



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Grønne verdikjeder med utgangspunkt i biogassproduksjon fra fettrike råstoff

NIBIO RAPPORT | VOL. 7 | NR. 167 | 2021



Joshua F. Cabell¹, Ingvar Kvande², Linn Solli¹, Lovise Sæter², Arnar Lyche³
Divisjon for miljø og naturressurser¹ (NIBIO), NORSØK², Tingvoll Ull³

TITTEL/TITLE

Grønne verdikjeder med utgangspunkt i biogassproduksjon fra fettrike råstoff

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

Joshua F. Cabell (NIBIO), Ingvar Kvande (NORSØK), Linn Solli (NIBIO), Lovise Sæter (NORSØK), Arnar Lyche (Tingvoll Ull)

DATO/DATE:	RAPPORT NR./ REPORT NO.:	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:	PROSJEKTNR./PROJECT NO.:	SAKSNR./ARCHIVE NO.:
11.01.2022	7/167/2021	Åpen	NFR309965	19/01120
ISBN:	ISSN:	ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:	ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:	
978-82-17-02936-6	2464-1162	47		

OPPDRAAGSGIVER/EMPLOYER:

Oppdragsgiver

KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:

Linn Solli (linn.solli@nibio.no)

STIKKORD/KEYWORDS:

Biogass, fett, lipid, lanolin, ull, meierislag, grønne verdikjeder, bioøkonomi

Biogas, fat, lipid, lanolin, wool, dairy sludge, green value chains

FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:

Bioøkonomi

Bioeconomy

SAMMENDRAG/SUMMARY:**Sammendrag (Norsk)**

Produksjon av biogass er et viktig tiltak både for redusering av klimagassutslipp og resirkulering av næringsstoffer. Det kan også være en inntektskilde for bønder og skaper positive økonomiske ringvirkninger i distrikta. Dette prosjektet tok utgangspunkt i to biogassanlegg under planlegging eller utbygging og substratene som er tilgjengelig i nærrområdet: meierislag, ullvaskevann, og grillfett. Det ble gjennomført labbskala forsøk på disse substratene i kombinasjon med husdyrgjødsel under ulike forhold. Det ble også gjort en økonomisk vurdering av biogassanlegg på ulike størrelser som tar imot disse substratene, og av samlokalisering av et ullvaskeri i kombinasjon med et biogassanlegg og andre bedrifter på Tingvoll, et tettsted i Møre og Romsdal. Samarbeidspartnerne i prosjektet var NIBIO, NORSØK, Tingvoll Ull, Hustadvika Biokraft, Tine Elnesvågen, og Statsforvalteren i Møre og Romsdal.

Resultatene fra biogassforsøket viser at ullvaskevann og meierislag gav generelt lavere gassutbytter enn grillfett, både i biometanpotensiale test og i kontinuerlige reaktorer. Noe av forklaringen på lavt metanutbytte kan være at både ullvaskevann og meierislag brukt i denne testen hadde høyt vanninnhold (tørrestoffinnhold rundt 1%), var lite energikonsentrert, og hadde relativt lave fettsyrekonsentrasjoner. En annen forklaring kan være synergistisk inhibering grunnet kombinasjonen av enkelte fettsyrer og ammoniakk. Det ble målt høyest metanutbytte fra ullvaskevann og meierislag (henholdsvis 200-250 og 150 – 200 mL metan / g VS) når mengden av

**NIBIO**NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

disse substratene tilsatt reaktorene var 150-200 mL og på driftstemperatur 41 og 55 C. Maksimum utbytte til grillfett var 300 mL metan /g VS når det var tilsatt 300 mL til reaktoren. Økt driftstemperatur vil gi økt enzymaktivitet og nedbrytningsgrad med påfølgende økt metanutbytte i biogassreaktorer med lav belastning. Dette er sannsynligvis noe av forklaringen på økt metanutbytte med forhøyet temperatur i reaktorene.

Meierislammet er lett nedbrytbart og kan gi betydelig gassproduksjon hvis det er mer konsentrert, og har næringsstoffinnhold som kan gi bedre biorestkvalitet. Ullvaskevann og meierislam kan også vurderes behandlet i andre typer reaktorer som for eksempel UASB eller biofilmreaktorer. Grillfett fra kylling gir økt gassproduksjon, men har ikke særlig innhold av næringsstoffer og kan være utfordrende for anlegget både prosessmessig og mekanisk ved avleiring av fett. Ullvasking krever mye vann og varme. Det finnes flere tiltak for å effektivisere prosessen, som gjenvinning av gråvann og varme.

Lønnsomhetsberegninger bekrefter at ullvaskevann nok må befinne seg i nærheten av et biogassanlegg slik at det kan fungere som prosessvann (lavere gate-fee), og at eventuelt N i vaskevannet kan gi merverdi til bioresten for at det skal bli en god løsning både for substrateier og anleggseier. Plassering av et ullvaskeri på Tingvoll har sine fordeler, men også sine utfordringer. Tilgang til rimelig varme i begrensede perioder, gjenvinning av vaskevann og varme, omsetning av avløpsvann direkte som gjødsel eller substrat i et biogassanlegg, omsetning av lanolinen, og samarbeid om vakt og drift er avgjørende faktorer for at det skal være lønnsomt å plassere et ullvaskeri på Tingvoll. Alternative løsninger til vasking med uttak av lanolin er interessant, og Tingvoll Ull planlegger et eget prosjekt som ser på en slik mulighet.

Summary (English)

Biogas production is an important measure both for reducing greenhouse gas emissions and recycling nutrients. It can also be a source of income for farmers and creates positive economic ripple-effects in rural areas. This project was based on two biogas plants under planning or development, and the substrates available in the immediate area: dairy sludge, wool scouring water, and grease from barbecuing chicken. Lab-scale biomethane experiments were performed on these substrates in combination with livestock manure under different conditions. An economic assessment was also done of biogas plants of various sizes that receive these substrates, and of co-locating a wool washing facility in combination with a biogas plant and other companies in Tingvoll, a town in Møre og Romsdal. The partners in the project were NIBIO, NORSØK, Tingvoll Ull, Hustadvika Biokraft, Tine Elnesvågen, and the State Administrator Møre og Romsdal.

The results from the biogas experiment show that wool scouring water and dairy sludge generally gave lower gas yields than barbecue fat, both in biomethane potential tests and in continuous reactors. Part of the explanation for the low methane yield may be that both wool scouring water and dairy sludge used in this test had a high water content (around 99%), had a low energy concentration, and had a relatively low fatty acid concentration. Another explanation may be synergistic inhibitory effect due to the combination of certain fatty acids and ammonia. The highest methane yield measured from wool scouring water and dairy sludge (200-250 and 150 - 200 mL methane / g VS, respectively) was achieved when the amount of these substrates added to the reactors was 150-200 mL and at operating temperatures of 41 and 55 °C. The maximum yield from barbecue fat was 300 mL methane / g VS when 300 mL was added to the reactor. Increased operating temperature will increase enzyme activity and degree of degradation with consequent

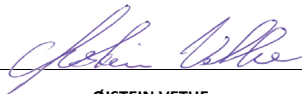
increased methane yield in biogas reactors with low load. This possibly explains the increased methane yield with elevated temperature in the reactors.

Dairy sludge degrades easily and can provide significant gas production if it is more concentrated and has a nutrient content that can provide better digestate quality. Wool scouring water and dairy sludge can also be treated in other types of reactors, such as UASB or biofilm reactors. Barbecue fat from chicken gives increased gas production but does not have an especially high content of nutrients and can be challenging for the plant both process-wise and mechanically. Wool washing requires significant amounts of water and heat. There are several measures to streamline the process, such as recycling greywater and heat.

Profitability calculations confirm that wool scouring water must be located close to a biogas plant so that it can function as process water (lower gate fee) and N in the washing water can add value to the digestate for it to be a good solution for both substrate owners and plant owners. Placing a wool washing facility in Tingvoll has its advantages, but also its challenges. Access to affordable heat for limited periods, recovery of washing water and heat, sale of wastewater directly as fertilizer or substrate in a biogas plant, sale of lanolin, and cooperation on night and weekend shifts and operation are crucial factors for it to be profitable to place a wool laundry on Tingvoll. Alternative solutions for washing and/or lanolin extraction are interesting, and Tingvoll Ull is planning a separate project that looks at such a possibility.

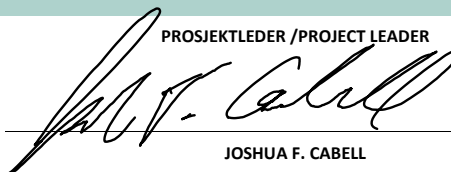
LAND/COUNTRY:	Norge
FYLKE/COUNTY:	Møre og Romsdal
KOMMUNE/MUNICIPALITY:	Tingvoll
STED/LOKALITET:	Tingvoll

GODKJENT / APPROVED



ØISTEIN VETHE

PROSJEKTLEDER / PROJECT LEADER



JOSHUA F. CABELL



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Forord

Produksjon av biogass er et viktig tiltak både for redusering av klimagassutslipp og resirkulering av næringsstoffer. Det kan også være en inntektskilde for bønder og skaper positive økonomiske ringvirkninger i distrikta. Dette prosjektet tok utgangspunkt i to biogassanlegg under planlegging eller utbygging og substratene som er tilgjengelig i nærområdet: meierislam, ullvaskevann, og grillfett fra kylling. Det ble gjennomført labbskala forsøk på disse substratene i kombinasjon med husdyrgjødsel under ulike forhold. Det ble også gjort en økonomisk vurdering av biogassanlegg på ulike størrelser som tar imot disse substratene, og det ble gjort en case-studie av samlokalisering av et ullvaskeri i kombinasjon med et biogassanlegg og andre bedrifter på Tingvoll, et tettsted i Møre og Romsdal. Samarbeidspartnerne i prosjektet var NIBIO, NORSØK, Tingvoll Ull, Hustadvika Biokraft, og Tine Elnesvågen. Prosjektet var finansiert av Regionalt forskningsfond Møre og Romsdal, Statsforvalteren i Møre og Romsdal, og en egenandel fra alle samarbeidspartnere. Jeg takker for støttet.

Denne rapporten er kulminasjonen av et samarbeid på tvers av forskningsinstitutter og fagområder. Jeg var prosjektleder og deltok i biogassforsøket på Tingvoll. Jeg er også medforfatter på kapittel 1 og hovedforfatter for innledning og konklusjon. Linn Solli hadde ansvar for biogassforsøkene og er hovedforfatter på kapittel 1. På Ås fikk hun hjelp av Hege Bergheim, Ksenia Gulyaeva, Roald Aasen, og Ove Bergersen (NIBIO) til drift av reaktorene og analyser. På Tingvoll var det Hanne Iren Dahlen og Marius Bless (NIBIO) som hjalp med forsøket. Ingvar Kvande og Lovise Sæter, begge fra NORSØK, ledet arbeidet på økonomiske vurderinger og case-studien om ullvaskeri på Tingvoll, og gjennomførte intervjuer av representanter fra flere bedrifter. De skrev kapitlene 2 og 3. Arnar Lyche, daglig leder hos Tingvoll Ull, bidro til kapittel 3 om case-studien. Michal Sposób (NIBIO), Svein Jarle Horne (NIBIO/NMBU) og Øistein Vethe (NIBIO) leste gjennom rapporten og ga uvurderlig tilbakemelding. Takk for innsatsen til alle som jobbet på prosjektet og rapporten.

Dette prosjektet fikk god hjelp av flere utenfor konsortiet, som delte generøst av sin kunnskap og kompetanse på prosesser og substrater: Jenny Andersson og Hans Bulthuis (Ullkontoret Gotland, vaskeprosess); Bjørg Minnesjord Solheim (Telespinn, vaskeprosess); Ingvild Svorkmo Espelien (Selbu spinneri, vaskeprosess); Tore Hollup Kristiansen (Electrolux, vaskemaskiner); Svein Bjørgum (Tine Elnesvågen, renseprosess og egenskaper meierislam); Eigil Sannan (AquaGen, mengder og egenskaper fiskeensilasje); André Gjørven (Nordmøre Energiverk AS, kapasitet og tilstand distribusjonsnett i Tingvollvågen); og Einar Stuve (Oplandske Bioenergi AS, info om biokullanlegg og egenskaper biokull). Takk til alle sammen for godt samarbeid og åpenhet.

Tingvoll, 11.01.22

Joshua F. Cabell

Innhold

1	Bakgrunn og innledning.....	8
2	Biogassforsøket	10
2.1	Innledning.....	10
2.2	Materialer og metoder	11
2.3	Resultater og diskusjon	15
3	Bedriftsøkonomisk lønnsomhet i gårdsanlegg og større biogassanlegg.....	26
3.1	Vurdering av prosessoppskalering.....	26
3.2	Avgrensninger og egenskaper for substrat brukt i beregningene	26
3.3	Forutsetninger bedriftsøkonomiske vurderinger	28
3.4	Resultater bedriftsøkonomiske beregninger	29
3.4.1	Gårdsanlegg.....	29
3.4.2	Større biogassanlegg	31
3.4.3	Oppsummering.....	32
4	Case Tingvoll ull	34
4.1	Aktører i Tingvollvågen	34
4.1.1	Tingvoll Flis og Varme	35
4.1.2	Tingvoll gard biogassanlegg	35
4.1.3	Aqua Gen.....	36
4.1.4	Tingvoll Kommune	36
4.2	Ullvasking.....	36
4.2.1	Vaskeprosessen.....	36
4.2.2	Eksempler på ullvaskerier	37
4.2.3	Energibehov og vannforbruk for Tingvoll Ull	40
4.3	Mulige synergier og vurderinger	41
4.3.1	Utveksling av varme	41
4.3.2	Vaktsamarbeid og kompetansesamarbeid.....	42
4.3.3	Substrat til biogassanlegg.....	42
4.3.4	Lanolin	43
4.3.5	Gjødselverdi	43
5	Konklusjon	44
	Litteraturreferanse	45

Forkortelser

BMP	Biometan potensiale test
CM	Storfe fjødsel av melkekyr
COD	Kjemisk oksygenforbruk
CSTR	Kontinuerlig omrørt reaktor
GF (FG)	Grillfett fra kylling
LCFA	Langkjedete fettsyrer
MS	Meierislam
OLR	Organisk belastning
TS	Tørrstoff
UV	Ullvaskevann
VFA	Flyktige fettsyrer
VS	Flyktige stoff

1 Bakgrunn og innledning

Denne rapporten er en sammensetning av resultatene fra tre arbeidspakker i prosjektet *Grønne verdikjeder med utgangspunkt i biogassproduksjon fra fettrike råstoff* (prosjektnummer 309965). Prosjektet var finansiert av Regionalt Forskningsfond Møre og Romsdal (RFF), Statsforvalteren i Møre og Romsdal, og egenfinansiering fra Hustadvika Biokraft, Tingvoll Ull, Tine Elnesvågen, Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO), og Norsk senter for økologisk landbruk (NORSØK). Målet med prosjektet var «å bidra til utvikling og realisering av grønne verdikjeder med utgangspunkt i biogassproduksjon fra fettrike råstoff». Delmålene var å 1) innhente data om egenskaper og sammensetning til fettrike råstoff fra Midt-Norge; 2) optimalisere prosesser for nedbrytning av fettrike råstoff i småskala helomrørte biogassreaktorer; og 3) kvantifisere betydningen fettrike råstoff og samtidig utvikling av grønne virksomheter kan ha for å oppnå bedriftsøkonomisk lønnsomhet i nye verdikjeder basert på biogass.

Flere aktører jobber med et mål om å etablere nye biogassanlegg og å utvikle og ta i bruk nye løsninger for biogassproduksjon i Midt-Norge. Blant disse er Hustadvika Biokraft fra Hustadvika kommune og NORSØK fra Tingvoll kommune. Samtidig med dette har det vært relativt utfordrende for landbruket og aktører innenfor landbruk å realisere et mye uttalt mål om klimatiltak for landbruket med biogassanlegg basert på husdyrgjødsel pga. relativt lite energitetthet i husdyrgjødsel. Fett og lipider er energikonsentrert og har derfor et høyt biogass- og metanpotensial som kan øke lønnsomheten, men kan også skape problemer i en biogassreaktor. I mange lipidrike fraksjoner er det også høyt innhold av protein, som frigir nitrogen under omdanning. Det ligger potensiale, men også utfordringer i å utnytte fettrike råstoff i både mindre og større biogassanlegg. Potensialet ligger i lønnsomme verdikjeder for biogass med redusert transportbehov og klimabelastning samt et positivt bidrag til biogassproduksjon både i form av økt gassutbytte og mer næringsrik biorest.

I Norge er det få eller ingen biogassanlegg som drifter reaktorer med særlig stor mengde lipid-substrat selv om slike substrater har høyt potensial. Dette prosjektet ville mer inngående teste noen av parameterne for kontinuerlig anaerob nedbrytning av lipider. Økt kunnskap om disse faktorene er avgjørende for videre optimalisering av prosesser med høy lipid-belastning, det vil si utvikling av modifisert teknologi som for eksempel flertrinns reaktorer, tilsetning av 'lipidspesialiserte' mikrober, forbehandling/etterbehandling, tilpassa fôringshyppighet, tilsetning av sporstoffer etc. Elementære, essensielle prosess-parametere som organisk belastning, oppholdstid, forhold mellom karbon og nitrogen osv. er mye studert for mange prosesser, men for lipid-prosesser er det mangelfull informasjon om hvordan parameterne best tilpasses og påvirkes av forhøyet lipid-konsentrasjon. På samme tid er håndtering av biorest et stadig viktigere tema ifm. etablering av biogassanlegg, og for lipidrike biogassprosesser er det lite kunnskap om biorestens næringsstoffsammensetning, påvirkning på konsentrasjon av uønskede forbindelser, og egnethet som gjødsel- eller jordforbedringsprodukt.

Målsetningen med prosjektets to første delmål var å få innledende informasjon om lipidfraksjoners egnethet i tradisjonell biogassprosess ved ulike temperaturer. Prosjektets tredje delmål så nærmere på hvordan etablering av ny grønn virksomhet kan ses i sammenheng med annen eksisterende virksomhet eller virksomhet under utvikling. For både små og mellomstore biogass-anlegg som Hustadvika Biokraft vil det være avgjørende for bedriftsøkonomisk lønnsomhet å ha tilgang til lokalt og regionalt råstoffer som muliggjør en viss gassproduksjon. Det planlegges bygging av et ull-vaskeri for pigmentert ull på Tingvoll. På vaskeriet må det finnes en løsning på håndtering av vaskevann, samt for å dekke et betydelig energibehov. Dette vil kunne bety råstoff til biogassanlegget til NORSØK i form av vaskevann. Disse aspektene av grønn utvikling ble utforsket med ull-vaskeriet som case.

Fraksjonene som var planlagt inkludert i prosjektet var fra fire ulike aktører i Midt-Norge (husdyr/kjøtt, fisk, meieri, ull), og representerer store næringer innen håndtering av organiske fettrike fraksjoner, og er derfor samlet sett en god modell for andre industrier med tilsvarende masser. Før

prosjektet kom i gang og underveis var vi nødt til å endre substratene til biogassforsøket. Det ble derfor gjennomført lab-skala forsøk på et proteinrikt meierislag med lavt tørrstoffinnhold fra Tine Verdal, grillfett fra et Nortura-slakteri på Østlandet, og ullvaskevann fra Selbu spinneri (som planlagt). Tørket fisk fra MOWI og slakteriavfall ble ikke med, men vi inkluderte resultater fra tidligere forsøk på fiskeensilasje og slakteriavfall i bedriftsøkonomiske beregninger. Substratene og driftsparameterne til reaktorforsøket er beskrevet nærmere i kapitlet «Materialer og metoder».

Det ble gjennomført flere intervjuer av nøkkelpersoner som sitter på viktig informasjon eller kunnskap om substratene og ullvasking, og som jobber i de ulike bedriftene inkludert i case-studien. Følgende personer bidro med sin kunnskap til prosjektet: Jenny Andersson og Hans Bulthuis (Ullkontoret Gotland, vaskeprosess); Bjørg Minnesjord Solheim (Telespinn, vaskeprosess); Ingvild Svorkmo Espelien (Selbu spinneri, vaskeprosess); Tore Hollup Kristiansen (Electrolux, vaskemaskiner); Svein Bjørgum (Tine Elnesvågen, renseprosess og egenskaper meierislag); Eigil Sannan (AquaGen, mengder og egenskaper fiskeensilasje); André Gjørven (Nordmøre Energiverk AS, kapasitet og tilstand distribusjonsnett i Tingvollvågen); og Einar Stuve (Oplandske Bioenergi AS, info om biokullanlegg og egenskaper biokull). All kommunikasjon foregikk på epost og telefon.

