biogassanlegg.
- Morken, J., Briseid, T., Hovland, J., Lyng, K.-A. & Kvande, I. (2017). *Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift* 1503-9196: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet: Fakultet for realfag og teknologi, Seksjon bygg og miljøteknologi.
- Rennuit, C. & Sommer, S. G. (2013). Decision Support for the Construction of Farm-Scale Biogas Digesters in Developing Countries with Cold Seasons *Energies*, 2013, 6. doi: 10.3390/en6105314.
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B. & Cartmell, E. (2015). The characterisation of faeces and urine; a review of the literature to inform advanced treatment technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45 (17): 00-00. doi: 10.1080/10643389.2014.1000761.
- Serikstad, G. L. (2015). *Bruk av råtnerest i økologisk landbruk. 1. Aktuelle ingredienser til biogass produksjon.* Rapport fra Bioforsk. Tilgjengelig fra: https://www.mattilsynet.no/planter_og_dyrking/okologisk/landbruk/bioforsk_rapport_biorest_nr_7_2015.18386/binary/BIOFORSK%20RAPPORT%20%20Biorest%20nr%207%202015 (lest 25.02.2019).
- Statistisksentralbyrå. (2018). *Hushalds avfall fordel på materiale. 1000 tonn*. Tilgjengelig fra: <https://www.nmbu.no/om/biblioteket/skrive/referansestiler/eksempler-nmbu-stil> (lest 23.01.2019).
- TA. (2007, 28. februar). Nordmenn bruker 9,3 kilo dopapir. *Telemark Avis*. Tilgjengelig fra: <https://www.ta.no/grenland/nordmenn-bruker-9-3-kilo-dopapir/s/1-111-2614077> (lest 23.01.2019).
- Tasherzadeh, M. J. & Richards, T. (2016). *Resource recovery to approach zero municipal waste*. Green chemistry and chemical engineering. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Tervahauta, T. (2014). *Phosphate and organic fertilizer recovery from black water*: Wageningen University.
- UOSA. *FOS/TAC. Introduction of new digester metrics*. Tilgjengelig fra: https://cdn.ymaws.com/www.vwea.org/resource/resmgr/Conference_Proceedings/2016/LPC/16_FOS-TAC.pdf (lest 20.05.2019).
- Veeken, A. & Hamelers, B. (1998, november). *Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components*. *Bioresource Technology* 69 (1999) 249-254: *Bioresource Technology* Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852498001886> (lest 12.06.2019).

Wendland, C. (January 2009). Anaerobic digestion of blackwater and kitchen refuse. doi: 10.15480/882.478 · Source: OAI.

Ødegård, H. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. 2 utg.

Водограй. (2013). *Сколько кала мы производим и куда его девать?:* Водограй. Tilgjengelig fra: <https://www.vodograi.org/library/article/40-septic/170-volume> (lest 23.02.2019).

Vedlegg 1. Målingsdata

28.03.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med gløderester	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.0661	77.1801	4.8647	4.4103	7.76	1.09	56.90
	1/2	4.0821	75.5230	4.8625	4.4172		1.09	57.06
middel							1.09	56.98
kammer2	2/1	4.0264	90.9731	4.8927	4.3818	7.75	1.00	58.97
	2/2	4.0763	93.46	4.9661	4.4409		1.00	59.02
middel							1.00	59.00
kammer3	3/1	4.0556	96.397	5.129	4.5012	7.81	1.16	58.49
	3/2	4.0311	98.562	5.1301	4.4835		1.16	58.84
midl							1.16	58.66
kammer4	4/1	4.0642	109.7326	5.1329	4.5212	7.82	1.01	57.24
	4/2	4.1003	108.4624	5.1506	4.5483		1.01	57.35
middel							1.01	57.29
kammer5	5/1	4.0499	98.5412	5.0479	4.4599	7.84	1.06	58.92
	5/2	4.0536	87.5039	4.9378	4.4146		1.06	59.17
middel							1.06	59.04

28.03.2019

kl. 12:30

T reaktor **54.4**

Fyllingsgrad 78.60 %

Buffertank1 91 %

Buffertank2 14 %

01.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.1175	79.1602	5.7109	4.5272		2.12	74.29
	1/2	4.0792	83.5422	5.3915	4.4508	7.81	1.65	71.68
	1/3	4.0654	76.1240	5.5367	4.4811		2.04	71.75
middelverdi							1.94	72.57
Kammer2	2/1	4.0704	84.0710	5.3661	4.4626		1.62	69.73
	2/2	4.0820	100.5340	5.7201	4.5617	7.78	1.70	70.72
	2/3	4.0751	90.5630	5.6515	4.5128		1.82	72.23
middelverdi							1.71	70.89
Kammer3	3/1	4.0658	75.1988	5.0205	4.3960		1.34	65.41
	3/2	4.0942	89.0346	5.2366	4.4888	7.83	1.34	65.46
	3/3	4.0724	101.4598	5.3215	4.5169		1.28	64.41
middelverdi							1.32	65.10
Kammer4	4/1	4.0473	93.5570	4.8862	4.4002		0.94	57.93
	4/2	4.0199	101.8110	4.9267	4.4027	7.88	0.93	57.79
	4/3	4.0765	102.1588	4.9932	4.4626		0.93	57.88
middelverdi							0.93	57.87
Kammer5	5/1	4.0447	83.5501	5.1672	4.4512		1.41	63.79
	5/2	4.0795	100.2480	5.4370	4.5710	7.87	1.41	63.79
	5/3	4.1006	86.3490	5.2539	4.5189		1.40	63.73
middelverdi							1.41	63.77

01.04.2019 Kl. 14

T

miksertank 59.7 °C

fyllingsgrad

miksertank 29 %

T reaktor 54.6 °C

fyllingsgrad

reaktor 79,3%

Det ble tatt prøver fra matavfall, grisegylle og landing, som kommer i
blandingstanken uten do-papir
dato 01.04.19