Kapittel 2 presenterer resultater fra karakteriseringen av substratene og biogassforsøket. Kapittel 3 oppsummerer hva resultatene betyr for praktiske hensyn og lønnsomhet ved oppskalering til et gårdsanlegg eller større biogassanlegg. Kapittel 4 presenterer resultatene fra case-studien om Tingvoll ull, hvor lokalisering av et ullvaskeri i Tingvollvågen og synergier ved samarbeid med andre aktører der ble undersøkt.

2 Biogassforsøket

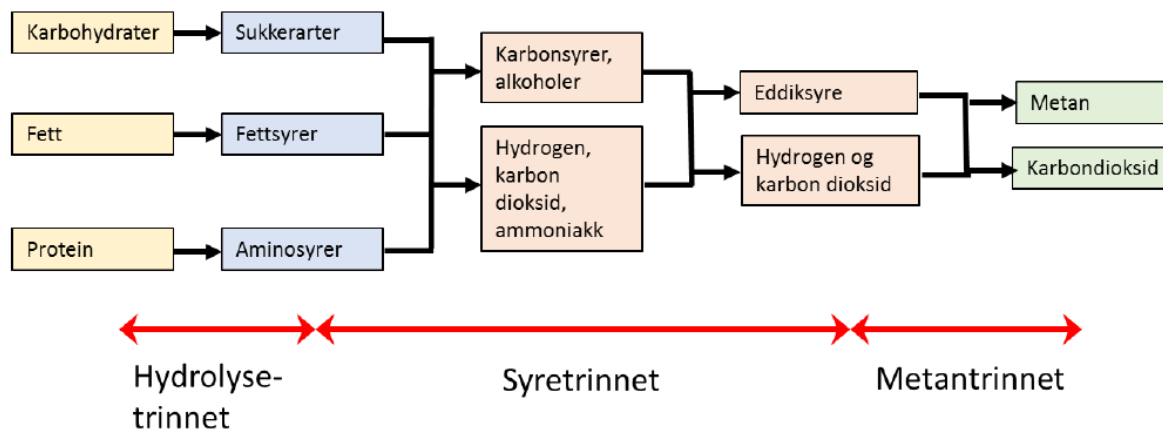
2.1 Innledning

Anaerob nedbrytning og biogassproduksjon kan være en attraktiv prosess for behandling av organisk materiale og produksjon av bioenergi. Anaerob nedbrytning av organiske materialer utføres av mikrobielle samfunn sammensatt av ulike typer bakterier og arker (figur 1). Under de første trinnene brytes komplekse sammensetninger ned til hovedsakelig fettsyrer og nitrogen av hydrolyserende og fermentative (syreproduserende) bakterier. Det siste trinnet, hvor metan og karbondioksid (CH_4 og CO_2) produseres, utføres av arker (Archaea), og arkene benytter enkle forbindelser som eddiksyre (acetat) og hydrogen for å produsere CH_4 og CO_2 .

Det ligger potensiale, men også utfordringer i å utnytte fettrike råstoff i biogassanlegg. Lønnsomme verdikjeder for biogass, med redusert transportbehov og klimabelastning, samt økt energiutbytte kan oppnås. Fett og lipider er energikonsentrert og har derfor et høyt biogass- og metanpotensial, men kan også skape problemer i en biogassreaktor. I biogassreaktoren hydrolyseres lipider til glyserol og langkjeda fettsyrer (LCFA). Glyserol fermenteres til acetat, og LCFA fermenteres via beta-oksidering, til acetat (og andre kortkjeda fettsyrer, VFA) og H_2 [1]. Både hydrolyse av lipider, og fermentering av LCFA og VFA er identifisert som begrensende trinn i biogassproduksjon [2], og årsaken til inhibering er sammensatt. Lipider og LCFA kan hemme prosessen direkte ved at rør og ledninger tettes, og ved at fett-molekyler adsorberer til mikrobenes overflate og dermed hindrer metabolsk transport eller forårsaker utvasking av nøkkel-organismer [1]. I mange lipidrike fraksjoner er det også høyt innhold av protein, som brytes ned til blant annet nitrogen. Lipidinhibering kan påvirkes av økt konsentrasjon av nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$). Synergistisk inhiberingseffekt fra lipid og nitrogen kan oppstå [3].

Driftstemperatur vil ha innvirkning på nedbrytning av fett, både mekanisk (viskositet) og biologisk. Generelt sett vil økt temperatur gi økt enzymaktivitet [4], noe som kan resultere i forhøya biogassutbytter, men også økt risiko for inhibering. Ved mesofil prosess er det observert at enkelte nedbrytningstrinn er mer effektive ved 41 enn 37 °C [5], og spesielt for lipidfraksjoner som mulig kan forårsake problemer på lav temperatur grunnet redusert viskositet, vil forhøyet driftstemperatur antageligvis være en fordel for den mekaniske prosessen. For termofil prosess kan det tenkes at enkelte fraksjoner vil være lettere å håndtere i biogassprosess med driftstemperatur høyere enn de normalt 55 °C, og det er rapportert metanogen aktivitet og biogassproduksjon ved 60 °C termofil prosess med matavfall [6].

Målene for biogassforsøket var å innhente data om egenskaper og sammensetning til fettrike råstoff fra Midt-Norge, og optimalisere prosesser for nedbrytning av fettrike råstoff i småskala helomrørte biogassreaktorer.



Figur 1. Forenkla oversikt over nedbrytning av organiske materialer og metanproduksjonsprosessen [7].

2.2 Materialer og metoder

Materialer - beskrivelse av råstoff

Totalt ble tre forskjellige råstoff (testsubstrat), og storfe gjødsel (ko-substrat) analysert og vurdert i dette prosjektet

- Ullvaskevann (UV) fra Selbu spinneri. Vann, lanolin, noe salt og rester etter ullvasking. Prosessen er nærmere beskrevet i kapittel 4.
- Meierislam (MS) fra Tine Verdal. Prosessen består i sirkulasjon og «innpisking» av luft for å få en aerob nedbrytning i en stor tank – 1000m³. Deretter filtreres overløpet og tilsettes en polymer (polyakrylamid-basert) for å felle ut slam og til slutt en mekanisk avvanning for å få opp tørrstoffprosenten i slammet.
 - De store ysteriene i Tine har tilsvarende aerob nedbrytning i en stor reaksjonstank. Men videre går dette vanligvis inn på kommunalt avløpsnett for eventuell videre behandling/separering.
 - TINE sitt anlegg i Tana er det eneste anlegget som har tilsvarende fullrensing som det Tine Elnesvågen installerer.
- Fett fra grill (GF) fra fjørfeslakteri til Nortura. Denne fraksjonen er restprodukt etter kylling som grilles på slakteri. Fraksjonen inneholder utelukkende animalsk lipid (avrenning fra grill). Fraksjonen inneholder også en del krydder (inkludert salt, NaCl) og vann.
- Storfe gjødsel fra Ås gård (CM Ås), melkekyr.
- Storfe gjødsel fra Tingvoll gård (CM Tv), melkekyr.

I utgangspunktet var det inkludert også en fjerde fraksjon, tørket fiskeensilasje, men aktøren som var ansvarlig for å levere dette substratet, gikk ut av prosjektet.

Råstoffene ble innledningsvis analysert for standard kjemisk sammensetning. En samla oversikt over kjemisk hovedkarakteristikk; pH, innhold tørrstoff (TS), organisk tørrstoff (VS), kjemisk oksygenforbruk (COD) og ammonium (NH₄⁺-N) er vist i tabell 1. Fettsyresammensetning er vist i tabell 11-14. TS, VS, COD og NH₄⁺ er målt på triplikate prøver (for alle målinger standardavvik < 10%). Fettsyrer og lipider er målt på enkeltprøver.

Tabell 1. Kjemisk og fysisk sammensetning av råstoff brukt i undersøkelsene.

	Ullvaskevann	Meierislam	Fett fra grill	Storfegjødsel Ås	Storfegjødsel Tingvoll
TS %	1,2	0,8	30,0	6,0	6,0
VS % (av TS)	57,0	79,1	95,0	85,0	83,6
VS g/L	7,1	6,2	285,0	46,0	50,4
COD g/L	16,8	8,2	427,0	73,4	75,4
COD/VS g/g	2,4	1,3	1,5	1,6	1,5
NH₄⁺ mg/L	1571,6	410,4	320,3	870,9	810,8
pH	8,4	7,0	6,5	7,8	7,0

Metoder – kjemiske analyser

Substratenes egnethet i biogassprosess ble vurdert etter analyser av kjemiske sammensetning, bestemmelse av biologisk metanpotensial (BMP) og biogassutbyttet i labskala kontinuerlige helomrørte biogassreaktorer (CSTR).

Innhold av tørrstoff (TS), organisk tørrstoff (VS) og kjemisk oksygenforbruk (COD) ble bestemt etter standard metodikk, tidligere beskrevet [8]. Innhold av kortkjeda flyktige fettsyrer (VFA) ble bestemt med svovelsyretitrering (FOSTAC) [9], og ved bruk av væskechromatografi (HPLC) med separering og kvantifisering av eddiksyrer, propionsyrer, smørsyrer, melkesyrer og maursyrer [10]. Ekstraksjon, kvantifisering og kvalifisering av LCFA ble utført ved at 200 µL av prøven ble overført i 15 mL Kimaxrør, tilsatt 4 mL Kloroform/Metanol (66:33 V/V) og 100 µL 1M HCl. 200 µL av kontrollprøvemix (250 µg/mL) ble brukt som kontrollprøver og i reagensblank. 200 µL intern standard C-19 metylester (1 mg/mL) ble tilsatt prøver, kontroller og reagensblank prøvene. NaCl løsning (5 mL, 0.9%) ble tilsatt til alle rør og prøvene ble ekstrahert i end-to-end rotator (30 min, hastighet 7,5). Etter ekstraksjonen ble prøvene sentrifugert (5 min, 3000 rpm) og vannfasen på toppen ble fjernet ved hjelp av Pasteur pipette koblet til vannstråle-sug. Den organiske fasen (bunnfasen) ble dampet inn til tørrhet under nitrogenstrøm ved 60 °C. BF₃ i Metanol (500 µL, 14 % W/W) ble tilsatt til det tørre ekstraktet, blandet godt på Vortex (10 sek) og inkubert i en varmeblokk i 30 min ved 60 °C (derivatisering av frie fettsyrer til fettsyre metylestere). Derivatiserte prøver ble avkjølt til romtemperatur, tilsatt 2 mL MilliQ vann og 1 mL hexan og ekstrahert i end to end rotator (10 min, hastighet 7,5). Ekstraktene ble så sentrifugert (5 min, 3000 rpm) og hexanfasen ble overført med Pasteur pipette til en GC-vial for analyse på GC-MS. Fettsyrene ble kvantifisert med en punkts kalibrering av FAME 37 mix (Supelco CRM47885). TIC av messeområdet 40-350 amu ble benyttet. Metoden er utviklet av Hans Ragnar Norli / NIBIO, basert på tidligere publiserte metoder [11]–[13].

Innhold av total-lipid ble bestemt ved at 5mL prøve ble overført til 15 mL Kimax rør, tilsatt 5 mL MTBE og ekstrahert i end-to-end rotator, (1 time, speed=7,5). Ekstraktet ble så sentrifugert (5 min ved 3500rpm) og 1 mL av den organiske MTBE fasen ble overført til hetteglass og satt til avdamping ved romtemperatur over natten. Vekten av hetteglass ble tatt før avdamping (tomme glass) og etter avdamping. Det ble tatt noen replikater og kontrollprøver for kvalitetskontroll og statistikk. For kontrollprøver ble det brukt kumøkk spiket med olje: 92,95 mg/mL fett. Gjenfinning i kontrollprøver var innafor anbefalte grenseverdier 75%-125%. Metoden er utviklet av Ksenia Gulyaeva / NIBIO, basert på tidligere publisert metode [14].

Metoder - Biologisk metanpotensial (BMP)

Det ble undersøkt metanpotensial i de tre råstoffene ullvaskevann, meierislam og fett fra grill. Biorest fra en kontinuerlig 6-liters lab-skala reaktor (CSTR) driftet mesofilt (37 °C) med storfe gjødsel som substrat ble brukt som inokulum. Mengder råstoff og VS tilsatt i flaskene er vist i tabell 2. Totalt 15 flasker ble inkludert i forsøket: 3 parallelle prøver for hvert substrat, positiv kontroll (cellulose) og negativ kontroll (kun inokulum) ble analysert. Totalt flaskevolum var 530 mL. Gassvolum i flaskene (headspace) var 130 mL. Flaskene ble forseglet og inkubert i ristebenk ved 37 °C i 50 dager. Volum produsert biogass (mL) ble beregnet fra målt gasstrykk (manometer, MB), og gass-sammensetning (volum % CH₄ og CO₂) ble analysert med en micro-gasskromatograf [15].

I biometanpotensialtesten (BMP) ble det veid inn ca. 100 gram inokulum / flaske (totalvolum 500 mL). En oversikt over innveid prøvemateriale er vist i tabell 2.

Tabell 2. Innveid materiale BMP.

Substrat	Gram totalt	Gram VS
<i>Ullvaskevann</i>	50	0,35
<i>Meierislam</i>	50	0,31
<i>Fett fra grill</i>	1	0,28

Metoder – kontinuerlige biogassforsøk (CSTR)

De tre råstoffene ullvaskevann, meierislam og fett fra grill ble testet som biogass-substrater i kontinuerlig prosess. Forsøkene ble utført på Ås biogasslaboratorium (2 reaktorer, parallelle), og på Tingvoll (4 reaktorer, 2 parallelle). Reaktortypen brukt var den samme på de to teststedene. Reaktorene har et totalvolum på 20 liter, og effektivt volum brukt i forsøkene var 10 liter. Reaktorene er utstyrt med ventiler for uttak og tilsetning av effluent og substrat. Gassventil er i reaktorens toppdel. I reaktorens bunndel er det varmeelement, som reguleres av en ekstern kontrollenhet. Gassvolumproduksjon måles og logges i peristaltiske pumpeenheter (Ås) og Ritter MGC MilliGascounter (Tingvoll). Sammensetning av CH₄ og CO₂ ble målt kontinuerlig på gasskromatograf, GC (Ås) [16] og ved bruk av en GA5000 feltmåler (Tingvoll) [10]. Samtlige substrater ble testet med oppholdstid = 20 dager, og total volumetrisk belastning = 500 mL.

Forsøkene ble gjennomført ved at en av de to parallelle reaktorene ble startet med 5 dagers forsinkelse. Dette for å redusere risiko for at begge reaktorer skulle bli overbelastet av tillegg- substrat samtidig.

En oversikt over forsøksparametere (driftstemperatur, organisk belastning (OLR) og volum belastning) med de ulike substratene er vist i tabell 3 a (ullvaskevann), b (meierislam), og c (fett fra grill). OLR er målt i g VS/reaktorliter/døgn. Reaktorene ble driftet i omtrent 8 mnd. En oversikt over reaktorer, tidsforløp og kommentarer til forsøket er vist i tabell 4.

Tabell 3a. Oversikt over driftsparametrene, reaktorer tilsatt ullvaskevann (Tingvoll).

	Fase 0	1	2	3	4	5	6
Driftstemp. °C	37	37	37	37	41	55	55
mL UV/CM	0/500	100/400	200/300	150/350	150/350	150/350	200/300
OLR UV	0	0,07	0,14	0,11	0,11	0,11	0,14
OLR CM	2,02	1,51	1,01	1,26	1,26	1,26	1,01
OLR tot	2,02	1,58	1,15	1,36	1,36	1,36	1,15

Tabell 3b. Oversikt over driftsparametrene, reaktorer tilsatt meierislim (Tingvoll).

	Fase 0	1	2	3	4	5	6
Driftstemp. °C	37	37	37	37	41	55	55
mL MS/CM	0/500	100/400	200/300	150/350	150/350	150/350	200/300
OLR MS	0	0,05	0,11	0,08	0,08	0,08	0,11
OLR CM	2,02	1,51	1,01	1,26	1,26	1,26	1,01
OLR tot	2,02	1,57	1,12	1,34	1,34	1,34	1,12

Tabell 3c. Oversikt over forsøksparametrene, reaktorer tilsatt fett fra grill (Ås).

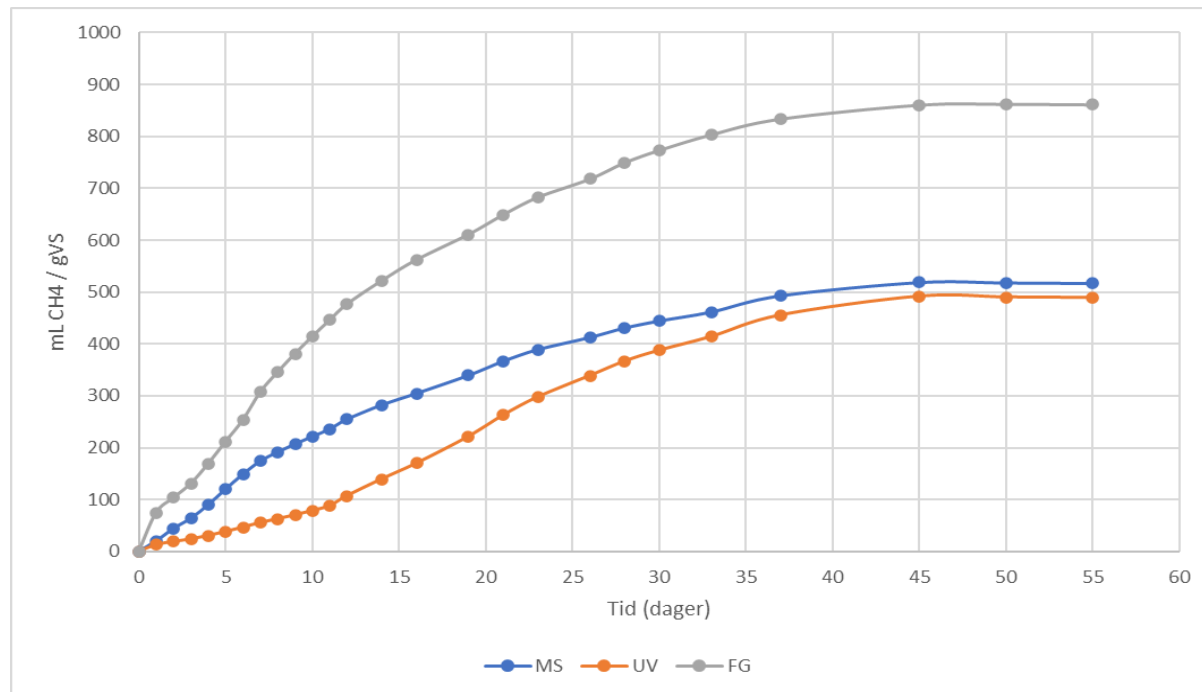
	Fase 0	1	2	3	4	5
Driftstemp. °C	37	37	37	37	37	37
mL GF/CM	0/500	50/450	100/400	150/350	200/300	250/250
OLR GF	0,0	1,4	2,9	4,3	5,7	7,1
OLR CM	2,4	2,2	1,9	1,7	1,4	1,2
OLR tot	2,4	3,6	4,8	6	7,1	8,3

Tabell 4. Oversikt over reaktorer og tidsforløp til forsøket.

Måned	GF, Ås		MS & UV, Tingvoll		
	mL tileggsubstrat	Driftstemp. °C	mL tileggsubstrat	Driftstemp. °C	
juli	0	37	100	37	
august	50		200		
september	100		150		
oktober	150		---		41
november	200		150		
desember	250	---	---	55	
januar	250		200		
februar	---		200		

2.3 Resultater og diskusjon

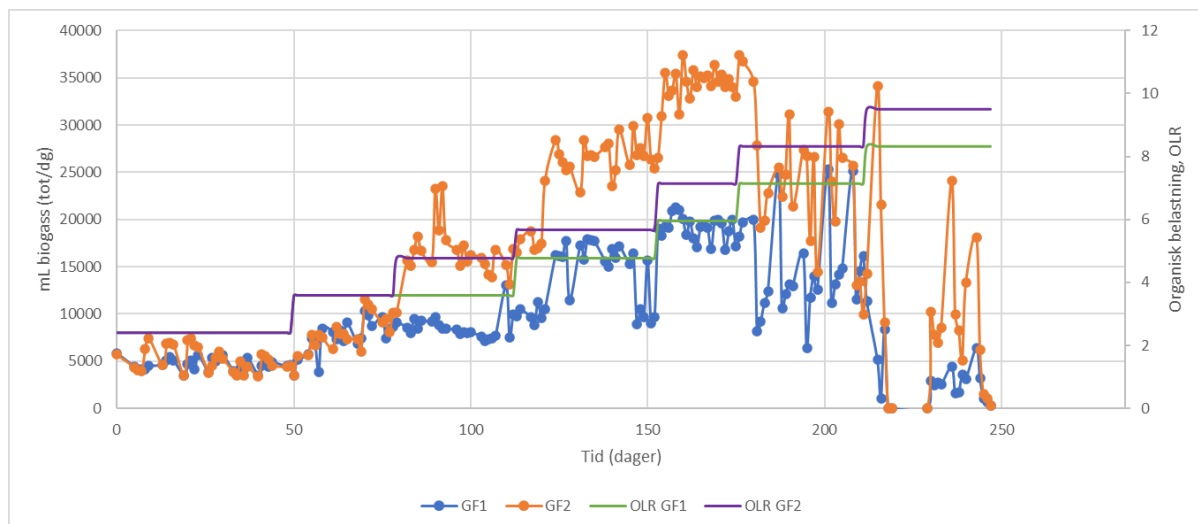
For å bestemme metanpotensial i de tre prøvene (UV, MS og FG (GF)) ble det gjort en standard BMP-test. Resultatet fra BMP er vist i figur 2 som mL metan akkumulert / gram VS tilsatt. Resultatet vises som gjennomsnitt av triplikate prøver (standardavvik < 10%).



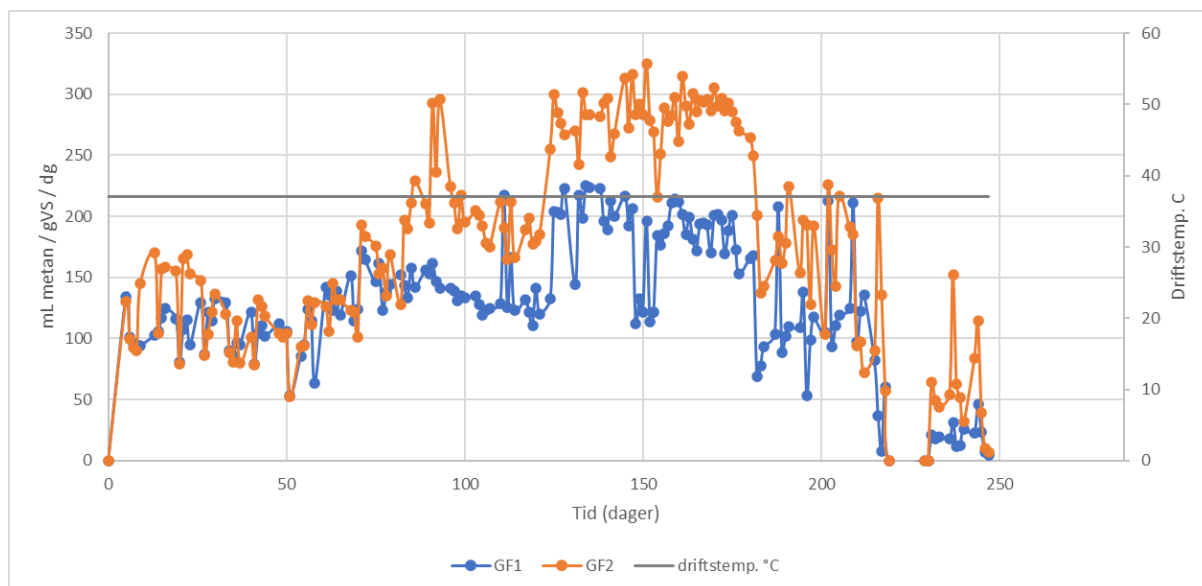
Figur 2. Biometanpotensial (gjennomsnitt, 3 parallelle) for meierislam, ullvaskevann og fett fra grill, mL metan / gram VS akkumulert på 55 dager.

Resultatet fra BMP-test viser at de tre fraksjonene har relativt høyt potensial. BMP for MS, UV og FG (GF) ble målt til hhv. 517, 489 og 861 mL metan / g VS tilsatt (fig 2). Sammenlignet med for eksempel storfe gjødsel med rapportert BMP = 213 mL / g VS [17] representerer substratene målt i dette forsøket potente biogass-substrat. Sammenlignet med faktisk utbytte i kontinuerlige reaktorer er BMP-målingene av MS og UV markant høyere, og årsaken til det er antageligvis sammensatt av flere faktorer. Oppholdstiden i BMP (55 dager) er mer enn dobbelt så lang som den i CSTR (20 dager), og lengre oppholdstid gir høyere nedbrytningsgrad. Fett er relativt tungt nedbrytbart for mikroorganismene involvert i metanproduksjonsreaksjonen [18], og fettrike substrater vil behøve noe lengre oppholdstid i en prosess enn protein og karbohydrat. I CSTR skjer en kontinuerlig utvasking av mikroorganismer, i BMP er systemet lukket, og ingen utvasking skjer. Resultatet fra BMP-testen er derfor ikke direkte sammenlignbar med verdier målt i CSTR, men gir et estimat på hvilke betingelser som kan optimalisere biogassproduksjon. Ut ifra denne testen kan det antas at UV er et substrat som vil kreve lang oppholdstid i en kontinuerlig prosess. MS og GF brytes ned noe fortere.

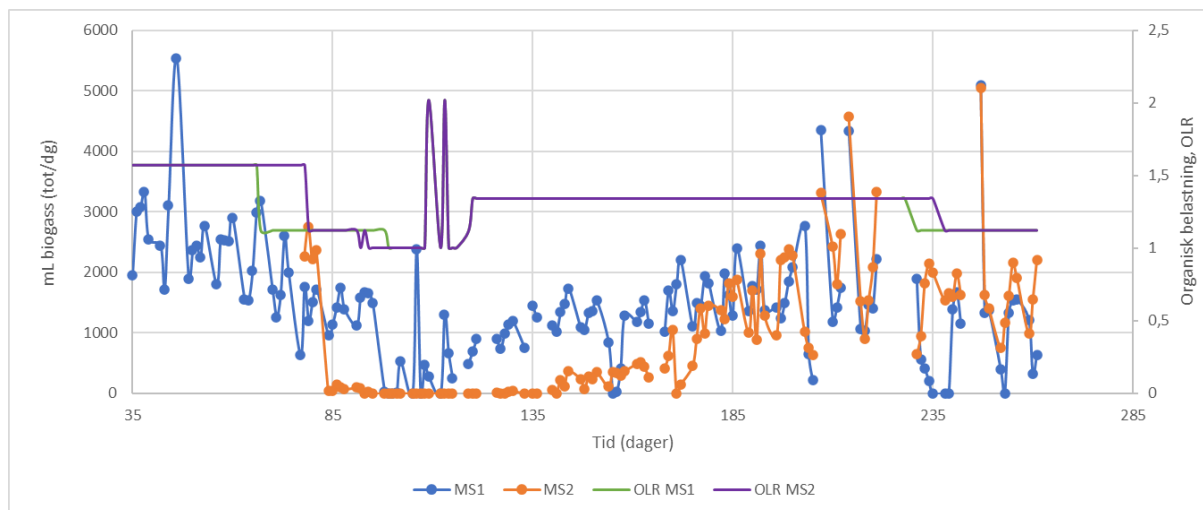
I kontinuerlig test ble GF tilsatt to CSTR over en varighet på ca. 250 dager, med økt mengde fett blandet inn i substratmikts med storfe gjødsel. Kontinuerlig prosess med UV og MS ble driftet i omtrent 270 dager (driftsparametere for de ulike reaktorene er vist i tabell 3a-c, materialer og metoder). Biogassproduksjonsverdier for MS og UV de første ca. 30 dagene er ikke vist grunnet feil med gassvolummålere. Resultat for biogassutbytte (totalt) og spesifikt metanutbytte, mL CH₄ / d / g VS er vist i figurer 3-8.



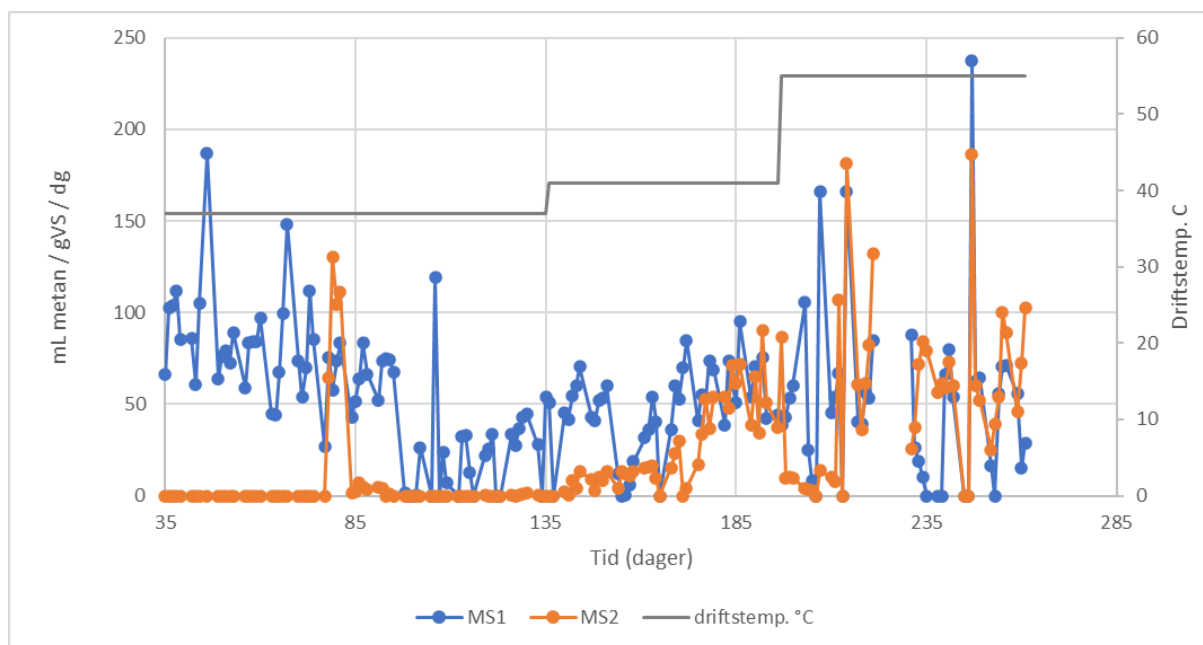
Figur 3. Biogassproduksjon (mL / dag total) og organisk belastning (OLR) i GF1 og GF2 tilsatt storfe gjødsel og grillfett.



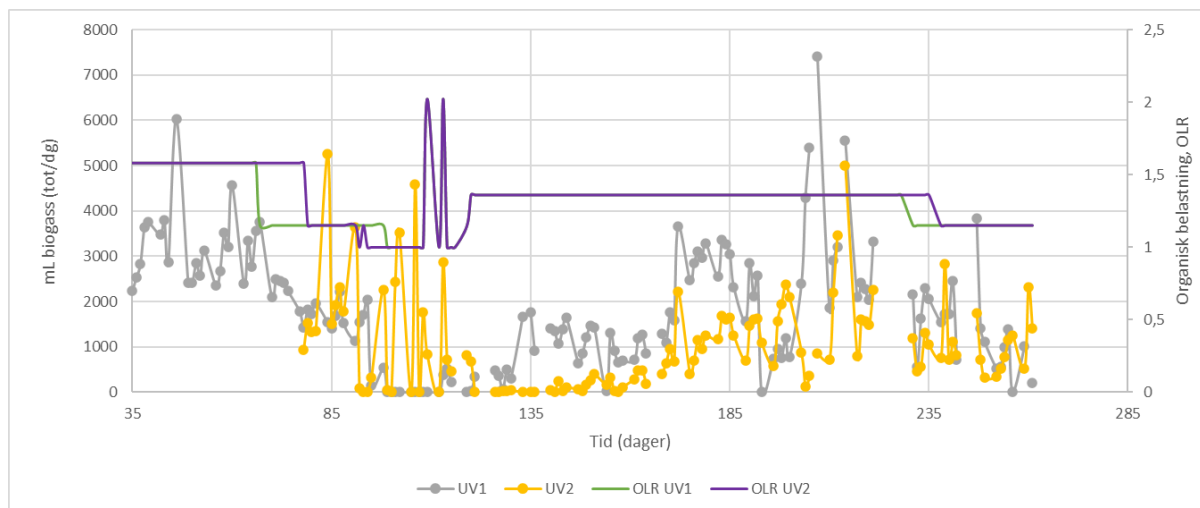
Figur 4. Spesifikk metangassproduksjon (mL metan / gram VS / dag) og temperatur i GF1 og GF2 tilsatt storfe gjødsel og grillfett.



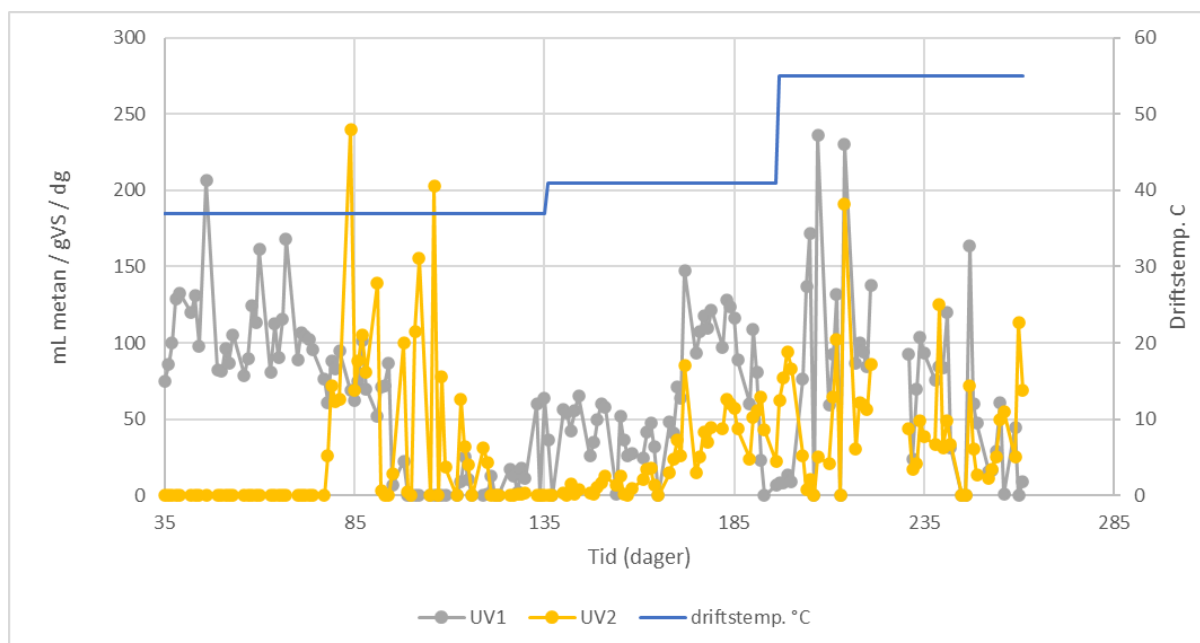
Figur 5. Biogassproduksjon (mL/ dag totalt) og organisk belastning (OLR) i MS 1 og MS 2 tilsatt storfe gjødsel og meierislam.



Figur 6. Spesifikk metangassproduksjon (mL metan / gram VS / dag) og temperatur i MS1 og MS2 tilsatt storfe gjødsel og meierislam.



Figur 7. Biogassproduksjon (mL / dag totalt) og organisk belastning (OLR) i UV1 og UV2, tilsatt storfe gjødsel og ullvaskevann.



Figur 8. Spesifikk metangassproduksjon (mL metan / gram VS / dag) og temperatur i MS1 og MS2 tilsatt storfe gjødsel og ullvaskevann.

Produksjonsverdiene i CSTR gjenspeiler i stor grad substratenes kjemiske sammensetning. Høyest metanutbytte på totalvolumbasis, som substratene er uten noen form for opparbeiding eller forbehandling, ble målt i reaktorer tilsatt GF. Med tilsetning av 200 mL GF og 300 mL CM ble det målt en gjennomsnittsproduksjon av biogass på omtrent 33 liter / dag (fig 3). Spesifikk metanproduksjon (mL metan / gram VS) ble målt til omtrent 300 mL i samme periode (fig 4). Sammenlignet med storfe gjødsel, målt i dette forsøket i CSTR til omtrent 150 mL metan / g VS, gav innblanding av 200 mL GF en økning av metanutbytte på omtrent 100 %. Ved tilsetning av høyere volum GF ble gassutbyttet noe redusert, og en mer ustabil produksjonskurve ble observert. GF ble testet kun ved mesofil driftstemperatur.

Substratene UV og MS gav generelt lavere gassutbytter enn GF, både i BMP og i kontinuerlige reaktorer. I kjemiske analyser ble det ikke detektert forbindelser som kan antas å være inhibitoriske i konsentrasjoner tilført i dette forsøket. I følge litteraturen er UV et substrat med potensielt inhibitorisk konsentrasjon av LCFA [19], og det er rapportert lave biogassutbytter grunnet tungt nedbrytbare lipidforbindelser i denne typen substrat [20]. Resultater fra dette forsøket er sammenlignbart med tidligere observasjoner der UV i blanding med storfe gjødsel gav lavt metanutbytte. Noe av forklaringen kan være at UV brukt i denne testen var lite energikonsentrert og relativt lave fettsyre konsentrasjoner – høyt vanninnhold (TS % = 1,24), som gir lav belastning og dermed påfølgende lavt metanutbytte. Metanutbyttet fra MS var også relativt lavt, dette er også et substrat med høyt vanninnhold (TS % = 0,79), og dermed lite energikonsentrert. Høyest metanutbytte fra UV og MS ble målt til hhv. 200-250 og 150 – 200 mL metan / g VS når mengde tileggs substrat var 150-200 mL og på driftstemperatur 41 og 55 °C. Økt driftstemperatur vil gi økt enzymaktivitet og nedbrytningsgrad med påfølgende økt metanutbytte i biogassreaktorer med lav belastning. Dette er sannsynligvis noe av forklaringen på økt metanutbytte med forhøyet temperatur i reaktorene. Fysiske egenskaper endres og viskositet i fettfraksjoner økes med økt temperatur. Det kan derfor antas spesielt for UV, at forhøya temperatur har påvirket substratets fysiske egenskaper og gjort særlig lipidforbindelsene lettere tilgjengelig for mikrobiell nedbrytning.

Innhold av tørrstoff (TS), organisk tørrstoff (VS), kjemisk oksygenforbruk (COD) og ammonium (NH₄⁺)

Det ble analysert i inngående substrater standard kjemisk sammensetning ved oppstart (tabell 1, materialer og metoder). Det ble i de 6 forsøksreaktorene analysert standard kjemisk sammensetning under hver fase med endra driftsparametere. Resultatene fra analysene er vist i tabell 5 – 10.

Tabell 5. TS % i reaktoreffluent.

Måned	GF1 TS %	GF2 TS %	MS1 TS %	MS2 TS %	UV1 TS %	UV2 TS %
juli	4,95	4,99	4,07	4,09	4,11	3,70
aug	4,76	4,97	2,96	3,55	3,59	3,71
sept	4,98	5,05	2,89	3,44	2,64	3,55
okt	5,22	5,51	3,63	3,64	3,56	3,41
nov	5,90	6,25	2,68	3,57	2,97	2,95
des	6,04	6,37	2,81	2,46	2,56	2,70
jan	7,08	7,55	3,33	2,45	2,17	2,73
feb	--	--	2,01	2,05	2,06	2,31

Tabell 6. VS % i reaktoreffluent.

Måned	GF1 VS %	GF2 VS %	MS1 VS %	MS2 VS %	UV1 VS %	UV2 VS %
juli	66,1	66,1	65,93	65,28	64,57	65,11
aug	65,9	66,8	72,34	75,35	75,85	73,04
sept	60,1	60,4	71,32	57,89	35,83	64,55
okt	53,5	50,4	47,4	55,8	53,46	56,56
nov	50,1	45,6	70,29	54,98	69,3	67,77
des	44,4	38,7	48,77	48,01	42,24	40,90
jan	48,5	45,4	63,17	69,09	67,36	55,94
feb	--	--	62,88	64,86	57,4	63,50

Tabell 7. VS g/L i reaktoreffluent.