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med gløderest	pH	TS%	VS% av TS
Matavfall	1	1.7571	24.1520	5.8807	2.1468		18.41	90.55
	2	1.7396	31.0626	6.7909	2.2552		17.23	89.79
	3	1.7338	24.0828	5.6095	2.1595		17.34	89.02
middelverdi							17.66	89.79
Grisegylle	1	4.0769	93.3442	4.8567	4.2629		0.87	76.15
	2	4.0472	83.8369	4.7672	4.2140		0.90	76.83
	3	4.0715	89.0882	4.8680	4.2530		0.94	77.21
middelverdi							0.90	76.73
mix1	1	4.0759	87.9190	5.2892	4.2724		1.45	83.80
	2	4.0958	76.6279	5.1545	4.2649		1.46	84.03
	3	4.0903	74.3170	5.1446	4.2548		1.50	84.40
middelverdi							1.47	84.08
mix2	1	4.0869	90.4306	5.3627	4.2905		1.48	84.04
	2	4.0905	111.8796	5.7429	4.3451		1.53	84.59
	3	4.0773	94.9094	5.4036	4.2920		1.46	83.81
middelverdi							1.49	84.15
middelverdi på begge prøvene							1.48	84.11

04.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS	Gjennom snitt avvik, %
Kammer 1	1/1	4.0707	96.6674	5.1794	4.4461		1.20	66.14	
	1/2	4.0616	87.9361	5.1700	4.3950		1.32	69.92	
	1/3	4.0502	75.2320	4.8785	4.3317		1.16	66.01	
middel						7.75	1.23	67.36	1.71
Kammer2	2/1	4.0709	97.6714	5.8216	4.4989		1.87	75.55	
	2/2	4.0650	98.7630	5.7795	4.4949		1.81	74.93	
	2/3	4.1000	81.2590	5.4636	4.4461		1.77	74.62	
middel						7.74	1.82	75.03	0.35
Kammer3	3/1	4.0400	92.1846	5.1430	4.3935		1.25	67.95	
	3/2	4.0588	90.9870	5.0430	4.4011		1.13	65.22	
	3/3	4.0975	93.3061	5.2022	4.4578		1.24	67.38	
middel						7.81	1.21	66.85	1.09
Kammer4	4/1	4.0838	95.6550	5.5111	4.5153		1.56	69.77	
	4/2	4.0725	93.4660	5.4044	4.4913		1.49	68.56	
	4/3	4.0515	87.9682	5.2269	4.4360		1.40	67.29	
middel						7.81	1.48	68.54	0.83
Kammer5	5/1	4.0225	108.5364	4.8969	4.3885		0.84	58.14	
	5/2	4.0635	97.4060	4.8459	4.3897		0.84	58.31	
	5/3	4.0621	83.0502	4.7174	4.3402		0.83	57.56	
middel						7.84	0.83	58.00	0.30
Rå									
substrat	1	4.0331	125.0880	6.3167	4.3289		1.89	87.05	
	2	4.0346	97.6478	5.8280	4.2629		1.92	87.27	
	3	4.0800	101.2764	5.9461	4.3184		1.92	87.22	
middel							1.91	87.18	0.09

Det ble tatt
1. 3 prøver fra substrat
- 3 flasker
Analysert 1 prøve fra
hver flaske
2. 1 prøve fra hver kammer i
reaktoren - 5 flasker
analysert 3 prøver fra
hver flaske

04.04.2019 kl. 11:00 - 11:30

T
miksertank 54.2 °C
fyllingsgrad 71 %

T	
reaktortank	54.2 °C
yllingsgrad	76.80 %
Buffertank	
1	55 %
Buffertank	
2	41 %

08.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4,0495	94,1427	5,2316	4,3845		1,31	71,66
	1/2	4,0525	97,1373	5,3380	4,4111		1,38	72,11
	1/3	4,0558	101,2467	5,4196	4,4339		1,40	72,28
middl						7,65	1,37	72,01
Kammer2	2/1	4,0662	87,5904	5,1655	4,3775		1,32	71,68
	2/2	4,0673	76,0606	5,1849	4,3444		1,55	75,21
	2/3	4,0685	88,0320	5,4398	4,3963		1,63	76,10
middl						7,73	1,50	74,33
Kammer3	3/1	4,0347	81,8840	4,9716	4,3138		1,20	70,21
	3/2	4,0182	90,5353	5,0230	4,3623		1,16	65,75
	3/3	4,0466	92,2425	5,1080	4,3623		1,20	70,26
middl						7,78	1,19	68,74
Kammer4	4/1	4,0371	92,9580	5,1167	4,3685		1,21	69,30
	4/2	4,0429	82,0020	5,0282			1,26	0,00
	4/3	4,0597	83,2590	5,0647	4,3542		1,27	70,70
middl						7,81	1,25	70,00
Kammer5	5/1	4,0337	95,3029	4,8739	4,3320		0,92	64,50
	5/2	4,0643	93,4010	4,8906	4,3501		0,92	65,41
	5/3	4,0449	89,7626	4,8455	4,3279		0,93	64,65
middl						7,87	0,93	64,85

Gassmåler:

04.04.2019 59,176 M3 kl.11:30

08.04.2019 72,687 M3 kl.14

produksjon **13,511** M3

1. måling normalisert

CH4 70,360 % 68,97 %

CO2 31,654 % 31,03 %

2. måling (sjekk

11.04.19) normalisert

CH4 71,882 % 68,99 %

CO2 32,308 % 31,01 %

Fylingsgrad 77,6 %

11.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.0623	82.3346	4.8821	4.3109		1.05	69.68
	1/2	4.0812	90.1267	4.9730	4.3550		1.04	69.30
	1/3	4.0836	80.3581	4.8926	4.3278		1.06	69.81
middel						7.75	1.05	69.60
Kammer2	2/1	4.0585	82.9164	5.2582	4.3442		1.52	76.19
	2/2	4.0826	81.3794	5.3186	4.3674		1.60	76.96
	2/3	4.0709	87.5851	5.4014	4.3789		1.59	76.85
middel						7.74	1.57	76.66
Kammer3	3/1	4.0258	84.5234	4.9149	4.2887		1.10	70.43
	3/2	4.0841	76.5578	4.9189	4.3187		1.15	71.90
	3/3	4.0560	93.8753	5.1857	4.3578		1.26	73.28
middel						7.81	1.17	71.87
Kammer4	4/1	4.0227	85.5305	4.9278	4.2908		1.11	70.38
	4/2	4.0232	78.1984	4.9629	4.2747		1.27	73.24
	4/3	4.0580	90.0478	5.0815	4.3482		1.19	71.65
middel						7.81	1.19	71.75
Kammer5	5/1	4.0912	71.8328	4.6757	4.2965		0.86	64.88
	5/2	4.0252	103.6575	4.8976	4.3289		0.88	65.19
	5/3	4.0169	99.7545	4.8527	4.3146		0.87	64.38
middel						7.84	0.87	64.82