Måned	GF1 VS g/L	GF2 VS g/L	MS1 VS g/L	MS2 VS g/L	UV1 VS g/L	UV2 VS g/L
juli	32,7	33,0	26,83	26,70	26,54	24,09
aug	31,3	33,2	21,41	26,75	27,23	27,10
sept	29,9	30,5	20,61	19,91	9,46	22,92
okt	27,9	27,8	17,21	20,31	19,03	19,29
nov	29,6	28,5	18,84	19,63	20,58	19,99
des	26,8	24,7	13,70	11,81	10,81	11,04
jan	34,3	34,3	21,04	16,93	14,62	15,27
feb	--	--	12,64	13,30	11,82	14,67

Tabell 8. COD g/L i reaktoreffluent.

Måned	GF1	GF2	UV1	UV2	MS1	MS2
juli	108,80	66,74	23,68	34,14	38,40	29,76
aug	75,63	59,44	--	47,47	--	32,21
sept	68,94	48,96	28,30	54,08	24,84	39,51
okt	52,46	69,06	--	--	--	--
nov	50,89	51,22	38,53	71,72	58,59	61,23
des	55,16	43,57	--	--	--	--
jan	42,01	92,26	71,40	60,44	56,67	61,65
feb	--	--	34,76	32,98	47,04	58,22

Tabell 9. COD/VS-ratio i reaktoreffluent.

Måned	GF1	GF2	MS1	MS2	UV1	UV2
juli	3,3	2,0	0,9	1,3	1,4	1,2
aug	2,4	1,8	--	1,8	--	1,2
sept	2,3	1,6	1,4	2,7	2,6	1,7
okt	1,9	2,5	--	--	--	--
nov	1,7	1,8	2,0	3,7	2,8	3,1
des	2,1	1,8	--	--	--	--
jan	1,2	2,7	3,4	3,6	3,9	4,0
feb	--	--	2,8	2,5	4,0	4,0

Tabell 10. NH₄⁺-N mg/L i reaktoreffluent.

Måned	GF1	GF2	MS1	MS2	UV1	UV2
juli	1721,72	1091,09	1121,12	1181,18	1041,04	1101,1
aug	1241,24	1221,22	--	--	690,69	860,86
sept	1181,18	1401,4	790,79	420,42	790,79	680,68
okt	1271,27	1251,25	--	--	--	--
nov	1381,38	1391,39	555,05	430,43	4694,69	5295,29
des	1401,4	1441,44	--	--	--	--
jan	1441,44	1511,51	550,55	565,65	570,57	430,43
feb	--	--	595,09	410,41	535,3	420,42

Innhold TS og VS i reaktorene (tab. 5-7) gjenspeiler verdier for biogass- og metanproduksjon. I reaktorer tilsatt GF var VS-reduksjon ved høyest metanutbytte på mellom 60 og 70 % (ikke vist). Dette er sammenlignbart med rapporterte verdier for VS nedbrytning i reaktorer med relativt høy OLR [10], og viser at omdanningsgraden var relativt høy. I reaktorer tilsatt UV og MS viste målinger at VS i perioder med ustabil prosess akkumulerte i reaktorene. Høyest VS reduksjon ble observert med driftstemperatur på 41 °C og lå på omtrent 20 %. Dette er lavt, og gjenspeiler det lave metanutbyttet i

CSTR. Målingene viser at forholdet mellom VS og COD (tab. 9) i de fleste uttak er innenfor forventet ratio. Normalt vil COD/VS være mellom 1 og 3 [8]. I målinger med COD/VS-forhold > 3 kan det antas at VS er underestimert, eller at COD er overestimert.

Ammoniumkonsentrasjoner i GF1 og GF2 var relativt stabile gjennom hele forsøksperioden, med verdier på mellom 1200 og 1500 mg/L. Dette er konsentrasjoner som kan antas ikke å inhibere biogassreaktorer [18]. I UV ble det målt relativt høy ammoniumkonsentrasjon (tab. 10) og i reaktorer tilsatt UV var ammoniumkonsentrasjonen mer ujevn gjennom forsøksperioden, med verdier fra omtrent 500 mg/L ved avslutning, til omtrent 5000 mg/L i periode med ustabil prosess, dette kan tyde på at ammoniuminhibering kan være en medvirkende faktor til lavt metanutbytte. I reaktorer tilsatt MS var ammoniumkonsentrasjonen lav på omtrent 500 mg/L (tab. 10), gradvis redusert konsentrasjon.

Fettsyresammensetning

Konsentrasjon av kortkjeda flyktige fettsyrer (VFA), langkjeda fettsyrer (LCFA) og innhold av total lipid (tot-lipid) ble målt i inngående substratfraksjoner, og i reaktoreffluent. Reaktoreffluent ble analysert ved avslutning av hver fase med økt belastning av ko-substrat. Konsentrasjon av VFA, LCFA og tot-lipid i inngående substrater er vist i tabell 11 – 14, konsentrasjon av VFA, LCFA og tot-lipid i reaktoreffluent fra Ås og Tingvoll er vist i figurer 9-12. Innhold av total-lipid i reaktorene er vist i tabell 15.

Tabell 11. Konsentrasjon VFA (mg/L) i inngående substrater.

Substrat	VFA				
	lactic	formic	acetic	propionic	tot VFA
sub-uv	93,96	1332,47	112,95	0,00	1539,39
sub-ms	0,00	213,95	140,49	144,40	498,84
sub-GF	4968,10	1196,92	823,68	997,39	7986,09
sub-cm Tv	0,00	0,00	620,60	135,54	756,14
sub-cm Ås	0,00	0,00	810,77	200,54	1011,31

Tabell 12. Konsentrasjon LCFA (mg/L) i inngående substrater.

Substrat	LCFA							tot LCFA
	Lauric C12:0	Myristic C14:0	Pentadecanoic C15:0	Palmitic C16:0	Palmitoleic C16:1	Stearic C18:0	Oleic C18:1	
sub-uv	0,44	1,52	0,43	3,10	0,00	2,12	0,92	8,52
sub-ms	1,98	9,06	0,97	32,09	1,96	10,59	20,18	76,83
Sub-gf	4,63	30,91	2,86	661,25	108,56	121,21	868,15	1797,57
sub-cm Tv	0,64	2,66	2,49	17,52	1,79	20,71	0,45	46,26
sub-cm Ås	0,66	2,89	3,66	5,89	2,79	30,09	0,56	46,52

Tabell13. Konsentrasjon total lipid (mg/L) i inngående substrater.

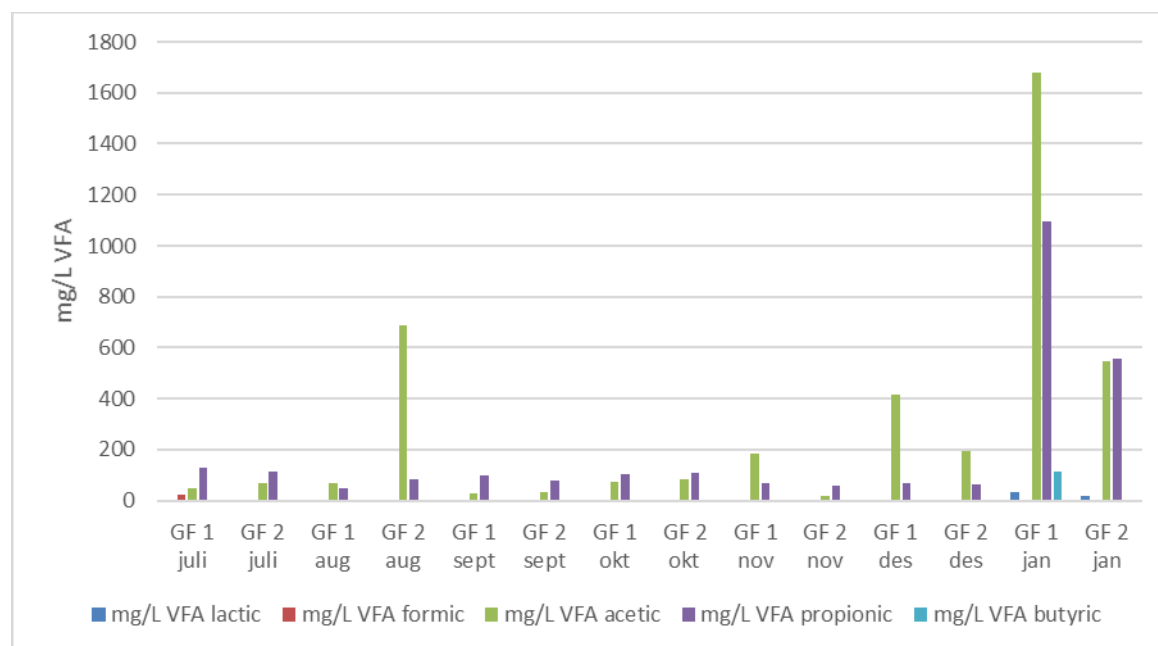
Substrat	tot-lipid mg/mL	tot-lipid mg/L
<i>sub-uv</i>	2,87	2870
<i>sub-ms</i>	0,56	560
<i>sub-gf</i>	8,7	8700
<i>sub-cm Tv</i>	1,13	1130
<i>sub-cm Ås</i>	1,15	1150

Tabell 14. Konsentrasjon VFA, LCFA og total lipid (g/kg TS) i inngående substrat..

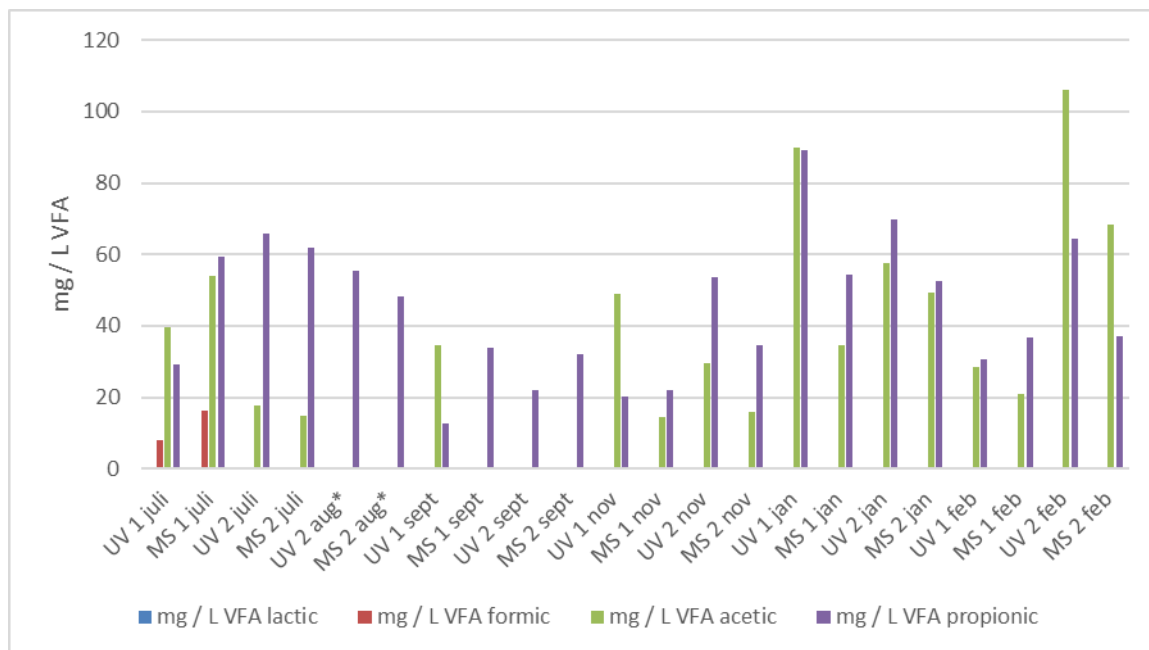
Substrat	Substrat		
	tot VFA g/kg TS	tot LCFA g/kg TS	tot lipid g/kg TS
<i>sub-uv</i>	77,0	0,4	143,5
<i>sub-ms</i>	20,0	3,1	22,4
<i>sub-gf</i>	10,0	1,7	10,9
<i>sub-cm Tv</i>	12,6	0,8	18,8
<i>sub-cm Ås</i>	16,9	0,8	19,2

Av de tre forskjellige ko-substratene er det fett fra grill som generelt har høyest innhold av fett, på totalvekt-basis. Omregna til tørrstoff (tabell 14) har ullvaskevann høyest innhold av VFA og total lipid, meierislam har høyest innhold av LCFA. Som brukt i forsøkene, er det reaktorene tilsatt GF som har fått høyest belastning av lipid-fraksjon.

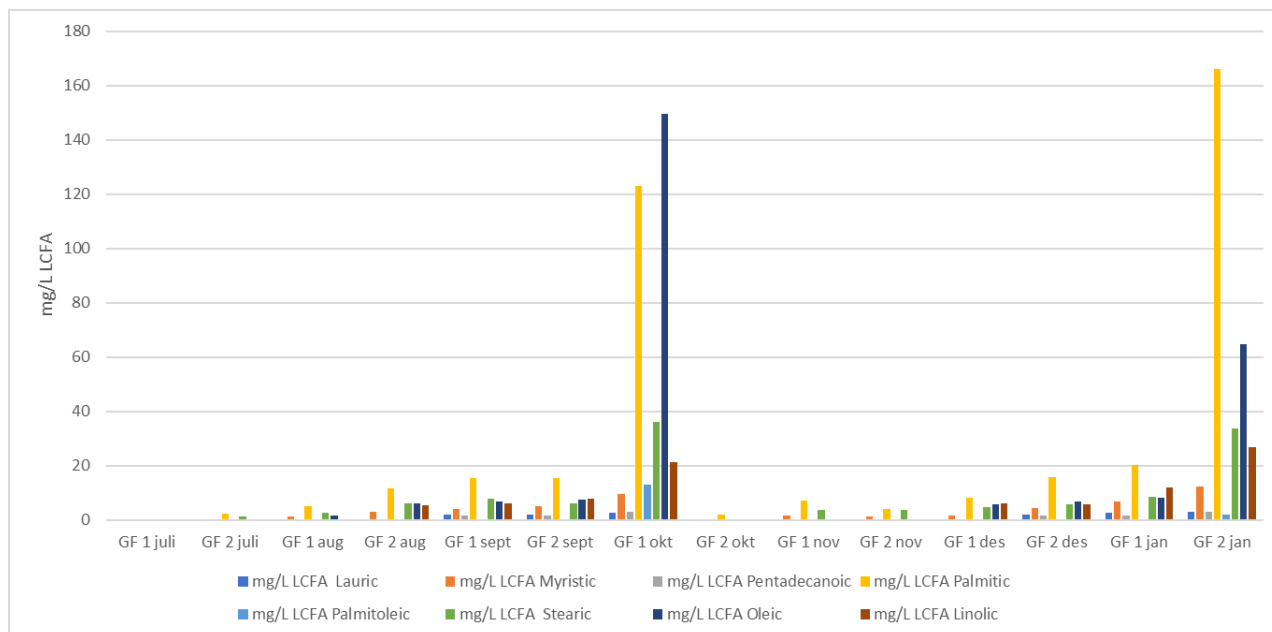
Konsentrasjoner av VFA, LCFA og total lipid i reaktoreffluenter er vist i figur 9-12. Standard kalibreringer inneholdt følgende VFA: formic- lactic- acetic- propionic- acid,



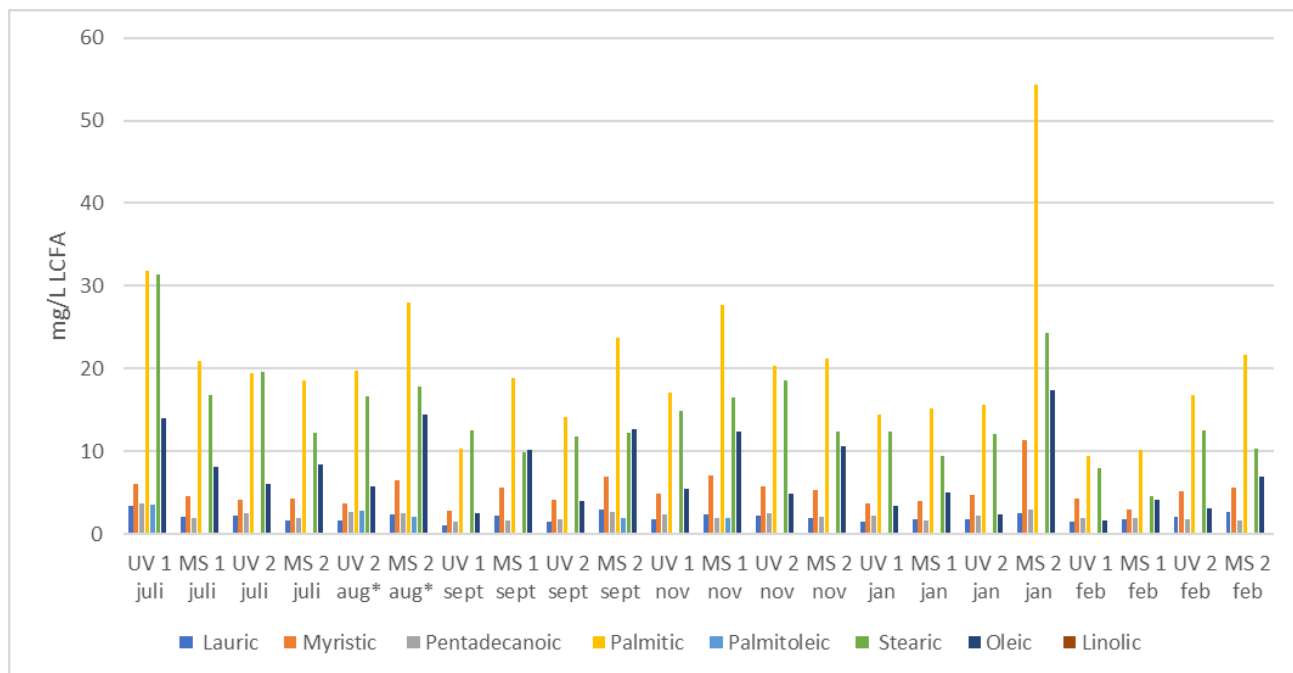
Figur 9. Konsentrasjon (mg/L) VFA i reaktorer tilsatt fettfraksjon fra grill (GF1 og GF2).



Figur 10. Konsentrasjon (mg/L) VFA i reaktorer tilsatt ullvaskevann (UV1 og UV2) og meierislam (MS1 og MS2).



Figur 11. Konsentrasjon (mg/L) LCFA i reaktorer tilsatt fettfraksjon fra grill (GF1 og GF2).



Figur 12. Konsentrasjon (mg/L) LCFA i reaktorer tilsatt ullvaskevann (UV1 og UV2) og meierislam (MS1 og MS2).

Tabell 15. Konsentrasjon (mg/L) total lipid i reaktorene med ulike driftsparametere.

Måned	GF1	GF2	UV1	UV2	MS1	MS2
juli	800	400	1480	1620	1140	1110
aug	500	300	na	1180	Na	810
sep	400	400	1270	1390	790	860
okt	700	600	na	na	na	na
nov	700	300	1320	1360	800	690
des	500	700	na	na	na	na
jan	2700	1300	1500	1570	960	1040
feb	na	na	1400	1680	830	810

Generelt var konsentrasjon VFA og LCFA høyere i reaktor tilsatt GF (fig 9-10), enn i reaktorer tilsatt UV og MS (fig 11-12). Fordelingen av de ulike VFA- og LCFA detektert var relativt lik mellom de 6 reaktorene. Av VFA ble acetat og propionat detektert i de fleste prøver, noe som er typisk for de fleste biogassreaktorer. Forholdet mellom acetat og propionat er antatt å være et mål på inhibering [21]. For noen av uttakene i dette forsøket ble kun propionat detektert, noe som kan bety at VFA-sammensetning var mulig hemmende. Av VFA er propionat beskrevet som den mest inhiberende [22], men rapporterte terskelverdier er varierende, fra lavere enn 1 g/L, opptil 6 g / L [23], [24].

Konsentrasjoner av propionat overskred ikke antatte terskelnivåer i reaktorer tilsatt UV og MS, men ved sluttmålingen i reaktorer tilsatt GF var konsentrasjoner av propionat litt i overkant av 1 g / L (fig 9). I denne fasen ble det også observert en tydelig nedgang i gassproduksjon i GF1 og GF2, og det kan antas at propionat, muligens i synergi med LCFA og NH_4^+ , forårsaket ustabilitet i prosessen. Selv om NH_4^+ konsentrasjonen i reaktorene ikke var høyere enn det som kan antas at en biogassprosess tåler, er det bevist at synergistisk inhibering fra fettsyrer og NH_4^+ gir økt risiko for inhibering fra en eller begge faktorer [3]. I samme fase ble det også detektert relativt høy konsentrasjon LCFA i GF1 og GF2, spesielt av palmitin- og oleinsyre (fig 10). Det ble også tidligere i forløpet målt høye konsentrasjoner av de samme syrene (oktober), men prosessen var da ikke markant inhibert. Det kan derfor antas at flere

faktorer forårsaket kollaps, som følge av for høy belastning lipid og påfølgende akkumulering av og inhibering fra fettsyrer i synergi med NH_4^+ . Palmitinsyre og oleinsyre er mettede fettsyrer, og beskrevet som to av de mest inhiberende LCFA'ene. Palmitinsyre har omtrent 5 ganger langsommere nedbrytningsrate enn umettede fettsyrer, og oleinsyre er den LCFA'en med høyest toksitet, med en minimum inhibitorisk konsentrasjon på 50-75 mg/L under mesofile forhold [25].

Sammenlignet med GF1 og GF2 var konsentrasjonene av både VFA og LCFA i reaktorer tilsatt UV og MS lavt. Høyest målte konsentrasjon av VFA og LCFA i reaktorer tilsatt UV var hhv. 105 og ca. 20 mg / L acetat og palmitinsyre (fig 11-12). I reaktorene tilsatt MS ble det målt maks-konsentrasjoner av VFA og LCFA på hhv. 61 og 54 g / L propionsyre og palmitinsyre (fig 11-12). Også for reaktorer tilsatt UV og MS ble det observert ubalansert ratio mellom propionsyre og acetat, dette kan være en faktor for ustabil prosess og lavt metanutbytte.

3 Bedriftsøkonomisk lønnsomhet i gårdsanlegg og større biogassanlegg.

På bakgrunn av analyser av egenskaper, og potensial-resultatene fra lab-skala forsøkene, så har vi sett nærmere på hvordan gassutbyttet og andre egenskaper til substratene påvirker bedriftsøkonomisk lønnsomhet både på gårdsnivå og i større skala. NORSØK har i lengre tid brukt et prosjekteringsverktøy utviklet av Lantbrukarnas Riksförbund (landbruksrådgivningen i Sverige) som så er videreutviklet. Blant annet er substrat som er mer tilgjengelige i Norge, slik som fiskeavfall, lagt til. Tabell 1 viser hvilke tall som er brukt for substratene i de bedriftsøkonomiske beregningene.

3.1 Vurdering av prosessoppskalering

Valg av reaktor- og driftsdesign er ofte basert på et kompromiss mellom maksimalt metanutbytte, tilstrekkelig nedbrytning av organisk materiale og prosess-økonomi. Siden de ulike gruppene av mikroorganismer har forskjellige krav til ytre faktorer (for eksempel pH-verdier og næringsbalanse) er det avgjørende å justere driftsparametrene slik at nøkkel-organismene og dere reaksjonsveier opprettholdes. Den vanligste reaktortypen, kontinuerlig omrørt tank-reaktor (CSTR) er en reaktor-type hvor et volum substrat kontinuerlig mates inn, og tilsvarende volum biorest pumpes ut. I denne typen reaktorer er tørrstoffinnhold i substratet vanligvis mellom 5 og 10 % [18], HRT normalt mellom 15 og 30 dager [26], og OLR ca. 3 - 5 kg VS / m³ [18]. Vurdering av mulig oppskalering av biogassprosess for substratene testet i dette forsøket er basert på substratenes kjemiske egenskaper. GF viste seg å fungere i en tradisjonell helomrørt CSTR, med driftsbetingelser innenfor normale parametre (HRT 20 dager, mesofilt temperaturområde). Det finnes også andre reaktortyper, for eksempel Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reaktorer. Denne typen reaktor er tilpasset prosesser med høyt vanninnhold (TS < 5 %) og brukes normalt til biogassbehandling av avløpslam. Det er i tillegg til CSTR utprøvd enkelte nye reaktortyper for biogassbehandling av substrater med høyere tørrstoffinnhold. Plug/flow er en sylindrisk reaktortype hvor substratet pumpes inn i en ende, og biorest pumpes ut i motsatt ende. Hensikten med denne typen prosess er at de ulike nedbrytningstrinnene i biogassprosessen (hovedsakelig hydrolyse, fermentering og metanproduksjon) lettere kan separeres, og at forholdene for mikroorganismene involvert dermed kan tilpasses. Reaktorer designet med formål å skape større overflate som mikroorganismene kan vokse på kalles Biofilmreaktor, og det finnes ulike versjoner av denne typen teknologi. Det er også under utprøving ulike nye teknologier som kombinerer for eksempel plug flow- og biofilm- reaktor-teknologi. For substratene MS og UV kan det tenkes at en reaktor bedre tilpasset fraksjoner med høyt vanninnhold kan være bedre egnet enn CSTR. I tillegg, spesielt for UV, bør oppholdstiden økes for å oppnå en høyere nedbrytningsgrad.

3.2 Avgrensninger og egenskaper for substrat brukt i beregningene

Tabell 1 viser egenskaper og avgrensninger gjort for substratene brukt i de bedriftsøkonomiske beregningene. For gårdsnivå er det satt en gjødselmengde på 5000 tonn, noe som tilsvarer gjødselmengden fra et stort melkebruk eller en kombinasjon av to melkebruk. Tørrstoffinnholdet for storfejødsel er satt til 7 %, noe høyere enn for målingene for gjødsel i dette prosjektet (6,00 og 6,03 % TS). Dette er blant annet på bakgrunn av at det er funnet høyere tørrstoffinnhold for de fleste måleprøvene i en måleserie gjennomført på biogasslaben på Ås for 17 gårdbrukere som vurderer biogassanlegg [27]. TS-innholdet varierte mellom 5,4 og 8,79 % TS, der verdiene i hovedsak lå nær 8 eller over 8 %.

Mengde annet substrat tilsatt utover storfejødsel på gårdsnivå er valgt ut fra at man ønsker å unngå inhibering, samtidig som man også ikke vil legge opp til en produksjon som i stor grad overstiger

behovet. For større anlegg er innblanding som kan gi prosessinhibering og tilgang på substratet det som har vært bestemmende for hvilke mengder som er brukt. Fiskeensilasje er et populært substrat, og går blant annet til anlegget til Biokraft på Skogn. Det er rimelig å anta at dette vil kunne være tilgjengelig for biogassanlegg mange steder langs kysten. Oppgitt tilgjengelig mengde grillfett fra kylling for et anlegg hvorfra vi mottok substrat i dette prosjektet, er 612 tonn. Det finnes lignende anlegg for andre produsenter. Mengde grillfett tilgjengelig for et større biogassanlegg er satt til 612 tonn. Meierislam fra Tine Elnesvågen er oppgitt til 2000 tonn med 15 % TS. Vi har vurdert at det er mye for et gårdsanlegg å ta imot alt meierislam, da det vil resultere i stor overproduksjon og redusert energiutnyttelse. Vi har derfor satt to mulige innblandingmengder på henholdsvis 500 og 1000 tonn pr år. Når det gjelder ullvaskevann, vil et ullvaskeri som behandler 100 tonn ull gi ca. 800 tonn ullvaskevann. Et mulig ullvaskeri og detaljer rundt dette er beskrevet i kapittel 4-6. Tørrestoffinnholdet i vaskevannet er lavt, med 1,24 %, noe som nok henger sammen med at ulla er behandlet i en industrivaskemaskin med betydelige mengder vann uten resirkulering av vannet. I et ullvaskeri vil man i større grad resirkulere vannet, noe som gir høyere TS. Othman et al [31] har for eksempel rapportert et tørrestoffinnhold på 2,24 % for ullvaskevann.

For storfe gjødsel har vi valgt en mengde på 50 000 tonn for større anlegg, noe som innebærer transport av gjødsel inn, og biorest ut fra et større område. For de fleste steder i Norge innebærer dette transportavstander på over 2 mil. Noen få husdyrtette områder på Jæren, i Trøndelag og Fræna/Hustadvika har tilgang på betydelig mer gjødsel innenfor samme avstand. Det bygges og planlegges anlegg i Norge med storfe gjødselmengder fra 10 000 tonn – 500 000 tonn.

Virkningsgrad i tabell 16 sier noe om hvor mange prosent av potensialet ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{tonn VS}$) det er mulig å ta ut. Dette henger spesielt sammen med oppholdstid, blandingsforhold og grad av inhibering diskutert i kapittel 2. Foreløpig er det få resultater med ABR eller UASB- teknologi, og vi har derfor forutsatt tradisjonell CSTR-teknologi og lang oppholdstid. Vi har videre antatt mesofil prosess og behandling ved 37°C . Med blandingsforhold som begrenser inhibering og tilpasset oppholdstid har vi antatt en gassproduksjon tilsvarende 90 % av potensialet for alle substratene. Potensialet er hentet fra BMP-tester gjengitt i kapittel 2. Verdien for fiskeensilasje er hentet fra tilsvarende forsøk rapportert i 'Substrathandboken' [17].

Tabell 16. Egenskaper substrater for biogassutbytte og sammensetning, og avgrensninger for bruk i bedriftsøkonomiske beregninger.

Substrat	TS [%]	VS [% av TS]	Vol CH_4 [%]	Virk. grad [%]	Potensial [$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{tonn VS}$]	Begr. faktor mengde	Mengder gårds-nivå [tonn]	Mengder større anlegg [tonn]
<i>Storfe gjødsel</i>	7	80	60	90	213	Transport-kostnad	5000	50000
<i>Fiskeensilasje</i>	35	93	65	90	930	Prosess-inhibering	200, 500	10000
<i>Grillfett kylling</i>	30	95	70	90	611	Tilgjengelig mengde	200, 500	612
<i>Meierislam</i>	15	0,79	60	90	517	Tilgang fra meieri	500, 1000	2000
<i>Ullvaskevann</i>	1,24	0,57	65	90	489	Tilgang fra ullvaskeri og Prosess-inhibering	800	800

3.3 Forutsetninger bedriftsøkonomiske vurderinger

Tabell 17, 18, og 19 viser forutsetninger bruk i de bedriftsøkonomiske beregningene for henholdsvis gårdsanlegg og større anlegg.

Tabell 17. Felles forutsetninger bedriftsøkonomiske beregninger.

Lånerente	5 %
Egenkapital	25 %
Avskrivningstid	15-20 år

Tabell 18. Forutsetninger brukt i beregninger av bedriftsøkonomisk lønnsomhet for gårdsanlegg.

Personalkostnader	350 000 kr
Drift og vedlikeholdskostnader	50 000 kr
El-virkningsgrad CHP/kraftvarmeverk	35 %
Varme-virkningsgrad CHP/kraftvarmeverk	55 %
Tap CHP/kraftvarmeverk	10 %
Pris elektrisitet og varme til eget bruk	0,85 øre/kwt
Pris elektrisitet til nett	0,40 øre/kwt
Tilskudd Innovasjon Norge eller ENOVA, investering	45 % av investeringskostnader
Tilskudd Landbruksdirektoratet, levering av gjødsel	Per dyr i hht. Tabellverdier. 2770 kr/melkeku i 2021.

De fleste som tenker å etablere et gårdsanlegg ønsker å utnytte gassen i et kraftvarmeverk (CHP) for produksjon av strøm og varme, og da for eget bruk. Det finnes per i dag ikke lønnsomme løsninger for oppgradering og bruk av gassen på egen gård. Vi har her sammenlignet to ulike scenario med en utnyttelse av egenprodusert strøm og varme på 50 % og 30%. Overproduksjon av strøm selges på nett, mens overproduksjon av varme i praksis ikke finner noen anvendelse og/eller har noen verdi.

Tabell 19. Forutsetninger brukt i beregninger av bedriftsøkonomisk lønnsomhet for større anlegg.

Personalkostnader	2 500 000 kr
Drift og vedlikeholdskostnader	2 975 000 kr
Transportkostnader gjødsel og substrat	1 000 000 kr
Transportkostnader biorest	1 000 000 kr
Pris biometan	5 kr/Nm ³
Fordeling tilskudd landbruksdirektoratet mellom gårdbruker som leverer og anleggseier	50 %/50 % 833 kr/tonn gjødsel*2x-x ² , der x er andel tørrsøff i gjødsel

Tabell 20. Innhold av nitrogen, fosfor og kalium for substratene brukt i de bedriftsøkonomiske beregningene. NH₄⁺-verdier hentet fra tabell 10.

Substrat	N-total [kg/tonn]	P-total [kg/tonn]	K-total [kg/tonn]
Storfe gjødsel [28]	3,04 (0,8 NH ₄ ⁺)	0,51	4,1
Fiske-ensilasje [29]	21,3	2,37	2,27
Grillfett kylling	0,3 (NH ₄ ⁺)	-	-
Meierislam [30]	8,6 (7,6 NH ₄ ⁺)	5,5	1,1
Ullvaskevann [31]	0,2-0,6 (1,57 NH ₄ ⁺)	0,02-0,05	1-1,5

For større anlegg tenker de fleste bedrifter produksjon av drivstoff for salg til eksterne kunder. Et gårdsanlegg krever i utgangspunktet oppfølging av gårdbrukeren, mens et større anlegg krever oppfølging av flere personer. I disse beregningene er det brukt 5 ansatte som antatt behov for personell for et stort anlegg. Drifts- og vedlikeholdskostnader er satt basert på de få erfaringstallene som finnes, og dette kan anses som et av de mest usikre estimatene. For større anlegg med betydelige mengder storfe gjødsel vil bioresten i stor grad tas tilbake til landbruket. Det vil da påløpe kostnader for transport av gjødsel og substrat inn, samt biorest ut fra biogassanlegget. Kostnader forbundet med lagring og spredning av biorest er ikke tillagt anlegget. Dette løses forskjellig for forskjellige anlegg. Flere anlegg leier lager hos gårdbrukeren. Avhengig av innhold av nitrogen, fosfor, kalium og tungmetaller i substrater vil det likevel kunne være behov for foredling av bioresten. Vurdering av biorest har i utgangspunktet ikke vært en stor del av dette prosjektet. Verdier for tilsvarende substrater målt andre steder, og en betraktning basert på innblanding for bruk av bioresten er tatt med. Det må presiseres at dette er tall fra litteraturen som kan avvike ganske betydelig fra reelle tall for aktuelle substrat. Tabell 20 viser Nitrogen (N), Fosfor (P) og kalium (K)-verdier for substratene. I tillegg er tallene for NH₄⁺ fra tabell 10 (kapittel 2.3) satt inn for sammenligning. Det er relativt stor forskjell på innhold av næringsstoffer. Storfe gjødsel har betydelige verdier for N og K. Fiskeensilasje har både høyt N- og betydelig P-innhold. Meierislam har høyt innhold av N og P, N-innholdet bekreftes av NH₄⁺-målinger gjort i dette prosjektet. Ullvaskevann og grillfett fra kylling er relativt fattig på næringsstoffer, men ullvaskevann inneholder en del kalium og målingene viser også betydelig innhold av NH₄⁺.

Reell nytteverdi og erfaringene med kostnader forbundet med foredling og salg av biorest der det gjøres er i liten grad dokumentert, men vil for de fleste anlegg ha betydelig innvirkning på totaløkonomien i prosjektet. Det er derfor gjort en enkel kvalitativ vurdering av hvilken innvirkning innblanding av substratene vil ha.

3.4 Resultater bedriftsøkonomiske beregninger

3.4.1 Gårdsanlegg

Tabell 21 viser resultatene for gårdsanlegg. En del anlegg bygges kun basert på egen gjødsel på gården. Det er verdt å merke seg den betydelige forskjellen mellom storfe gjødsel med 7 % TS og storfe gjødsel med 8,5 % TS, noe som utgjør 113 000 kWt for 5000 tonn gjødsel. Om man har høyt tørrstoffinnhold vil avhenge av infrastruktur for lagring i/ved fjøs, omrøring, vannforbruk i fjøset og eventuelt i hvor stor grad regnvann ledes til gjødsellager. Man bør lede vann som brukes i fjøset utenom kjeller og/eller

begrense vannbruken, samt unngå at uttaket av gjødsel til biogassproduksjon skjer fra åpen kum som tar inn regnvann. Med høyt vanninnhold vil man også måtte bruke relativt mer varme for å holde prosessen i gang pr. innmatet mengde i volum.

Alle substratene bortsett fra ullvaskevann gir et betydelig positivt bidrag til økonomien i anlegget med de mengdene vi har lagt inn. Ved tilsats av 500 tonn fiskeensilasje pr.år utgjør denne tilsatsen 72 % av gassproduksjonen. Tilsvarende tall for grillfett er 59 % mens ved tilsats av 1000 tonn meierislam kan den økte gassproduksjonen teoretisk utgjøre 48 % av totalproduksjonen. Med tilsats av meierislam, grillfett og ensilasje utgjør dette teoretisk en energiproduksjon på 1 004 000 – 1 863 000 kWt. Tilsats av substrater gir dermed muligheter for en redusert tilbakebetalingstid fra 12,8-15,6 år til under 10 år for alle disse tre substratene.

At investeringskostnaden og driftskostnadene blir høyere, har større innvirkning enn at man bruker en mindre del av energien selv. Tilbakebetalingstiden øker relativt lite når man går fra 50 % til 30 % utnyttelse av energien. Dette henger sammen med at tilskuddet fra Landbruksdirektoratet i de fleste tilfeller utgjør over 50 % av inntektene til anlegget. Det er ingen garanti for at støttesatsen eller rammene fra Landbruksdirektoratet vil opprettholde et slikt tilskudds nivå og det er viktig med fokus på bedre utnyttelse av egenprodusert energi. Gjennom kartlegging av eget strømbehov på timesbasis (AMS-data) kan man bedre tilpasse bruk opp mot produksjon og bedre utnyttelse av overskuddsvarmen. Både gårdsmeieri, drivhus og salg av vannbåren varme til oppvarming av offentlige og private bygg vurderes tatt i bruk opp mot slike anlegg. Det vil i tilknytning til et slikt anlegg også være betydelige mengder egenprodusert strøm som vil måtte leveres på nettet. Per i dag er det få landbruksmaskiner som kan utnytte en slik overproduksjon på elektrisitet, men flere piloter er i gang, blant annet på Apelsvoll og på Ås, og utbredelsen av elektriske maskiner ellers indikerer at dette kommer til å bli en realitet. Tilsats av tilleggssubstrat kan gi muligheter, og vil kanskje være nødvendig for å tilpasse produksjonen til et slikt behov.

Tabell 21. Resultater, bedriftsøkonomiske beregninger; Mengder (tonn), Tørrstoff (TS %), Andel av gassproduksjonen, teoretisk energiinnhold gass (MWt = 1000 kWt), Tilbakebetalingstid 50 % og 30 % utnyttet til eget behov, Tilbakebetalingstid 50 % utnyttet til eget behov og 25 % økning i henholdsvis investeringskostnad og drifts- og vedlikeholdskostnader. IL = Ikke lønnsomt.

Substrat	Tonn	Substrat % av TS	Andel gassp. [%]	Teor. MWt	T 50/50	T 30/70	T_INV + 25	T_Drift + 25
<i>Storfe gjødsel</i>	5000 (7 % TS)	100	100	524	15,6	17,6	19,5	IL
<i>Storfe gjødsel</i>	5000 (8,5 % TS)	100	100	637	12,8	15,1	16,1	IL
<i>Fiskeensilasje</i>	200	17	51	1060	9,1	11,5	14,1	16,2
<i>Fiskeensilasje</i>	500	33	72	1863	5,4	6,8	8,5	8,4
<i>Grillfett kylling</i>	200	15	37	831	10,8	13,2	13,5	15,4
<i>Grillfett kylling</i>	500	30	59	1290	7,2	9	8,8	8,7
<i>Meierislam</i>	500	18	31	764	11,9	14,3	IL	17,8
<i>Meierislam</i>	1000	30	48	1004	9,3	11,4	15,6	12,5
<i>Ullvaskevann</i>	800	3	2,6	538	IL	IL	IL	IL

Det er viktig å merke seg NPK-verdiene i tabell 20. Hvis verdiene er representative vil man få utfordringer med fosfor-innholdet med tanke på ny gjødselvereforskrift med forslag om tak på fosformengder på 2,4 (Miljødirektoratet sitt forslag) eller 3,0 (Landbruksdirektoratet sitt forslag) kg fosfor/dekar/år. Separasjon av bioresten kan være en løsning, et fordyrende element, men kan også gi nye muligheter. Flere prosjekter, for eksempel MAFIGOLD-prosjektet til NIBIO vil fremover se på muligheten for å lage jordprodukter av den tørre delen og/eller bruke den som strø i fjøset.