Gassmåler

11.04.2019	83.115 m ³	kl.15
08.04.2019	72.687 m ³	kl.14
produksjon	10.428 m ³	
T reaktor	55.6 °C	
Fyllingsgrad	77.5 %	

Det ble tatt 1 flaske fra hver kammer i
reaktoren- 5 flasker

Analysert 3 prøve fra hver flaske

1. måling	normalisert	
CH ₄	68.32 %	67.66 %
CO ₂	32.66 %	32.34 %
2. måling	normalisert	
CH ₄	67.72 %	67.42 %
CO ₂	32.73 %	32.58 %

15.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.1891	95.5273	6.9440	4.6152		3.02	84.53
	1/2	4.1600	97.7735	7.0721	4.6045		3.11	84.74
	1/3	4.0467	78.0474	6.5091	4.4059		3.33	85.41
middel						7.49	3.15	84.89
Kammer2	2/1	4.1798	76.1493	5.7576	4.4750		2.19	81.29
	2/2	4.1302	83.7941	6.1256	4.4755		2.50	82.70
	2/3	4.1640	89.3165	6.3039	4.5347		2.51	82.68
middel						7.61	2.40	82.22
Kammer3	3/1	4.1812	100.7681	5.7252	4.5461		1.60	76.37
	3/2	4.1918	97.3410	5.6780	4.5445		1.60	76.27
	3/3	4.1706	97.0101	5.7324	4.5258		1.68	77.26
middel						7.71	1.63	76.63
Kammer4	4/1	4.1626	87.3873	5.3228	4.4585		1.39	74.50
	4/2	4.1492	92.6144	5.3867	4.4644		1.40	74.53
	4/3	4.1593	88.3224	5.4142			1.49	
middel						7.79	1.43	74.51
Kammer5	5/1	4.1610	84.7679	5.5509	4.4769		1.72	77.27
	5/2	4.1457	87.2206	5.5899	4.4696		1.74	77.57
	5/3	4.1486	73.7931	5.3527	4.4189		1.73	77.55
middel						7.84	1.73	77.47
Rå substrat	1	4.1741	92.9704	6.0888	4.4348	5.49	2.16	86.38
	2	4.1632	97.8384	6.2931	4.4500	5.49	2.27	86.53
	3	4.1373	92.3453	6.0711	4.4002	5.48	2.19	86.41
middel						5.49	2.21	86.44

Gassmåler

15.04.2019	100.632 m ³	kl.10
11.04.2019	83.115 m ³	kl.15
produksjon	17.517 m³	
T reaktor	56.2 °C	
Fyllingsgrad	77.1 %	

1. måling normalisert

CH ₄	67.95 %	66.17 %
CO ₂	34.75 %	33.84 %

2. måling normalisert

CH ₄	68.09 %	65.90 %
CO ₂	35.23 %	34.10 %

Med do-papir i substratet

Det ble tatt

1. 3 prøver fra substrattanken - 3 flasker

Analysert 1 prøve fra hver flaske
2. 1 Flaske fra hver kammer i reaktoren

Analysert 3 prøver fra hver flaske

18.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.1961	79.9010	5.8704	4.5024		2.21	81.71
	1/2	4.1584	90.0210	6.2037	4.5141		2.38	82.61
	1/3	4.1501	95.8886	6.2082	4.5249		2.24	81.79
middel						7.65	2.28	82.03
Kammer2	2/1	4.1477	68.7353	5.1150	4.3708		1.50	67.55
	2/2	4.1675	89.0910	5.4516	4.4616		1.51	77.10
	2/3	4.1282	87.9384	5.5004	4.4230		1.64	78.52
middel						7.73	1.55	74.39
Kammer3	3/1	4.1994	78.6821	5.3360	4.4643		1.53	76.69
	3/2	4.1554	90.2058	5.4838	4.4641		1.54	76.76
	3/3	4.1486	88.1077	5.6241	4.4606		1.76	78.85
middel						7.73	1.61	77.44
Kammer4	4/1	4.1230	91.6143	5.4061	4.4363		1.47	75.58
	4/2	4.1338	94.0772	5.4612	4.4555		1.48	75.76
	4/3	4.1192	101.9647	5.6236	4.4747		1.54	76.37
middel						7.77	1.49	75.91
Kammer5	5/1	4.1281	90.2980	4.8719	4.3782		0.86	66.38
	5/2	4.1272	94.3232	4.9042	4.3874		0.86	66.51
	5/3	4.2138	88.2174	4.9363	4.4559		0.86	66.49
middel						7.84	0.86	66.46

Substrat	tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS	
Ro 1/1	4.1424	97.6366	5.9483	4.3935		1.93	86.10	
Ro 1/2	4.1345	93.1755	5.8084	4.3731		1.88	85.75	
middel						1.91	85.92	
Ro 2/1	4.1507	91.1814	5.7953	4.3867		1.89	85.65	
Ro 2/2	4.1635	105.8964	6.153	4.4417		1.96	86.02	
middel						1.92	85.83	
Ro 3/1	4.1529	89.224	5.7708	4.3832		1.90	85.77	
Ro 3/2	4.1803	93.4486	5.9036	4.4227		1.93	85.93	
middel						1.92	85.85	
midl for Ro						5.61	1.91	85.87
Rn 1/1	4.1235	103.1432	6.0066	4.3906		1.90	85.82	
Rn 1/2	4.1614	97.6599	5.9243	4.4140		1.89	85.67	
midl						1.89	85.74	
Rn 2/1	4.1381	101.2487	5.9717	4.3995		1.89	85.74	
Rn 2/2	4.1237	93.6446	5.7892	4.3635		1.86	85.60	
midl						1.87	85.67	
Rn 3/1	4.1378	93.8775	5.8103	4.3797		1.86	85.54	
Rn 3/2	4.1640	102.0617	5.9768	4.4280		1.85	85.44	
middel						1.86	85.49	
midl for Rn						5.59	1.88	85.63
midl for rå substrat						1.90	85.75	

Gassmåler

18.04.2019 113.829 m³ kl.1515.04.2019 100.632 m³ kl.10produksjon **13.197** m³

T reaktor 55.1 °C

Fyllingsgrad 75.4 %

Det ble

tatt:

1. 3 prøver fra substrattanken oppe og 3 nede - 6 flasker

Analysert 2 prøver fra hver flaske

2. 1 flaske fra hver kammer i reaktoren

Analysert 3 prøver fra hver

flaske

1. måling normalisert

CH₄ 68.02 % 67.64 %CO₂ 32.54 % 32.36 %

2. måling normalisert

CH₄ 67.93 % 67.46 %CO₂ 32.77 % 32.54 %

22.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.1679	90.8151	5.3645	4.4468		1.38	76.69
	1/2	4.1905	92.0223	5.4189	4.4753		1.40	76.82
	1/3	4.1523	91.6011	5.4028	4.4405		1.43	76.95
middel						7.92	1.40	76.82
Kammer2	2/1	4.0498	98.7800	4.7499			0.74	
	2/2	4.0747	92.3535	4.7373	4.3058		0.75	65.12
	2/3	4.1319	96.8574	4.8865	4.3804		0.81	67.07
middel						8.04	0.77	66.10
Kammer3	3/1	4.0891	79.9610	5.0715	4.3304		1.29	75.44
	3/2	4.0420	105.4791	5.3097	4.3636		1.25	74.63
	3/3	4.0354	79.3856	4.9943	4.2750		1.27	75.01
middel						7.97	1.27	75.03
Kammer4	4/1	4.0286	87.5150	4.8429	4.2698		0.98	70.38
	4/2	4.0378	87.0234	4.8000	4.2732		0.92	69.12
	4/3	4.0263	92.0164	5.0182	4.2885		1.13	73.57
middel						8.01	1.01	71.02
Kammer5	5/1	4.0235	93.5520	4.5180	4.2374		0.55	56.74
	5/2	4.0894	104.6375	4.6478	4.3295		0.56	57.00
	5/3	4.0796	97.8660	4.6015	4.3044		0.56	56.93
middel						8.03	0.55	56.89

Gassmåler				Det ble tatt standart analyse - 1 flaske fra hver kammer
22.04.2019	125.312	m ³	kl.11	Analysert 3 prøve fra hver flaske
18.04.2019	113.829	m ³	kl.15	
produksjon	11.483	m ³		
T reaktor	56.8	°C		
Fyllingsgrad	76.7	%		

1. måling		normalisert
CH ₄	72.96 %	70.70 %
CO ₂	30.24 %	29.30 %
2. måling		normalisert
CH ₄	73.15 %	70.58 %
CO ₂	30.49 %	29.42 %

25.04.2019

Der ble gjort 3 prøvetaking fra hver kammer for å bestemme feilmargin. Veid 1 prøve fra hvert forsøk.

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	avvik
Kammer 1	1/1	4.0446	93.8870	6.6781	4.4511	7.87	
	1/2	4.0183	94.1930	5.3205	4.3068	7.98	
	1/3	4.0504	86.4300	4.8633	4.2784	7.88	
middel						7.91	0.05
Kammer2	2/1	4.0091	95.2605	5.5133	4.3295	7.92	
	2/2	4.0190	100.7113	5.1746	4.3108	7.91	
	2/3	4.0444	96.4243	4.9124	4.2980	7.88	
middel						7.90	0.02
Kammer3	3/1	4.0495	95.1150	5.1196	4.3291	7.87	
	3/2	4.0400	95.1568	5.0156	4.3079	7.92	
	3/3	4.0099	91.2220	4.8626	4.2590	7.81	
middel						7.87	0.04
Kammer4	4/1	4.0153	109.8310	5.5587	4.3688	7.89	
	4/2	4.0409	94.8472	4.8749	4.2899	7.89	
	4/3	4.0318	113.2985	4.7298	4.2952	7.86	
middel						7.88	0.01
Kammer5	5/1	4.0606	110.1663	4.5953	4.3022	7.91	
	5/2	3.9917	103.3874	4.4877	4.2176	7.96	
	5/3	4.0415	92.9110	4.5146	4.2448	7.99	
middel						7.95	0.03

		TS%	avvik TS	VS% av TS	avvik VS
Kammer 1	1/1	2.93		84.56	
	1/2	1.44		77.85	
	1/3	0.99	56.88 %	71.95	8.08 %
middel		1.79	1.02	78.12	6.31
Kammer2	2/1	1.65		78.70	
	2/2	1.20		74.75	
	2/3	0.94	28.47 %	70.78	5.30 %
middel		1.26	0.36	74.74	3.96
Kammer3	3/1	1.18		73.87	
	3/2	1.07		72.54	
	3/3	0.98	9.19 %	70.79	2.14 %
middel		1.07	0.10	72.40	1.55
Kammer4	4/1	1.46		77.10	
	4/2	0.92		70.14	
	4/3	0.64	41.45 %	62.26	10.63 %
middel		1.01	0.42	69.83	7.42
Kammer5	5/1	0.50		54.82	
	5/2	0.50		54.46	
	5/3	0.53	3.52 %	57.03	2.51 %
middel		0.51	0.02	55.43	1.39
gjennomsnittlig relativ standardavvik, %			23.25 %		4.77 %