Det er ikke nødvendig å hygienisere grillfett fra kylling eller meierislam. Fiskeensilasje vil man muligens motta kun i ensilert form og en påkrevd hygienisering ved 70° C i en time vil bety en betydelig merkostnad for anlegget. Vi har på grunnlag av dette også brukt en investeringskostnad 1 MNOK høyere enn for et gårdsanlegg som behandler kun egen gjødsel. Det er mulig at driftskostnadene (+25) forbundet med å måtte hygienisere på gården bedre gjenspeiler det som blir situasjonen for et reelt anlegg med fiskeensilasje. Tilbakebetalingstid på 16,2 og 8,4 år (for henholdsvis 200 og 500 tonn fiskeensilasje) er derfor mer sannsynlig.

Det er ikke gitt hvordan substrateier vil forholde seg til et gårdsanlegg som ønsker å få tak i tilleggssubstrat. Det er mulig at man kan få betalt for å ta imot substrat, men dette vil avhenge av lokale forhold og hvilke avtaler substrateier har for avtak av substratet per i dag. Vi har i disse beregningene tatt utgangspunkt i at substratet blir tilkjørt uten kostnad. Det er rimelig å anta at det vil være fordelaktig for gårdsanlegg å organisere seg og opptre som en enhet for mottak av substrat slik at substrateier ikke får så mange aktører å forholde seg til. 2000 tonn meierislam fra Tine Elnesvågen vil for eksempel kunne forsyne 2-4 gårdsanlegg med substrat. Foreløpig er det få gårdsanlegg, men dette kan være en aktuell modell å tenke rundt ved prosjektering av flere anlegg i samme område i tilknytning til et meieri.

3.4.2 Større biogassanlegg

Tabell 22 viser resultatene for større biogassanlegg. Sammenligningen er ikke gjort på samme premisser som for gårdsanlegg, i og med at det nok for større anlegg i praksis vil være slik at man blander inne flere ulike tilleggssubstrater. Tabellen viser likevel hvordan tilsats av substratet påvirker produksjonen. Selv om tilleggssubstratet utgjør en liten andel av totalt antall tonn innmatet mengde, vil tørrstoffandelen være opp mot 50 %. På volumbasis er dette ca. 17 vol % [10] som er opp mot de terskelverdiene for maksimal innblanding før man får prosesskollaps som er funnet i kontinuerlige lab-skala forsøk [Solli,2014]. Bidrag fra ensilasje og frityrfett er, i og med høyt potensial, så stort at andelen gassproduksjon utgjør henholdsvis 72 – 86 % (33 og 50 % av innmatet TS) og 17 % (5 % av innmatet TS).

Tabell 22. Bedriftsøkonomiske beregninger, større anlegg; Mengder (tonn), Tørrstoffandel (TS %), Andel av gassproduksjonen og inntekter, Tilbakebetalingstid, og tilbakebetalingstid med 25 % økning i investeringskostnad og drifts- og vedlikeholdskostnader og 25 % reduksjon i inntekter.

Substrat	Tonn	Substrat % av TS	Andel gassp. [%]	Andel inntekt	T	T_INV + 25	T_Drift + 25	T_Inn - 25
<i>Fiskeensilasje</i>	5000	33	72	68	7,5	8,3	13	IL
<i>Fiskeensilasje</i>	10000	50	84	74	2,7	2,8	3,3	4,6
<i>Grillfett kylling</i>	612	5	17	16	IL	IL	IL	IL
<i>Meierislam</i>	2000	8	17	31	IL	IL	IL	IL
<i>Ullvaskevann</i>	800	0,28	0,04	11	IL	IL	IL	IL

Beregningene våre viser at et anlegg med kun 50 000 tonn storfegjødsel ikke er lønnsomt, dette i hovedsak på grunn av betydelige avstander/transportkostnader og at storfegjødsel har et relativt lavt biogasspotensial. En viktig forskjell mellom et gårdsanlegg og et større anlegg er at man i et større anlegg vil søke å motta tilleggssubstrat med gate-fee, og at gate-fee utgjør en betydelig del av inntektsgrunnlaget. Det vil for eksempel for et slikt anlegg være aktuelt å ta imot et substrat som ullvaskevann eller lignende substrater med relativt lite gasspotensial gitt at man får godt betalt for det. Kombinasjonen gate-fee og høyt gasspotensial gjør at andelen av inntekter som kan tilskrives tilleggssubstratet ligger i området 16 – 74 % for meierislam, grillfett fra kylling og ensilasje. Det er mulig å realisere et anlegg på kun gjødsel og fiskeensilasje. For de andre substratene vil de måtte brukes som del av en substratmiks som til sammen bidrar nok til gassproduksjon og en biorest av god kvalitet. Som beskrevet for gårdsanlegg så vil fiskeensilasje og meierislam kunne gi både muligheter og utfordringer for bioresten. Man kan anrike bioresten med nitrogen, men kan også komme i konflikt med regelverket når det gjelder fosfor-innhold. Disse kostnadene er ikke tatt med i beregningene.

Et viktig spørsmål for gjødselbaserte større anlegg er verdsetting av egenskapene til gjødsel utover gasspotensialet, det vil si verdien av mikronæringsstoffer og bufferkapasitet som i stor grad sørger for prosessstabilitet som man ellers ikke ville hatt. Det er bortimot umulig å bryte ned disse tilleggssubstratene alene, både med tanke på hva mikrobene håndterer og hva som er mulig mekanisk. Mekanisk sett er øvre grenseverdi for tørrstoffinnholdet/at noe skal være pumpbart 12-14 %. Hos flere anlegg er storfegjødsel som prosessvann/fortynningssubstrat et viktig element. Samrøtningseffekt, det vil si at substratene brytes ned mer ved samrøtning enn hver for seg er også av betydning og lite dokumentert. Dette er noe det er rimelig at man vil ta mer høyde for i avtaler mellom gårdbrukere og anleggseier i årene som kommer.

Transportkostnad er en viktig variabel som vi ikke har sett betydelig på i denne omgang, det vil si vi har brukt estimat og har ikke sett på reell plassering og hvordan det vil slå ut. De reelle kostnadene vil kunne avvike fra det vi har brukt her. Separasjon av gjødsel for å redusere transportkostnad og kun ta inn den tørre fraksjonen og la "nitrogenet bli igjen på gården" er en mulighet og noe som vil bli testet ut i tiden som kommer.

Det er ellers verdt å reflektere nærmere rundt det faktum at aktører som planlegger biogassanlegg av denne størrelsen lettere kan realisere sine planer ved å organisere seg opp mot andre etablerte eller lignende biogassanlegg i regionen. En gjennomtenkt og etablert struktur for fyllestasjoner for flytende og komprimert biogass vil være nødvendig for at transportaktører kan bytte til gasskjøretøy.

3.4.3 Oppsummering

Tabell 23 oppsummerer egenskapene til substratene. Ullvaskevann må nok befinne seg i nærheten av et biogassanlegg slik at det kan fungere som prosessvann (lavere gate-fee) og at eventuelt N i vaskevannet kan gi merverdi til bioresten for at det skal bli en god løsning både for substrateier og anleggseier. Meierislammet er lett nedbrytbart og kan gi betydelig gassproduksjon og har næringsstoffinnhold som kan gi bedre biorestkvalitet. Grillfett fra kylling gir økt gassproduksjon, har ikke særlig innhold av næringsstoffer og kan være utfordrende for anlegget både prosessmessig og mekanisk ved avleiring av fett. Fiskeensilasje har gode egenskaper både med tanke på gassproduksjon og biorestkvalitet, men man må ta prosessmessige hensyn ved valg av innblandingsforhold. For gårdsanlegg kan en eventuell hygienisering av fiskeensilasje føre til for høye investerings- og driftskostnader.

Tabell 23. Oppsummering egenskaper, betydning for biorest, gasspotensiale og mulig grunnlag for gate-fee.

Substrat	Egenskaper	Betydning for biorest	Gass-potensiale	Gate-Fee
Storfegjødsel	Bidrar til bufferkapasitet og med mikronæringsstoffer	Økt NH ₄ ⁺ -N. Berikes	L	Tilskudd
Fiskeensilasje	Mye nitrogen og fett, Prosessinhiberende Må hygieniseres?	Høyt N- og P- innhold. Mulighet og utfordring	H	+
Frityrfett	Mye fett, Prosessinhiberende og mulig utfordrende mekanisk		H	+
Meierislam	Medium potensial.	Høyt N- og P- innhold Mulighet	M	(+)
Ullvaskevann	Lavt TS-innhold, prosessinhiberende Prosessvann?	Noe (eller lite?) N og P. Mye K. Såperester og salt mulig utfordring.	L	(+)

Kapittel 3 viser hvilke betraktninger og valg man står i ved forprosjektering av biogassanlegg. Kapittel 3.1 trekker frem annen reaktorteknologi og at man kan oppnå forbedret nedbrytningsgrad for tradisjonelle substrat som husdyrgjødsel og/eller at man bør vurdere å bruke annen type reaktorteknologi som egner seg spesielt til enkelte substrat. Det er stort fokus på teknologiutvikling og FoU som helt sikkert vil ha fremtidig betydning, men per i dag bygges de fleste anlegg med eksisterende teknologi. Med det utgangspunktet viser vurderingene som er gjort for de bedriftsøkonomiske beregningene at det fortsatt er mye å lære. Hvilken nedbrytningsgrad har og kan man forvente av substratene i en konvensjonell CSTR-reaktor sett opp mot hva man oppnår i lab-skala forsøk? Usikkerhet i tallgrunnlaget for eksempelvis faktisk nedbrytningsgrad i en kommersiell reaktor og kostnader og inntekter forbundet med foredling og bruk av biogjødsel gjør at risikoen forbundet med å ta en investeringsbeslutning er relativt høy. Dette gjelder spesielt for større anlegg der verdikjeden er mer omfattende, Dette reflekteres med at det er relativt få slike anlegg som realiseres pr. år. Tradisjonelt sett vil man i en forprosjekteringsfase raskt tenke større anlegg, *economy of scale* og mer substrat, men store avstander for frakt av substrat i det meste av landet og ulikt gassutbytte og næringsstoffinnhold i substratene gjør at det ikke nødvendigvis blir bedriftsøkonomisk lønnsomt. Prosjektet har i lys av det også sett på muligheten for alternativ utnyttelse i gårdsanlegg. I prosjektperioden har det blitt realisert en del nye gårdsanlegg, der man tenker å ta imot tilleggssubstrat og der gassen brukes til kraftvarmeproduksjon. I tillegg til forbedret tilskudd fra Landbruksdirektoratet henger realisering av flere anlegg sammen med at verdikjeden og bruk av energi og biorest er enklere. Hvilken utnyttelse som gir best mulig klimanytte, dvs. reduserte klimagassutslipp, forventes samtidig fremover i større grad bli avgjørende for hvilke anlegg som blir realisert. Markedet og prising av substrat samt transportkostnader styrer i stor grad hvilke substrat som går hvor. I hvilken grad man får opp mindre gårdsanlegg/grendeanlegg som lykkes vil derfor få stor betydning for hvor vi vil se utnyttelsen av disse substratene.

4 Case Tingvoll ull

Tingvoll Ull AS er et nyoppstartet firma stiftet av Arnar Lyche og Rose Bergslid. Tanken bak selskapet er å samle inn pigmentert ull for å produsere gensere. I 2021 er det tenkt produsert 500 gensere med garn spunnet på Selbu spinneri. Dersom bedriften går bra skal det samles inn pigmentert ull fra hele Møre og Romsdal som skal vaskes på Tingvoll. Det vil bli omtrent 100 tonn ull.

Høsten 2016 fikk Arnar Lyche et etablererstipend for å utrede mulighetene for å etablere en helnorsk verdikjede for farget norsk ull. Vinteren 2017 ble det utarbeidet en arbeidsplan med seks prosesspunkter. Ett av disse var å utrede et ullvaskeri. Samme høst dro en gruppe fra NORSØK, Krivi vev m.fl. til Gotland for å se på Ullkontoret sitt ullvaskeri, samt et spinneri, et gårdsbruk med gotlandssau og utsalg for egne ullprodukter og et arkitekt/designfirma som blant annet benytter ull til lydemping i offentlige bygg. I etterkant av turen ble det bestemt at «Tingvoll Ullvaskeri» skulle planlegges og bedriftsrådgiver Bjørn Erik Johnsen i Kristiansund ble leid inn for å lede prosessen. Utgangspunktet var at vaskeriet skulle ha kapasitet til å vaske all norsk ull.

I september 2018 var Viktor Gautvik fra Krivi vev, Kristin Sørheim fra NORSØK, og Arnar Lyche i møte med Nortura/Norilia i Oslo for å sjekke ut interessen der. Konklusjonen fra møtet var slik: *«Norilia mener en god forretningsplan er veien å gå for å få mer avklaring rundt slike spørsmål og sa seg villig til å delta med råd og innspill i arbeidet med forretningsplanen. De har interesse av å se på potensialet for en helnorsk verdikjede. Hvorvidt Norilia skal være med på veien videre blir tatt stilling til når endelig forretningsplan foreligger.»*

I desember 2018 var Viktor Gautvik, Bjørn Erik Johnsen og Arnar på besøk i Rauma Ullvarefabrikk for å diskutere vaskeriplanene der. De svarte at hvis Tingvoll Ull blir realisert kan det bli en viktig kunde, men de kunne ikke love noe.

På bakgrunn av møtene ble ullvaskeriplanene moderert. Målet er nå å etablere et regionalt vaskeri for pigmentert ull. Kapasiteten på et eventuelt vaskeri justeres ned til som på Gotland.

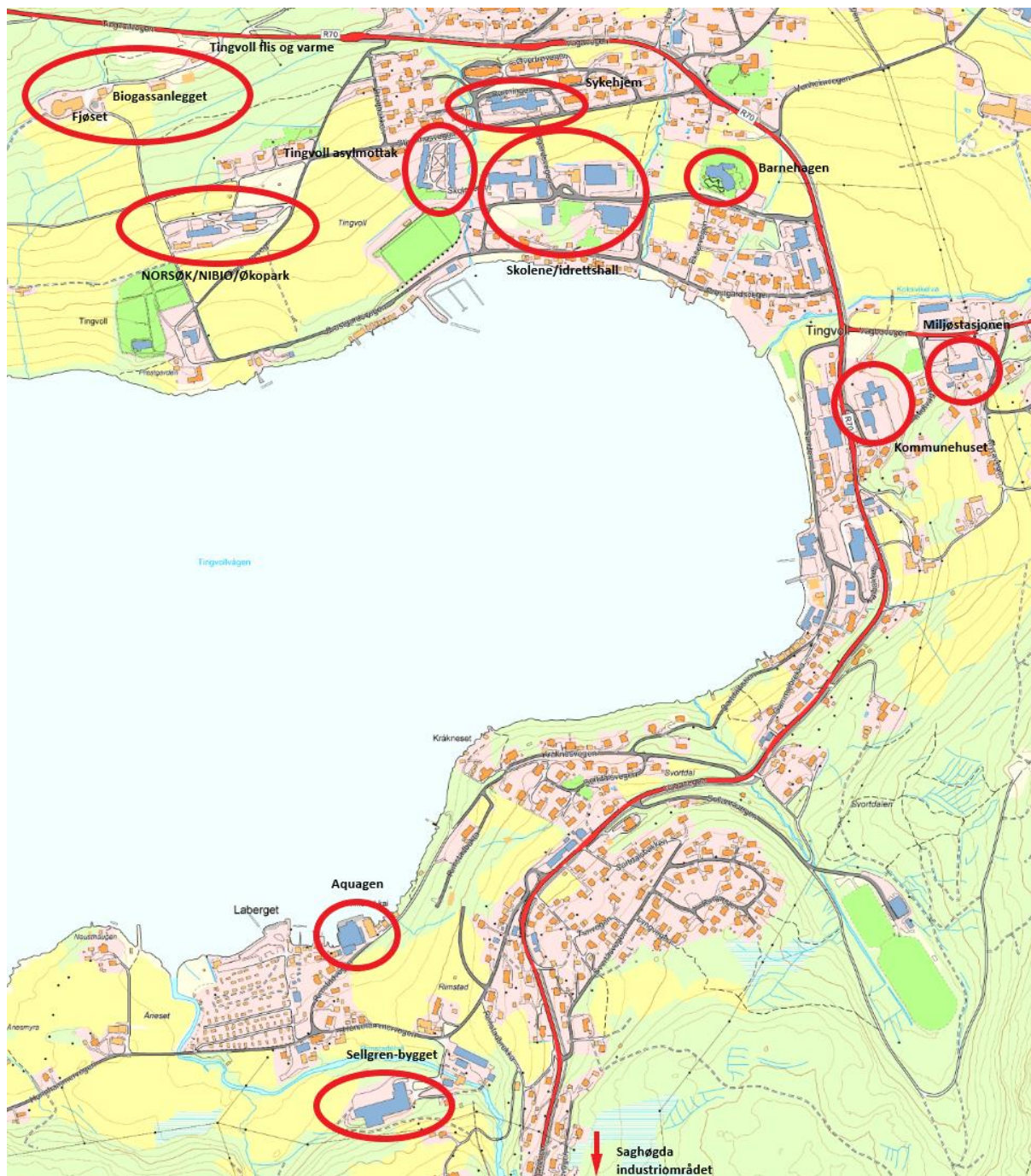
Per 2021 har Tingvoll Ull blitt aksjeselskap og har hatt strikkekonkurranse for gensere. Arnar vil først prioritere å teste ut markedet for ullprodukter med lokal, pigmentert ull som råvare.

Det er tenkt at en industrivaskemaskin skal kjøpes inn i første omgang for å begynne i det små og høste noen erfaringer. Dersom markedet vil ha ullproduktene til Tingvoll ull, er realisering av ullvaskeri høyaktuelt.

4.1 Aktører i Tingvollvågen

Ulike aktører er vurdert i «Case Tingvoll Ull» der hensikten har vært å se på i hvilken grad etablering av ny grønn virksomhet kan gi bedre utnyttelse av råstoff, energi og arbeidskraft tilgjengelig lokalt. I tillegg til aktørene i Tingvollvågen er det næringsvirksomhet på Saghøgda som kunne vært vurdert sammen med aktørene i Tingvollvågen. De er ikke tatt med i denne omgang.

I Tingvollvågen i Tingvoll Kommune ligger kommunesenteret og flere offentlige bygg, herunder skoler og sykehjem (figur 13). Tingvoll gard med blant annet NORSØK, NIBIO og Tingvoll Økopark holder til på nordsiden av vågen. Det er ellers flere melkebruk i Vågen og nært Vågen. På sørsiden av Vågen holder også AquaGen til, som produserer rogn av laks og regnbueørret. Tingvoll Flis og Varme AS eier og drifter et varmesalganlegg på nordsiden, ved RV70, som leverer varme til kommunale bygg, Tingvoll asylmottak og Tingvoll gard. Tingvoll Ull vurderer lokalisering av et mulig vaskeri/renseri for ull på sørsiden. En mulig lokalisering kan være det gamle Sellgren-bygget, der man tidligere hadde tekstilindustri og der det er godt med plass tilpasset et ullvaskeri.



Figur 13. Kart over Tingvollvågen

4.1.1 Tingvoll Flis og Varme

Tingvoll Flis og Varme AS leverer i dag ca. 2 GWh fjernvarme til Tingvoll Kommune, Tingvoll Økopark og Norsk Senter for Økologisk Landbruk. Tingvoll videregående skole skal kobles til i 2021. Flis til anlegget er lokalprodusert fra virke fra Tingvoll. Anlegget har en biokjel på 850 kW.

4.1.2 Tingvoll gard biogassanlegg

NORSØK har siden 2011 hatt et FoU-anlegg for biogass tilknyttet den økologiske melkeproduksjonen på Tingvoll Gard. Anlegget bygges i disse dager om for fortsatt FoU-virksomhet. Anlegget skal kunne teste og vurdere effekten på prosessen og nedbrytning som funksjon av temperaturer og tilsats av ulike råstoff. Anlegget har en Stirling-motor for produksjon av elektrisitet (7 kW) og varme (20 kW).

4.1.3 Aqua Gen

Aqua Gen er et FoU-orientert avlsselskap som produserer og selger befruktet rogn av laks og regnbueørret. Lokaliteten på Tingvoll produserer begge typene rogn. Lokaliteten er også sertifisert for produksjon av økologisk rogn.