Gassmåler

25.04.2019	130.367 m ³	kl.11
22.04.2019	125.312 m ³	kl.11
produksjon	5.055 m ³	
T reaktor	55.8 °C	
Fyllingsgrad	77.0 %	

1. måling normalisert

CH ₄	70.61 %	71.02 %
CO ₂	28.81 %	28.98 %

2. måling normalisert

CH ₄	70.59 %	70.89 %
CO ₂	28.99 %	29.11 %

Det ble tatt 3 forsøk fra hver kammer i reaktoren -
3 flasker fra hver kammer
Analysert 1 prøve fra hver flaske

29.04.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Kammer 1	1/1	4.0384	85.7610	4.6278	4.2259		0.72	68.19
	1/2	4.0617	89.7550	4.6701	4.2577		0.71	67.78
	1/3	3.9976	91.9610	4.6497	4.2011		0.74	68.79
middel						7.76	0.72	68.26
Kammer2	2/1	4.0096	93.7020	4.7364	4.2269		0.81	61.72
	2/2	4.0895	82.9110	4.7930	4.2878		0.89	71.81
	2/3	4.0234	91.6450	4.7391	4.2381		0.82	70.00
middel						7.84	0.84	67.85
Kammer3	3/1	4.0202	88.6230	4.6129	4.2180		0.70	66.63
	3/2	4.0135	86.7640	4.5876	4.2081		0.69	66.10
	3/3	4.0506	83.9900	4.6343	4.2400		0.73	67.55
middel						7.83	0.71	66.76
Kammer4	4/1	4.0314	90.2240	4.5453	4.2218		0.60	62.95
	4/2	4.0760	97.1239	4.6246	4.2811		0.59	62.61
	4/3	4.0220	108.4840	4.6589	4.2565		0.61	63.18
middel						7.93	0.60	62.91
Kammer5	5/1	4.0157	92.5660	4.5333	4.2107		0.58	62.33
	5/2	4.0110	86.6180	4.4921	4.1910		0.58	62.59
	5/3	4.0285	97.1360	4.5727	4.2333		0.58	62.37
middel						7.95	0.58	62.43

Substrat:

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS	
Tank 1	1/1	4.0180	89.9140	6.9038	4.4128		3.36	86.32	
	1/2	4.0403	95.8323	7.1101	4.4643		3.34	86.19	
	1/3	4.0356	92.2375	6.9195	4.4350		3.27	86.15	
middel							5.61	3.32	86.22
Tank 2	2/1	4.0733	90.1260	6.6712	4.4596		3.02	84.81	
	2/2	4.0548	95.1050	6.9475	4.4680		3.18	85.72	
	2/3	4.0267	108.4300	7.3854	4.5056		3.22	85.74	
middel							5.58	3.14	85.42
Tank 3	3/1	4.0148	94.0242	6.6425	4.4144		2.92	84.79	
	3/2	4.0146	100.1460	6.8483	4.4435		2.95	84.86	
	3/3	4.0290	108.2929	7.1062	4.4929		2.95	84.92	
middel							5.62	2.94	84.86
middelverdi substrat								3.13	85.50

Gassmåler

29.04.2019	139.236 m ³	kl.11	Det ble tatt
25.04.2019	130.367 m ³	kl.11:30	1. 3 prøver fra substrat - 1 flaske fra hver tank
produksjon	8.869 m ³		2. 1 Flaske fra hver kammer i reaktoren
T reaktor	57.4 °C		Analysert 3 prøver fra hver flaske
Fyllingsgrad	76.1 %		

1. måling	normalisert	
CH ₄	66.67 %	67.29 %
CO ₂	32.41 %	32.71 %
2. måling	normalisert	
CH ₄	66.57 %	67.11 %
CO ₂	32.62 %	32.89 %
02.05.2019		

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
substrat	1	4.0741	93.3140	7.2085	4.5003		3.51	86.40
	2	4.0984	102.7018	7.5400	4.5662		3.49	86.41
	3	4.0748	114.6306	7.5973	4.5893		3.19	85.39
middel							3.40	86.07
biorest	1	4.0614	90.9500	5.1236	4.3322		1.22	71.35
	2	4.0688	99.8825	5.2300	4.3657		1.21	74.43
	3	4.0807	112.1370	5.4183	4.4185		1.24	74.75
middel							1.22	73.51
kammer 5	1	4.0147	98.7103	4.7002	4.2480		0.72	65.97
	2	4.0662	109.6190	4.7822	4.3183		0.68	64.79
	3	4.0383	105.3479	4.7446	4.2825		0.70	65.43
middel							0.70	65.39

Gassmåler

02.05.2019 148.687 m³ kl.1429.04.2019 139.236 m³ kl.11produksjon 9.451 m³

T reaktor 56.4 °C

Fyllingsgrad 66.7 %

1. måling normalisert

CH₄ 66.19 % 66.10 %CO₂ 33.95 % 33.91 %

2. måling normalisert

CH₄ 66.63 % 65.72 %CO₂ 34.75 % 34.28 %

Det ble tatt på 3 prøver fra

1. substrattanken

(omrørt)

2. Biorest-tanken (omrørt)

3. Kammer 5 fra

reaktoren

Analysert 1 prøve fra hver flaske

06.05.2019

	tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	VS% av TS
Grisegylle	4.0601	110.6184	9.0450	4.5922	6.21	4.68	89.33
Biorest	4.0464	109.2411	6.1785	4.5374	7.76	2.03	76.97
Biorest S	4.0563	79.4330	5.5079	4.3939	7.68	1.93	76.74
Kammer 5	4.0547	110.6650	5.2074	4.3724	7.78	1.08	49.16
Substrat	4.0652	123.2923	8.2789	4.6407	5.52	3.53	86.34