4.1.4 Tingvoll Kommune

Tingvoll Kommune har mye av sin virksomhet i Tingvollvågen, med kommunehus, skoler, sykehjem, miljøstasjon, avløpsanlegg med mer. I forbindelse med oppgradering av avløpsanlegget til et rensanlegg vurderer kommunen også muligheten for biogassanlegg.

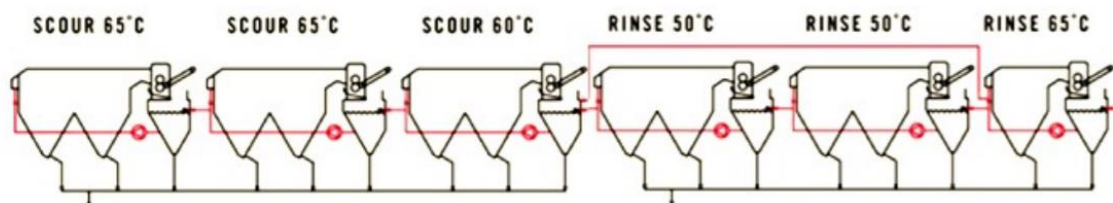
4.2 Ullvasking

Det følgende kapittelet beskriver ulike vaskeprosesser for ull, fra små anlegg til store anlegg. Hvilken type anlegg Tingvoll ull kommer til å velge kommer an på mengde ull som skal vaskes. I starten blir det er lite vaskeri, med en mulighet for å vaske oppimot 100 tonn ull i året.

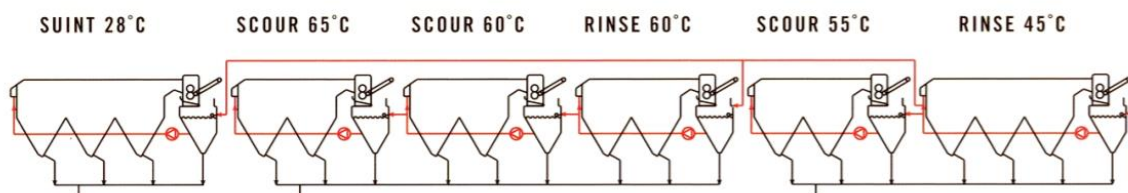
4.2.1 Vaskeprosessen

I uvasket ull utgjør sand, skitt, støv og fett rundt 30-40 % av totalvekten. Suksesskriteriet for ullvasking er at man klarer å fjerne alle typer skitt og rusk uten at fibrene i ulla rives av, floker seg eller toves. Inn i prosessen kommer råull, energi, vann og såpe. Ut kommer ferdig vasket ull, ullfett (lanolin), gjødsel og behandlet slam, samt annet avfall [32].

Vaskeprosessen består typisk av seks til åtte kar med vann. De første inneholder ulike såper, mens de siste har rent vann. Det er også mulig å ha annenhver vask og rens. Bilde 1 og 2 viser to ulike løsninger.



Bilde 1. Vaskeprosess med tre vaskekar og tre skyllekar hos Andar Holdings.



Bilde 2. Moderne maskinlinje hos Andar Holdings hvor det første karet brukes til å fjerne skitt og fett uten at ulla floker fordi vannet er kaldere enn emulgeringstemperaturen for ullfett

Etter vaskingen ristes og tørkes ulla. Ristingen er for å få ut det siste støvet som ikke løses i vann. Ull som kommer ut av den siste pressen inneholder omtrent 50 % vannvekt, mens det optimale er rundt 16 %. Den må derfor blåsetørkes til slutt [33].

Etter at vaskingen er ferdig, kan man samle ullfett fra vaskekarene. Ullfett eller lanolin har gode varmeegenskaper og er vannavstøtende. Det brukes i salver og kremer, samt for understellsbehandling

av biler for å unngå rust samt i skopusseprodukter. Råull inneholder 5-25 % lanolin. Ullen fra én merinosau kan inneholde 250–300 ml utvinnbart ullfett [34].

For å få en god vaskeprosess er det flere avgjørende faktorer [32]:

- At ulla kammes åpen før vaskingen begynner.
- Hvor mange vaskekar man har. Jo flere, jo bedre, men det krever også mer vann og energi med flere.
- Hvilket vaskemiddel man bruker.
- Vannkvalitet.
- Oppholdstid i hvert kar.
- Temperatur på vannet. Det må være minst 40 °C for at fett skal løses opp. Det vanligste er rundt 60 °C.
- Hvor effektiv pressene presser ut vannet fra forrige kar.

Muligheter for en mer ressurseffektiv prosess

Det finnes mange tiltak man kan gjøre for å få en bedre vaskeprosess. Wronz har utviklet noe kalt Wronz-systemet [32]:

- Mindre vaskekar, for å redusere vann- og energibehovet, samt fokus på å unngå overløp av vann.
- Det rene skyllevannet ble gjenvunnet som vaskevann oppstrøms i prosessen.
- Vaskevannet ble byttet ut når det var skittent i stedet for med jevne mellomrom. Dette ble gjort ved å måle væskens klarhet.
- Varmegjenvinning fra utskylt vann som brukes til å forvarme nytt vann inn i prosessen.
- Datastyrt prosess med overvåkning.

Ved New York, på Hollow Road Farm er det et småskala ullvaskeri som fokuserer på energieffektivitet. Det er også økologisk sertifisert.

Noen av tiltakene de gjør for å få en energieffektiv prosess med gjenvinning av næringsstoffer er [35]:

- Samle regnvann, som brukes som vaskevann.
- Varme gjenvinnes fra tørkeloftet og ned i produksjonslokalet.
- Solcellepanel på taket av låven.
- Ullavfall puttes inn i en egen tank for å råtne og produsere metan.
- Vaskevannet gjødsles på planter i drivhus.

4.2.2 Eksempler på ullvaskerier

4.2.2.1 Haworth Scouring Company (HSC)

All den norske ulla fra Norilia sendes til England til Haworth for vasking. Fabrikken er dimensjonert for å vaske tusen tonn ull i uka [36]. Prosessen der er svanemerket. Noen av tiltakene som gjør denne prosessen miljøvennlig ifølge Norilia [37]:

- Alt vaskevannet resirkuleres. Det brukes kun 4 liter vann per kilo ull i systemet.

- Energibruken er lav fordi varme gjenvinnes
- 20 % av ullfettet tas ut av prosessen
- Ullfiber og annet smuss samles opp og resirkuleres
- Alt avfall resirkuleres eller gjenbrukes
- Det er svært lite kjemikalier som kommer ut i avløpsvannet.
- Vaskemidlene er ikke giftig for liv i vann og blekeprosessen inneholder ikke klorbaserte midler.

4.2.2.2 Ullkontoret, Gotland

Dette er et småskala vaskeri som holder til på Gotland, i Sverige. Det drives av Jenny Andersson og Hans Bulthuis. Informasjonen i dette delkapittelet kommer fra dem.

Prosessen

- Avfetting
Fettavskilleren på 2-3 m³ tar ut 60-70 % av ullfettet.
- UV-hygienisering
- Fem vaskekar. Det må ikke være for store temperaturskjeller i vaske- og skyllekummene for å hindre filting. Vaskemiddelet som brukes er N-Foryl og soda (natriumkarbonat).

Prosessen består av fem kar og tørkeprosess.

1. kar: Behandling ved 30 °C for å løse opp protein. Urin og blod stivner med for varmt vann. Det gir ekstra god vaskeeffekt om det er litt ullfett i dette karet.
2. kar: Vask ved 60 °C med soda
3. kar: Ettervask ved 50 °C med soda og vaskemiddel
4. kar: Vask ved 30 °C med tilsats av litt vaskemiddel
5. kar: Skylling med rent vann, Høy temperatur gir bedre tørkeprosess.
Vannet presses deretter ut av ulla og ulla tørkes.

Vaskevann fra kar nummer fem gjenvinnes til kar nummer to. Det er også tenkt på å gjenvinne fra kar nummer fire til kar nummer tre. Man sparer energi og vann på å bruke vannet flere ganger, men dersom det er lenge til neste vask heller de ut og fyller i nytt. Vannet blir ofte skittent på slutten av dagen. Noen har nevnt at det holder med tre kar, men Jenny og Hans tenker at fem kar er best.

Vaskingen er tilpasset ull med lange, tykke fibre. Det brukes gafler til å skyve ulla fremover. I moderne kar er det sylindre, men man må være forsiktig, så det ikke toves. I England bruker de vann med en temperatur på 90 °C.

Det er viktig å få ut så mye vann som mulig mellom karene. Hans ønsker seg en hydrauliskdrevet valse fordi den kan presse hardere enn fjører. Spesielt etter kar 5 og før tørking er det energibesparende å kvitte seg med mye vann.

Det er varmt i produksjonsrommene. I vaskeriet er det 30 °C, dette rommet kaller de «*Lille Greklandet*». I vaskerommet er det ikke isolert.

I tørkerommet, «*Lille Afrika*», er isolert og hele 40 °C.

Det er ikke gjort analyse av vaskevannet. Ullkontoret sprer vannet på jordene sine. De sier at det gir god effekt på gressavlingen, men at det blir mindre eller ingen vekst av kløver. De tilskriver dette natrium i sodaen. Det er mulig å bruke kaliumkarbonat i stedet, men det er dyrere.

Energibruk

Det vaskes 1,5-2 tonn ull om dagen. En vaskedag er på ca. 8 timer. Det vaskes to måneder om våren og to måneder om høsten. Samlet maksimalt effektuttak for elektrisitet er 80 kW, mens mest strøm dras ved oppstart av maskinene. De har en stor sikring på 240 A som de effektabonnerer på når de bruker den.

Ullkontoret har en fliskjel på 450 kW og bruker 8 m³ flis per vaskedag for å varme opp vann og luft, i tillegg til 1000 kWt elektrisitet til motorer og annet. Ullkontoret kjøpte sitt vaskeanlegg fra Spania, og det er et gammeldags anlegg. Ullkontoret har åpne og uisolerte kar. Ifølge Ullkontoret finnes det moderne maskinlinjer der vaskekarene er isolerte og det behøves mindre varme.

Fliskjelen på 450 kW er litt liten for formålet. De har ingen akkumulatortank. Vannet varmes opp på natten med varmeslynger i bunnen på karene. Det går med mest energi til tørking.

Ullkontoret har solceller på gården, men de vet ikke hvor mye av den strømmen de bruker direkte til ullvaskeriet.

Syssetting

Per vaskedag vaskes 1,5 tonn ull, men kun 1 tonn kommer ut ferdig vasket. Det vaskes ca. 40 dager i året, to-tre ganger i uken på vår og høst.

Det går med en del tid for å hente inn, sortere, klassifisere og gjøre klar til vasking. Etter vasking må ullen pakkes i baller.

4.2.2.3 Telespinn

Telespinn er et lite spinneri i Seljord kommune. Gründeren bak er Bjørg Minnesjord Solheim. Hun har oppgitt følgende:

Prosessen

Telespinn er et minispinneri og gjør av økonomiske hensyn vaskeprosessen manuelt. De bruker en Electroluxmaskin programmert til fiber for norsk saueull.

Telespinn vasker ca. 25 kg/dag. Maskinen de har kan ta 11 kg, men det er ikke plass til mer enn ca. 4 kilo saueull og 6 kg mohairull i trommelen. Maskinen er spesiallaget. Telespinn bruker en økologisk såpe i vaskeprosessen. Lokassen må tømmes jevnlig.

Ut over denne vaskeprosessen bruker de bare mekaniske prosesser for å rense ulla. Den viktigst maskinen her er en fiber-separator fra Belfast Minimills.

Energiforbruk

Telespinn har et sentralfyringsanlegg som tilfører varmt vann både til vaskemaskinene og oppvarming av lokalene. I tillegg har de solcellepaneler som gir energi til maskinene.

Vannforbruket for full maskin er ca. 90 liter og 48 liter for 1/2 maskin. Dette gir ca 9 liter/kg.

Maskinen veier ulla og regulerer vannmengde i forhold til det som lastes inn. Temperaturen reguleres vanligvis mellom 60 - 80 grader.

4.2.2.4 Selbu spinneri

Selbu spinneri er et småskala spinneri i Trøndelag. De både vasker og spinner ulla selv. Daglig leder, Ingvild Espelien har oppgitt følgende:

Selbu spinneri har to Electroluxmaskiner, den ene maskinen tar 3,5 kg til 4,5 kg og den andre tar 9 kg. Da vaskes det på 85 grader. Fordi det vaskes på et egendesignet program, har ikke Selbu spinneri oversikt over energibruk. Det vaskes ull nesten kontinuerlig på begge maskinene i løpet av arbeidsdagene. En vask tar 5 min, men med tørking tar det 10-15 min.

4.2.2.5 Tilbud fra Electrolux

Electrolux har gitt tilbud til Arnar Lyche på tre maskiner til småskala vasking i oppstartsfasen. Disse vaskemaskinene krever spesialdesignet program og de gjenvinner ikke varmen. Det er mulig å samle opp utløpsvannet, men ifølge Tore Hollup Kristiansen i Electrolux er det fullt av sand og ullrester, det er mulig man må lage to tømminger i programmet eller lage et filter. Tore har vært ansvarlig for vaskemaskinene hos Selbu spinneri.

8 kg maskin: En vaskeomgang bruker fra 216 til 320 liter varmt vann på 80-85 °C i løpet av ca. 45- 60 minutter. (Hver vaskesyklus/skyllesyklus bruker ca. 54 liter.) De siste to til tre skyllesyklusene er det ca. 5 minutter imellom.

Ca. effekt: 8 kW

11 kg maskin: En vaskeomgang bruker fra 240 til 320 liter varmt vann på 80-85 °C i løpet av ca. 45 – 60 minutter. (Hver vaskesyklus/skyllesyklus bruker ca. 60 liter.) De siste to til tre skyllesyklusene er det ca. 5 minutter imellom.

Ca. effekt: 10 kW

14 kg maskin: En vaskeomgang bruker fra 280 til 350 liter varmt vann på 80-85 °C i løpet av ca. 50- 70 minutter. (Hver vaskesyklus/skyllesyklus bruker ca. 70 liter.) De siste to til tre skyllesyklusene er det ca. 5 minutter imellom.

Ca. effekt: 13 kW

Maskinene opprettholder temperatur eller varmer opp differanse mellom ønsket temperatur og innetemperatur. Forbruk av vann er avhengig av hvilke program og hvilken maskin som velges. Maskinene tilkobles v/k vann. På disse programmene fyller den kun varmt vann/ hett vann når dem skal vaske rå ull. Temperaturen skal være så stabil som overhodet mulig mellom 80-85 C på vannet som går inn på maskinen. Det som er viktig her er at varmtvannsberederen har stor nok effekt og kapasitet til å kunne levere ovenstående mengde vann med rett temperatur. En rørlegger kan vise til de beste løsningene når det gjelder varmtvannsberedere.

4.2.3 Energibehov og vannforbruk for Tingvoll Ull

Det er ventet at all ull fra sauer i Møre og Romsdal skal kunne behandles i ullvaskeriet på Tingvoll. 50 000 sauer med 2 kilo ull hver gir 100 000 kg ull.

Oppvarming av vann krever 0,06 kWh per liter fra 10-60 °C. Vannmengden varierer som vi har sett fra 4 liter/ kg på de beste anleggene til 25 liter/kg på småskala vaskemaskiner. Prosessenes varmeste vann varierer mellom 60 og 85 °C. Hvor varmt man ønsker vannet og hvor mange skyllinger man har er også avgjørende for vannmengde og energibruk. Ved å gjenvinne noe av varmen vil dette reduseres. Man kan spare 15-40 % på å varmegjenvinne gråvann [32].

Vaskemaskin

For en småskala (11 kg) maskin som i tilbudet fra Electrolux brukes det gjennomsnittlig:

9091	vasker i året
280	liter per vask
25	Liter/kg ull
2 545 455	liter/år
222 144	kWh

Hver vask tar 45-60 min. Det er dermed umulig å vaske all ulla i MR med ei lita vaskemaskin. Det vil også kreve svært mye vann fordi vanngjenvinning ikke benyttes.

Vaskekar

Det beste for større anlegg er å anskaffe et anlegg med kar der man kan vaske flere runder med ull før den trengs å byttes ut. Varmegjenvinning og vanngjenvinning fra de reneste til de skitneste karene er også en klar fordel med tanke på strøm- og vannforbruk..

Dersom man har vaskemaskin med bruk av 12 liter/kg og man lykkes i å gjenvinne gråvann vil man kunne gå fra 70 000 kWh til 42 000 - 60 000 kWh, dersom gjenvinning sparer 15-40 % av strømmen.

For å synliggjøre forskjellene gjør vi en beregning for vask av 100 tonn ull:

Varme på vannet	Vannmengde/kg	Energibruk (avrundet)
10-60 °C	4 liter	23 000 kWh
10-60 °C	12 liter	70 000 kWh
10-60 °C	25 liter	145 000 kWh
10-85 °C	4 liter	35 000 kWh
10-85 °C	12 liter	104 000 kWh
10-85 °C	25 liter	218 000 kWh

4.3 Mulige synergier og vurderinger

4.3.1 Utveksling av varme

Vasking av ull krever som nevnt ovenfor betydelige mengder varme. Vaskeriet på Gotland har en biokjel på 450 kW for sin produksjon. Dette er tilknyttet et eldre vaskeri med åpne kar, med liten grad av varmegjenvinning. Tingvoll Ull vil ved etablering av et vaskeri i samme størrelse mest sannsynlig velge nyere teknologi. Effektbehovet forventes derfor å være betydelig lavere. Det er få leverandører av denne typen ullvaskeanlegg, og henvendelser vi har gjort til blant annet tyrkiske og tyske leverandører har så langt ikke ført frem. Etablering av et slikt anlegg vil naturlig kunne være forbundet med at Tingvoll Flis og Varme AS tar investeringen for etablering av ny biokjel og salg av varme til ullvaskeriet. Siden behovet er sesongbasert, vil det kunne være fornuftig med et mobilt fyringsanlegg. Et slikt anlegg vil kunne dekke andre kortsiktige eller sesongbaserte behov som alternativ byggvarme hos byggherrer, spisslast hos kunder med økt varmebehov om vinteren og/eller til fyring mot fjernvarmenettet i sommersesongen. Biokjelen på 850 kW går på relativt lav last om sommeren med redusert virkningsgrad. En mindre kjel plassert et annet sted langs nettet vil ha høyere virkningsgrad og forbruke mindre flis/levert kWt.

I prosjektperioden har vi også gjort oss kjent med eksisterende erfaringer og tenkt litt rundt mulighetene for et biokullanlegg som alternativ til et tradisjonelt fyringsanlegg. I den sammenheng har vi blant annet vært i kontakt med Einar Stuve i Oplandske Bioenergi som har etablert et større biokullanlegg på Rudshøgda. Leverandør er tyske Biomacon. Dette anlegget skal kunne produsere opp mot 1400 m³ biokull i året, samtidig som varme fra prosessen (ca. 400 kW) dekker behov hos Nortura som er deres største kunde der. Biokull kan ha varierende egenskaper, blant annet basert på råstoff og forbrenningsprosessen som kan gi anvendelser for alt fra jordforbedring til fôrtilsetning. Anlegget på Rudshøgda produserer fra skogsflis og etter et halvt års produksjon viser analyser av biokullet at det er av god kvalitet, og kan dermed være egnet for fôrtilsetning. Råstoff/flis må tørkes mer enn tradisjonell

flis (ned til 10-15 % vann) før den anvendes for å sikre god prosess og produksjon. Ideen med mobile anlegg nevnt ovenfor er foreløpig ikke så aktuell for biokull. Dette mest på grunn av behovet for fortørring og tettere oppfølging enn for et tradisjonelt fyringsanlegg. En foreløpig vurdering er at fast lokasjon er nødvendig for etablering av et biokull-anlegg. For Tingvoll Flis og Varme AS vil dette være en for stor investering for et punktanlegg med sesongbehov. Biokjelen på 850 kW er 10 år og det er mer aktuelt at man vurderer biokull som løsning ved utskiftning av denne. Veien videre avhenger i størst grad av om det etableres et marked og at man får godt betalt for biokullet.