Gassmåler

06.05.2019	168.294 m ³	kl.12	
02.05.2019	148.687 m ³	kl.14	Det ble tatt prøver fra
produksjon	19.607 m ³		1. substrattanken (omrørt) - 1 flaske + prøve for bakteriologisk analyse
T reaktor	56.4 °C		2. Biorest-tanken (omrørt) - 2 flasker (biorest og biorest S) + prøve for bakterie
Fyllingsgrad	66.7 %		3. Kammer 5 fra reaktoren - 1 flaske + prøve for bakterier
			4. Grisegylle - 1 flaske + prøve for bakterieanalyse
			Analysert 1 prøve fra hver flaske
1. måling		normalisert	
CH ₄	68.01 %	67.16 %	
CO ₂	33.26 %	32.84 %	
2. måling		normalisert	
CH ₄	68.16 %	66.77 %	
	333.92		
CO ₂	%	33.23 %	

08.05.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	Avvik TS%	VS% av TS	Avvik VS%
kammer 5	1	2.9744	96.7239	3.5576	3.1958		0.62		57.42	
	2	3.0055	95.1386	3.5810	3.2227		0.62		62.26	
	3	3.0628	85.9993	3.5786	3.2566		0.62	0.24	62.43	4.68
middel						8.07	0.62	0.00	60.70	2.84
Biorest	1	3.0098	101.3523	5.0010	3.4033		2.02		80.24	
	2	3.1092	92.0087	4.9059	3.4631		2.02		80.30	
	3	3.0324	90.7239	4.8252	3.3839		2.04	0.62	80.39	0.10
middel						7.83	2.03	0.01	80.31	0.08

Prøver

tatt:

Biorest tank - 1

flaske

Kammer 5 - 1

flaske

Analysert 3 prøver fra hver

flaske

Ikke tatt gassprøve, Ikke lest av
gassmåler

10.05.2019

		tom skål	med våt prøve	med tørr prøve	med brent rest	pH	TS%	Avvik VS%	VS% av TS	Avvik VS%
Biorest-tank	1	4.0614	101.7064	5.8494	4.4558		1.83		78.82	
	2	4.0469	100.6810	5.8161	4.4401		1.83		77.78	
	3	4.0588	103.7343	5.8442	4.4597		1.79	1.26	77.55	0.87
middel						7.79	1.82	0.02	78.05	0.68
Reaktorutløp	1	4.0434	96.5670	5.8345	4.4187		1.94		79.05	
(slange)	2	4.0377	102.4884	5.9198	4.4383		1.91		78.72	
	3	4.0403	105.7210	6.0139	4.4537		1.94	0.81	79.05	0.24
middel						7.71	1.93	0.02	78.94	0.19

Gassmåler

10.05.2019	184.486 m ³	kl.10:15	Prøver tatt:
06.05.2019	168.294 m ³	kl.12	Biorest tank - 1 flaske
produksjon	16.192 m³		Reaktorutløp (rørledning) - 1 flaske Analysert 3 prøver fra hver flaske

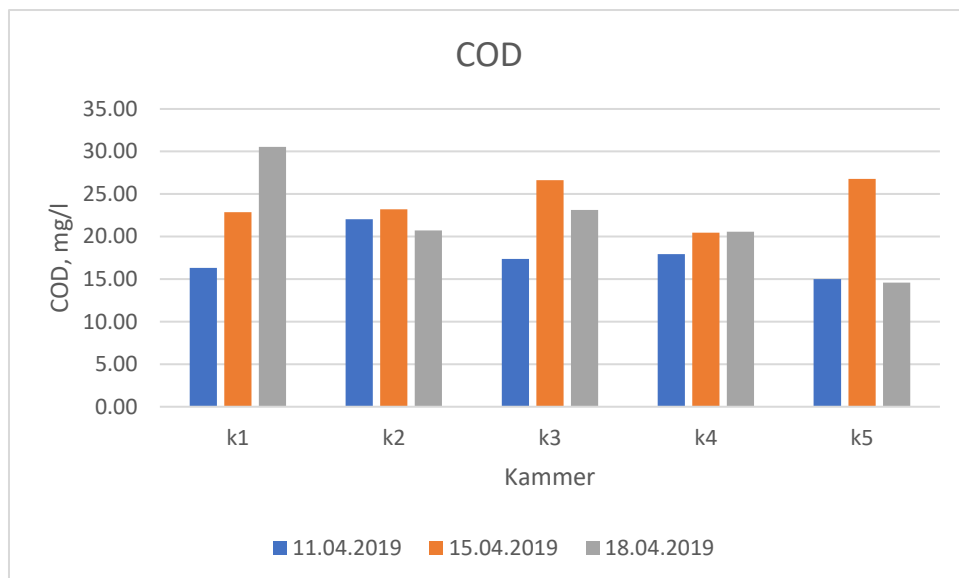
Vedlegg 2. COD – målinger og beregninger

25.04.2019

prøve nr.	innveid prøve, g	vann, g	Fortynnings faktor	COD mg/L			middel	COD mg/l, justert	
1. 11.4 K1	2.03	30	14.78	1115	1080	1120	1105	16.33	
2. 15.4 K1	2	30	15.00	1525	1515	1535	1525	22.88	
3. 18.4 K1	2.02	29.98	14.84	1965	2250	1955	2057	30.52	
4. 11.4 K2	2.01	30.01	14.93	1485	1470	1470	1475	22.02	
5. 15.4 K2	2	30	15.00	1480	1575	1585	1547	23.20	
6. 18.4 K2	2.03	30	14.78	1360	1490	1355	1402	20.71	
7. 11.4 K3	2.01	30	14.93	1130	1180	1185	1165	17.39	
8. 15.4 K3	2	30.02	15.01	1815	1755	1750	1773	26.62	
9. 18.4 K3	2.05	30.06	14.66	1590	1580	1565	1578	23.14	
10. 11.4 K4	2	30	15.00	1115	1070	1400	1195	17.93	
11. 15.4 K4	2.01	30	14.93	1370	1355	1385	1370	20.45	
12. 18.4 K4	2	30.02	15.01	1360	1380	1375	1372	20.59	
13. 11.4 K5	2	30	15.00	1020	995	985	1000	15.00	
14. 15.4 K5	2.02	30.01	14.86	1980	1655	1775	1803	26.79	
15. 18.4 K5	2	30.02	15.01	1000	1045	870	972	14.58	
Råsub 1									
15.04	2.02	30.09	14.90	2845	2650	2645	2713	40.42	
Råsub 2									
15.04	2.11	30	14.22	2920	2930	3155	3002	42.68	
Råsub 3									
15.04	2	30	15.00	2535	2620	2650	2602	39.03	40.71