4.3.2 Vaktsamarbeid og kompetansesamarbeid

Dette punktet ble tatt inn som en del av dette prosjektet, siden NORSØK og Tingvoll Flis og Varme AS vil samarbeide om vakt på biogassanlegget og flisfyringsanlegget. Dette vil utgjøre en betydelig reduksjon i total kostnadene forbundet med vakthold. De delene av anlegget som er forbundet med størst risiko og som det kreves mest kompetanse for å gjøre tiltak opp mot, tas imidlertid hånd om av noen få personer. I praksis vil da den som har vakt lære grunnleggende tiltak og tiltak for å sette anlegget i bero, til den/de som er ansvarlig kan bistå. Sett opp mot dette foretok vi også en henvendelse til Aqua Gen om hvordan de legger opp sin vaktordning. Det er spesielt på bakgrunn av større krav til oppetid, ikke aktuelt for AquaGen å være en del av et vaktsamarbeid som skissert ovenfor. Tingvoll Kommune har vakt på kommunale anlegg på lik linje med de andre aktørene som er beskrevet. Det er også hos de ulike aktørene og internt i de ulike organisasjonene ulik kompetanse og ulikt fokus. Noen kan være flink på mekanisk utstyr, andre på det elektriske og/eller styring og prosesskunnskap. For små bedrifter og organisasjoner som i Tingvollvågen vil justeringer i drift og eller løsninger for anlegg være avgjørende for lønnsomhet. Å kunne gjøre det meste av vedlikehold og tilpasninger selv er kostnadsbesparende, all den tid ekstern kompetanse ofte kan være langt unna. For Tingvoll Flis og Varme AS har egen kompetanse på vedlikehold og drift av mekanisk utstyr utgjort forskjellen mellom lønnsomhet og ingen lønnsomhet. Ullvaskeriet forventes å være i drift kun på dagtid og det vil i utgangspunktet ikke være behov for døgnvakt. Et samarbeid med andre aktører i Vågen med tanke på drift av anlegget generelt sett er et naturlig utgangspunkt hvis vaskeriet etableres.

4.3.3 Substrat til biogassanlegg

Et ullvaskeri vil operere 2-3 måneder i året, i hovedsak om våren før sauene sendes ut på beite, og om høsten når sauene tas tilbake fra beite. Dette utløser som nevnt en vaskevannmengde på ca. 800 m³. Vannet inneholder i hovedsak lanolin (143,5 g/kg TS), såpe og skit/urenheter. AquaGen har i tillegg ca. 100 m³ fiskeensilasje som har betydelig biogasspotensiale og som kan bidra/passe inn i produksjonen til et lokalt anlegg. Siden Tingvoll gard driver økologisk melkeproduksjon er det ikke gitt at Mattilsynet vil godkjenne bruk av fiskeensilasje fra AquaGen som tilleggssubstrat, selv om produksjonen er sertifisert som økologisk. Mattilsynet oppgir at animaliebiproduktregelverket ikke skiller på om råstoffet kommer fra økologisk eller konvensjonell produksjon. Økologiregelverket setter imidlertid krav til at biproduktene ikke skal ha sitt opphav i industrilandbruk. En formell søknad til Mattilsynet vil måtte sendes for en mer endelig avklaring på om substratet kan brukes i anlegget på Tingvoll gard.

Lab-skala forsøkene viser at selv om potensialet er relativt bra, så er nedbrytning av ullvaskevannet krevende i større skala. Lang oppholdstid, høyere temperatur og fortynning er nødvendig for å kunne oppnå betydelig nedbrytningsgrad. Biogassanlegget på Tingvoll gard bruker 700 m³ storfe gjødsel fra melkeproduksjon, og reaktoren har kapasitet til å ta imot ekstra substrat. I utgangspunktet var derfor tanken at vaskevannet kunne omsettes der. Dette ville krevd at man hadde bygd en mottakskum som skulle tatt bortimot hele mengden på 800 m³, siden man vil ha størst bruk for å tilsette ullvaskevannet og bruk for energien høst, vinter, og vår.

De siste årene har flere gårdbrukere fått tilskudd fra Innovasjon Norge, og det er flere anlegg under bygging, i hovedsak i gamle Østfold og Midt-Norge. Disse anleggene er lokalisert ved relativt store gårder med gjødselmengder på 3000-7000 m³. I tillegg har de tilgang på andre substrat fra egen eller

andre sin produksjon. Aktuelle tilleggssubstrat kan være talle, myse, frityrfett, kyllinggjødsel og svinegjødsel. Tomb videregående skole på sin side har i flere år brukt ferdig hygienisert matavfall i sitt anlegg. Dette bidrar med ekstra gassproduksjon, som de anvender seg av for oppvarming spesielt av internatbygget på skolen. Til forskjell fra matavfall er ullvaskevann tyngre nedbrytbart og med mengdene gjødsel i anlegget på Tingvoll er det vanskelig å oppnå en fortynningsgrad som gjør at prosessen ikke blir inhibert. Det er rimelig å tenke at vaskevannet vil være forbundet med en gate-fee, eller portavgift, som kan være en inntekt for biogassanlegget. Til tross for dette viser beregningene at det vil være vanskelig å oppnå bedriftsøkonomisk lønnsomhet for en slik løsning.

Tingvoll Ull har i sitt utviklingsløp vært i kontakt med industriklyngen på Sunndalsøra som har planlagt en større industripark med forskjellig aktivitet på Håsøran, herunder et større biogassanlegg, biokullanlegg, og reke-, fisk- og planteproduksjon. En mulig alternativ lokalisering av et ullvaskeri kan være i tilknytning til industriparken. Det vil kunne være enklere å passe inn behandling av ullvaskevann i et slikt anlegg, spesielt med tanke på å oppnå en fortynningseffekt som bidrar til mer fullstendig nedbrytning.

4.3.4 Lanolin

Ullvaskevannet er i dette prosjektet tatt inn og vurdert som substrat for biogassproduksjon. Dette henger i hovedsak sammen med at uttak av lanolin ikke gjøres for så små anlegg. Lanolin er et meget høyverdig produkt og brukes til understellsbehandling av biler og til såper og hudpleieprodukter. Lanolin omsettes med priser opp mot 1000 kr/kg. For Tingvoll Ull er uttak av lanolin derfor verdt å vurdere som alternativ til bruk som substrat i biogassproduksjon.

Ved anlegget på Gotland tar de ut lanolinen i en fettavskiller og bruker vannet som gjødsel på eng for produksjon av gras. Fettet har foreløpig ikke fått noen anvendelse. De har fått henvendelser blant annet fra aktører som har vurdert metoder for å ekstrahere lanolin og har også sendt prøver til disse, men dette har foreløpig ikke resultert i noe konkret. I slutten av prosjektperioden har vi funnet artikler som beskriver alternativ til vasking, blant annet bruk av superkritisk CO₂ til samtidig rensing av ull og uttak av lanolin [38]. Dette er prosess teknisk krevende, med høyt trykk, noe som også fører til høy investeringskostnad. Det innebærer likevel at man slipper håndtering av vaskevann i ettertid. Vi har tatt kontakt med SINTEF Industri, som både jobber med CO₂-rensing og håndtering, samt biomasseforedling. Det er nå planer om at arbeidet skal tas videre ved å studere mer tradisjonell ekstraksjon med tradisjonelle løsemidler, og at man søker RFF om midler til å studere og vurdere dette nærmere i et kvalifiseringsstøtte-prosjekt.

4.3.5 Gjødselverdi

Gjødselverdi for vaskevannet kan også være verdt å studere videre. Som sagt brukes filtrert vaskevann som gjødsel for anlegget på Gotland per i dag. De har ikke gjort analyser av vaskevannet, men sier at de ser tydelig effekt, dvs. at de får høyere avling. De sier samtidig at de observerer en nedgang i saltintolerante planter som urter og kløver, som de relaterer til at de bruker Na-karbonat i forbindelse med vaskeprosessen. En studie gjort av Othman (2010) [31] viser et innhold av total mengde natrium og fosfor i ullvaskevannet på hhv. 320 og 610 mg/l. Nitrogen-innholdet er betydelig lavere, mens fosfor-innholdet er relativt likt det man finner i husdyrgjødsel [31].

5 Konklusjon

Målet med dette prosjektet var å undersøke om fettrike substrater som ullvaskevann, meierislam og grillfett fra kylling, kan bidra til å øke lønnsomheten til biogassproduksjon og dermed utvikling av grønne verdikjeder basert på biogass. For å teste hypotesen gjennomførte vi et biogassforsøk og brukte et ullvaskeri som vurderes bygd på Tingvoll som en case.

Resultatene fra biogassforsøket viser at ullvaskevann og meierislam gav generelt lavere gassutbytter enn grillfett, både i biometanpotensiale test og i kontinuerlige reaktorer. Det ble ikke detektert i kjemiske analyser enkelte forbindelser som kan antas å være inhibitoriske i konsentrasjoner tilført i dette forsøket, bortsett fra en kort periode med høy ammoniakk-konsentrasjon i ullvaskevann. Noe av forklaringen på lavt metanutbytte kan være at ullvasevann brukt i denne testen var lite energikonsentrert og hadde relativt lave fettsyrekonsentrasjoner og høyt vanninnhold (TS % = 1,24). Metanutbyttet fra meierislam var også relativt lavt. Dette er også et substrat med høyt vanninnhold (TS % = 0,79), og dermed lite energikonsentrert. En annen forklaring kan være synergistisk inhibering grunnet kombinasjonen av enkelte fettsyrer og ammoniakk. Tine Elnesvågen har et nytt rensanlegg som skal produsere slam med 15% TS. Dette kan gi høyere metanutbytte. Høyest metanutbytte fra ullvaskevann og meierislam ble målt når mengde tilleggssubstrat var 150-200 mL og på driftstemperatur 41 og 55 C. Økt driftstemperatur vil gi økt enzymaktivitet og nedbrytningsgrad med påfølgende økt metanutbytte i biogassreaktorer med lav belastning. Dette er sannsynligvis noe av forklaringen på økt metanutbytte med forhøyet temperatur i reaktorene.

Lønnsomhetsberegninger bekrefter at ullvaskevann nok må befinne seg i nærheten av et biogassanlegg slik at det kan fungere som prosessvann (lavere gate-fee) og at eventuelt N i vaskevannet kan gi merverdi til bioresten for at det skal bli en god løsning både for substrateier og anleggseier. Meierislammet er lett nedbrytbart og kan gi betydelig gassproduksjon og har næringsstoffinnhold som kan gi bedre bioestkvalitet. Begge substratene kan også vurderes behandlet i andre typer reaktorer som for eksempel UASB eller biofilmreaktorer. Grillfett fra kylling gir økt gassproduksjon, men har ikke særlig innhold av næringsstoffer og kan være utfordrende for anlegget både prosessmessig og mekanisk ved avleiring av fett.

Ullvasking krever mye vann og varme. Det finnes flere tiltak for å effektivisere prosessen, som gjenvinning av gråvann og varme. Plassering av et ullvaskeri på Tingvoll har sine fordeler, men også sine utfordringer. Tilgang til rimelig varme i begrenset perioder, gjenvinning av vaskevann og varme, omsetning av avløpsvann direkte som gjødsel eller substrat i et biogassanlegg, omsetning av lanolinen, og samarbeid om vakt og drift er avgjørende faktorer for at det skal være lønnsomt å plassere et ullvaskeri på Tingvoll. Alternative løsninger til vasking med uttak av lanolin er interessant, og Tingvoll Ull planlegger et eget prosjekt som ser på en slik mulighet.

Litteraturreferanse

- [1] D. G. Cirne, X. Paloumet, L. Björnsson, M. M. Alves, og B. Mattiasson, «Anaerobic digestion of lipid-rich waste—Effects of lipid concentration», *Renew. Energy*, bd. 32, nr. 6, s. 965–975, mai 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.04.003.
- [2] J. L. Chen, R. Ortiz, T. W. J. Steele, og D. C. Stuckey, «Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review», *Biotechnol. Adv.*, bd. 32, nr. 8, s. 1523–1534, des. 2014, doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.005.
- [3] H. Tian, P. Karachalios, I. Angelidaki, og I. A. Fotidis, «A proposed mechanism for the ammonia-LCFA synergetic co-inhibition effect on anaerobic digestion process», *Chem. Eng. J.*, bd. 349, s. 574–580, 2018.
- [4] L. Kardos, «COMPARING OF MESOPHILIC AND THERMOPHILIC ANAEROBIC FERMENTED SEWAGE SLUDGE BASED ON CHEMICAL AND BIOCHEMICAL TESTS», *Appl. Ecol. Environ. Res.*, bd. 9, nr. 3, s. 293–302, okt. 2011, doi: 10.15666/aeer/0903_293302.
- [5] M. Westerholm og A. Schnürer, «Microbial Responses to Different Operating Practices for Biogas Production Systems», *Anaerob. Dig.*, feb. 2019, doi: 10.5772/intechopen.82815.
- [6] A. David, T. Govil, A. K. Tripathi, J. McGeary, K. Farrar, og R. K. Sani, «Thermophilic Anaerobic Digestion: Enhanced and Sustainable Methane Production from Co-Digestion of Food and Lignocellulosic Wastes», 2018. doi: 10.3390/en11082058.
- [7] J. Morken, T. Briseid, J. Hovland, K.-A. Lyng, og I. Kvande, «Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift», s. 58, 2017.
- [8] K. Svensson, O. Kjølraug, S. J. Horn, og J. W. Agger, «Comparison of approaches for organic matter determination in relation to expression of bio-methane potentials», *Biomass Bioenergy*, bd. 100, s. 31–38, mai 2017, doi: 10.1016/j.biombioe.2017.03.005.
- [9] H. W. Ambrose, L. Philip, G. Suraishkumar, A. Karthikaichamy, og T. K. Sen, «Anaerobic co-digestion of activated sludge and fruit and vegetable waste: Evaluation of mixing ratio and impact of hybrid (microwave and hydrogen peroxide) sludge pre-treatment on two-stage digester stability and biogas yield», *J. Water Process Eng.*, bd. 37, s. 101498, 2020.
- [10] L. Solli, O. Bergersen, R. Sørheim, og T. Briseid, «Effects of a gradually increased load of fish waste silage in co-digestion with cow manure on methane production», *Waste Manag.*, bd. 34, nr. 8, s. 1553–1559, 2014.
- [11] J. Folch, M. Lees, og G. S. Stanley, «A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues», *J. Biol. Chem.*, bd. 226, nr. 1, s. 497–509, 1957.
- [12] Y. Jiang, Y. Zhang, og C. J. Banks, «Determination of long chain fatty acids in anaerobic digesters using a rapid non-derivatisation GC-FID method», *Water Sci. Technol.*, bd. 66, nr. 4, s. 741–747, 2012.
- [13] L. Neves, M. Pereira, M. Mota, og M. Alves, «Detection and quantification of long chain fatty acids in liquid and solid samples and its relevance to understand anaerobic digestion of lipids», *Bioresour. Technol.*, bd. 100, nr. 1, s. 91–96, 2009.
- [14] V. Matyash, G. Liebisch, T. V. Kurzchalia, A. Shevchenko, og D. Schwudke, «Lipid extraction by methyl-tert-butyl ether for high-throughput lipidomics», *J. Lipid Res.*, bd. 49, nr. 5, s. 1137–1146, 2008.

- [15] V. Vivekanand, V. G. Eijsink, og S. J. Horn, «Biogas production from the brown seaweed *Saccharina latissima*: thermal pretreatment and codigestion with wheat straw», *J. Appl. Phycol.*, bd. 24, nr. 5, s. 1295–1301, 2012.
- [16] K. Svensson, L. Paruch, J. C. Gaby, og R. Linjordet, «Feeding frequency influences process performance and microbial community composition in anaerobic digesters treating steam exploded food waste», *Bioresour. Technol.*, bd. 269, s. 276–284, des. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.096.
- [17] M. Carlsson og M. Uldal, «Substrate handbook for biogas production [Substrathandbok för biogasproduktion]», *Rep. No SGC*, bd. 200, 2009.
- [18] P. Weiland, «Biogas production: current state and perspectives», *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, bd. 85, nr. 4, s. 849–860, 2010.
- [19] E. J. Schoen og D. M. Bagley, «Biogas production and feasibility of energy recovery systems for anaerobic treatment of wool-scouring effluent», *Resour. Conserv. Recycl.*, bd. 62, s. 21–30, mai 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.02.004.
- [20] D. Isaac og R. Cord-Ruwisch, «Anaerobic degradability of wool scouring effluent», i *Isaac, D. and Cord-Ruwisch, R.* <<https://researchrepository.murdoch.edu.au/view/author/Cord-Ruwisch,Ralf.html>> (1991) *Anaerobic degradability of wool scouring effluent*. In: *International Conference on «Appropriate Waste Management Technologies», 27 - 28 November, Perth, Western Australia pp. 125-128.*, Perth, Western Australia, 1991, s. 125–128. Åpnet: aug. 29, 2019. [Online]. Tilgjengelig på: <https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/10130/>
- [21] U. Marchaim og C. Krause, «Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion», *Bioresour. Technol.*, bd. 43, nr. 3, s. 195–203, 1993.
- [22] K. C. Wijekoon, C. Visvanathan, og A. Abeynayaka, «Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor», *Bioresour. Technol.*, bd. 102, nr. 9, s. 5353–5360, 2011.
- [23] J. Ma, M. Carballa, P. Van De Caveye, og W. Verstraete, «Enhanced propionic acid degradation (EPAD) system: Proof of principle and feasibility», *Water Res.*, bd. 43, nr. 13, s. 3239–3248, 2009.
- [24] C. Gallert og J. Winter, «Propionic acid accumulation and degradation during restart of a full-scale anaerobic biowaste digester», *Bioresour. Technol.*, bd. 99, nr. 1, s. 170–178, 2008.
- [25] K. T. Dasa, S. Y. Westman, R. Millati, M. N. Cahyanto, M. J. Taherzadeh, og C. Niklasson, «Inhibitory effect of long-chain fatty acids on biogas production and the protective effect of membrane bioreactor», *BioMed Res. Int.*, bd. 2016, 2016.
- [26] I. Angelidaki, D. Karakashev, D. J. Batstone, C. M. Plugge, og A. J. Stams, «Biomethanation and its potential», *Methods Enzymol.*, bd. 494, s. 327–351, 2011.
- [27] Linn Solli og Øyvind Halvorsen, «Analyser av husdyrgjødsel», Ås, NIBIO, lukket ikke publisert, 2021.
- [28] Roar Svanem, «Gjennomsnitt av gjødselanalyser for bønder som skal levere gjødsel til Svanem Biogass, upublisert.» 2021.
- [29] R. Bjøru, «VEILEDNING I VÅTKOMPOSTERING AV ORGANISK AVFALL fra fiskeoppdrett, husdyrgjødsel, kloakkslam», 501/67, 1997.

- [30] S. Ashekuzzaman, P. Forrestal, K. Richards, og O. Fenton, «Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse», *J. Clean. Prod.*, bd. 230, s. 1266–1275, 2019.
- [31] M. Othman, «Treatment of Wool Scouring Waste Using Anaerobic Digestion with and without Chemicals Addition», *Int. J. Chem. Mol. Eng.*, bd. 4, nr. 2, s. 186–191, 2010.
- [32] E Wood, «Wool Scouring Principles and Methods. The Australian Wool Education Trust licensee for educational activities University of New England.» 2012. [Online]. Tilgjengelig på: , <https://www.woolwise.com/wpcontent/uploads/2017/07/WOOL-482-582-12-T-02.pdf>
- [33] Woolmark, «WOOLLEN - SCOURING & CARBONISING». Woolmark. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.woolmark.com/industry/use-wool/wool-processing/woollen-scouring-carbonising/>
- [34] A. Sengupta og J. Behera, «Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment», *Am. J. Eng. Res.*, bd. 3, nr. 7, s. 33–43, 2014.
- [35] Hollow Road Farms, «Energy-Efficient Wool Scouring Facility. . A Project Designed to Support the NY Sheep Industry by Building a Facility that Scours Wool with Energy Efficiency and Environmental Responsibility.» Final Report to NYSERDA, 2003.
- [36] «Curtis wool direct». [Online]. Tilgjengelig på: . <https://www.curtiswooldirect.co.uk/about-curtis-wool-direct.php>
- [37] Norilia, «Wool from Norilia – a good choice for health and the environment». Norilia. [Online]. Tilgjengelig på: . <https://www.norilia.com/feature-articles/woolnordicecolabel>
- [38] F. A. S. Allafi, M. S. Hossain, M. O. Ab Kadir, M. A. H. Shaah, J. Lalung, og M. I. Ahmad, «Waterless processing of sheep wool fiber in textile industry with supercritical CO₂: Potential and challenges», *J. Clean. Prod.*, s. 124819, 2020.

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter og et avdelingskontor i Oslo.