Gjennom
snytt

	k1	k2	k3	k4	k5
11.04.2019	16.33	22.02	17.39	17.93	15.00
15.04.2019	22.88	23.20	26.62	20.45	26.79
18.04.2019	30.52	20.71	23.14	20.59	14.58



15.05.2019

Prøve	innveid prøve, g	vann, g	Fortinnings faktor	COD mg/L			middel	mg/l, justert	middel
18.04 rå subst oppe									
1 2	2.07	30.02	14.50	2425	2295	2350	2357	34.18	
18.04 rå subst nede									
2 2	2.04	30.1	14.75	2170	2150	2260	2193	32.36	33.27
3 25.04 kam 1 (3)	2.09	30	14.35	750	740	690	727	10.43	
4 25.04 kam 5 (3)	2.03	30.07	14.81	630	650	635	638	9.46	9.94
5 29.04 kam 5	2.09	30.08	14.39	690	690	695	692	9.95	
6 06.05 biorest	2.1	30.05	14.31	2015	1945	1945	1968	28.17	
7 06.05 biorest (S)	2.06	30.02	14.57	1505	1580	1505	1530	22.30	25.23
8 06.05 substrat	2.05	30	14.63	4175	3820	4230	4075	59.63	
9 06.05 kam 5	2	30	15.00	1350	1325	1250	1308	19.63	
10 06.05 grisegylle	2.09	30.09	14.40	2505	2405	2500	2470	35.56	
11 08.05 biorest tank	2.08	30	14.42	2000	2040	2045	2028	29.25	
08.05 biorest tank									
12 Roar	2.05	30.02	14.64	2065	1925	1985	1992	29.17	29.21

Substrat	15.04	18.04	midl
COD, mg/l	40.71	33.27	36.99

Biorest	6.05	8.05	
COD, mg/l	25.23	29.21	27.22

Kammer 5	midl
COD, mg/l	15.12

3.42 l CH₄/l masse substrat - biorest-tank
 1.03 m³ CH₄/dag beregnet metan produksjon daglig

7.65 l CH₄/l masse substrat 15.04 - kam 5 middelverdi
 2.30 m³ CH₄/dag beregnet metanproduksjon daglig

COD substrat	COD biorest	COD kam 5	COD omsatt		Metan beregnet		Metan produsert	Differanse	
			Biorest	Kam 5	Biorest	Kam 5		Biorest	Kam 5
g/l	g/l	g/l	%	%	m ³ /dag	m ³ /kg dag	m ³ /dag	%	%
36.99	27.22	15.12	26.4	59.1	1.03	2.30	2.22	53.8	-3.4

Vedlegg 3. FOS/TAC forhold

25.apr		tac	fos	fos.tac
	1. K1 11.4	2284	950.88	0.42
	2. K5 11.4	2897	1243.04	0.43
	3. K1 15.4	2416	852.94	0.35
	13. K5 15.4	2495.25	935.11	0.37
	14. K1 18.4	2487.75	840.49	0.34
	15. K5 18.4	2380	670.34	0.28
15.05.2019				
4	25.04 kam 5 (3)	2332.7	433.79	0.19
5	29.04 kam 5	1740.75	554.14	0.32
6	06.05 biorest	2403.75	1054.63	0.44
7	06.05 biorest (S)	2385.25	925.15	0.39
9	06.05 kam 5	2361.75	956.69	0.41
11	08.05 biorest tank 0805 biorest tank	2152.5	930.96	0.43
12	Roar	2119.5	875.35	0.41
15	25.04 kam 2	1897.5	526.75	0.28
16	25.04 kam 3	2018.75	455.37	0.23
17	2504 kam 4	1985	458.69	0.23
18	29.04 kam 1	1743.75	701.05	0.4
19	29.04 kam 2	1867.5	657.06	0.35
20	29.04 kam 3	1855	618.88	0.33
21	29.04 kam 4	1758.5	561.61	0.32

	kam1	kam2	kam3	kam4	kam5
29.04	0.4	0.35	0.33	0.32	0.32
25.04		0.28	0.23	0.23	0.19

	kam1	kam5
11.04	0.42	0.43
15.04	0.35	0.37
18.04	0.34	0.28

	kam 5	tank
6.05	0.41	0.44
8.05		0.43

Vedlegg 4. Bakterietest

Kunde	AnalyseRapport	Prøvetakingsdato	Prøvekode	Prøveserier	Prøve referanse	Varegruppe	Prøvebeskrivelse	Test	Parametere	Resultat	Enhet	LOQ	MU
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033792-01	06-05-2019	439-2019-05070236	EUNOM O-00226600	Nr.1		Slam	Salmonella spp. (kompost) /25 g intern metode basert på BacGene Salmonella	Salmone lla	Ikke påvist	/25 g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033792-01	06-05-2019	439-2019-05070236	EUNOM O-00226600	Nr.1		Slam	Termotolerante koliforme <20 >16 000 /g (1) intern metode basert på NS 4714	Termotolerante koliforme	> 16 000	MPN /g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033792-01	06-05-2019	439-2019-05070236	EUNOM O-00226600	Nr.1		Slam	Total tørrstoff	Total tørrstoff	9,2	%	0,02	12%
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033793-01	06-05-2019	439-2019-05070237	EUNOM O-00226600	Nr.2		Slam	Salmonella spp. (kompost) /25 g intern metode basert på BacGene Salmonella	Salmone lla	Ikke påvist	/25 g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033793-01	06-05-2019	439-2019-05070237	EUNOM O-00226600	Nr.2		Slam	Termotolerante koliforme <20 >16 000 /g (1) intern metode basert på NS 4714	Termotolerante koliforme	3 000	MPN /g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033793-01	06-05-2019	439-2019-05070237	EUNOM O-00226600	Nr.2		Slam	Total tørrstoff	Total tørrstoff	3,7	%	0,02	12%
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033794-01	06-05-2019	439-2019-05070238	EUNOM O-00226600	Nr.3		Slam	Salmonella spp. (kompost) /25 g intern metode basert på BacGene Salmonella	Salmone lla	Ikke påvist	/25 g		

Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033794-01	06-05-2019	439-2019-05070238	EUNOM O-00226600	Nr.3	Slam	Termotolerante koliforme <20 >16 000 /g (1) intern metode basert på NS 4714	Termotolerante koliforme	< 20	MPN /g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033794-01	06-05-2019	439-2019-05070238	EUNOM O-00226600	Nr.3	Slam	Total tørrstoff	Total tørrstoff	1,1	%	0,02	12%
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033795-01	06-05-2019	439-2019-05070239	EUNOM O-00226600	Nr.4	Slam	Salmonella spp. (kompost) /25 g intern metode basert på BacGene Salmonella	Salmone lla	Ikke påvist	/25 g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033795-01	06-05-2019	439-2019-05070239	EUNOM O-00226600	Nr.4	Slam	Termotolerante koliforme <20 >16 000 /g (1) intern metode basert på NS 4714	Termotolerante koliforme	< 20	MPN /g		
Norsk Institutt for Bioøkonomi	AR-19-MM-033795-01	06-05-2019	439-2019-05070239	EUNOM O-00226600	Nr.4	Slam	Total tørrstoff	Total tørrstoff	1,6	%	0,02	12%

Vedlegg 5. Anslagsberegninger

Antall person	130
Svart vann, kg/pers/dag (estimert)	5
Mataavfall: estimert med ca. 250 g /person daglig plus 3.78 l vann/dag leilighet	1.51
Hageavfall, kg/person/ år (SSB)	28.1

Type substrat	Årlig mengde, kg/person /år	Daglig mengde, kg/person	Daglig mengde, kg	TS %	VS% av TS	Biogass potensiale, nL/kg VS	Metan potensiale, m ³ CH ₄ /tonn VS	Kilde
Svart vann (beregnet)	1825.00	5.00	650.00	0.6	83	500		Hertel et al.
Kjøkken avfall (SSB 2017)	551.15	1.51	196.30	10	80		470	Substrathandbok for biogassproduksjon
Hageavfall (SSB 2017)	28.10	0.08	10.01	40	90		300	Substrathandbok for biogassproduksjon

Organisk materiale, konsentrasjon:

	Mengde, kg/dag	TS, %	TS, kg/dag	VS % av TS	VS, kg/dag	Potensiale (m ³ metan/tonn VS)	Metanprosent	Biogass potensiale, m ³ /tonn
Hageavfall	10.008	40.00	4.003	90 %	3.603	300	63 %	476.190
Mataavfall	196.300	10.00	19.630	80 %	15.704	470	65 %	723.077
Svartvann	650.000	0.60	3.900	83 %	3.237	315	63 %	500.000
Sum	856.308		27.533		22.544			

TS substrat, % 3.22 %

Tot.mengde		
TS	27.533	856.3 kg
Konsentrasjon		
VS	26.327	kg/tonn

Beregning av HRT

OLR, g VS/l	5 (valgt)
HRT	5 døgn

Størrelse på reaktor

Vr (m ₀ *HRT)	4.509 tonn (m ³)
Reaktorstørrelse:	5.411 tonn (m ³) 20% volum av gass

Spesifikk biogassproduksjon

	Biogass-potensiale, m ³ /tonn vs	VS, kg/dag	Biogasproduksjon, m ³ /døgn
Hageavfall	476.190	3.603	1.716
Matavfall	723.077	15.704	11.355
Svartvann	500.000	3.237	1.619
Sum		22.544	14.689 m ³ /døgn

Spesifikk, m³/tonn 651.589

Virkningsgrad 3.26

Energiproduksjon 10 kWh/m³ metan

	vs, kg/dag	Metanpotensiale, m ³ /tonn VS	Metanproduksjon, m ³ /dag
Hageavfall	3.603	300	1.081
Matavfall	15.704	470	7.381
Svartvann	3.237	315	1.020

Summ 9.481

Reel metanproduksjon, m³/døgn (60%) 5.689

Spesifikk metanproduksjon, m³/kg VS 0.421

Energiproduksjon, kWt/døgn (25% for intern bruk) 42.67

	Mengde, kg/dag	TS, %	TS, kg/dag	VS av TS, %	VS, kg/dag	N-tot (% av TS)	Protein P, kg/dag	N-tot, kg/dag
Hageavfall	10.01	40.00	4.003	90 %	3.603	3.7		0.148
Matavfall	196.30	10.00	19.630	80 %	15.704	0.04	0.1374	0.009
Svartvann	650.00	0.60	3.900	83 %	3.237	28.0		1.092

Substrathåndbok for Ensilasje (helsædes)
P= 7 g/kg TS - proteinhold , N er 6,25% av P
28% av TS fra data i Hertel et al.

Sum	856.31		27.533		22.544			1.249
sum per år	312552.5		10049.65		8228.545			455.779

Plantetilgjengelig N

60 % Mineralisering

	Ammonium før behandling, %	Ammonium før behandling, kg/år	Mineralisert etter behandling N, kg/år
Hageavfall	0		32.439
Matavfall	0		1.881
Svartvann	32	127.546	290.166

Sum

324.49

Beregning av areal

	Mengde, kg/år	TS, %	TS, kg/år	Fosfor, % av TS	Fosfor, g/kg TS	Mengde P, kg/år
Hageavfall	3653.00	40.00	1461	0.30		4.384
Matavfall	71649.50	10.00	7165		3.8	27.227
Svartvann	237250.00	0.60	1424	2.70		38.435

sum

70.045

	Mengde P, kg/år	Areal, daa
Hageavfall	4.384	1.252
Matavfall	27.227	7.779
Svartvann	38.435	10.981

Tot.mengde P (kg)	arealkrav (kg/daa)	nødv. Areal (daa)
70	3.5	20



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway