

Andreas Falinski

Bærekraftig biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert lakseoppdrett

Bacheloroppgave i Fornybar energi
Januar 2022

Andreas Falinski

Bærekraftig biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert lakseoppdrett

Bacheloroppgave i Fornybar energi
Januar 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



Kunnskap for en bedre verden



Kunnskap for en bedre verden

INSTITUTT FOR HAVROMSOPERASJONER OG
BYGGTEKNIKK

FENA2900 - BACHELOROPPGAVE FORNYBAR ENERGI

Bærekraftig biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert lakseoppdrett

Forfatter:

Andreas Kabbe Falinski

Vår, 2022

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven omhandler bærekraftig produksjon av biogass, basert på avfall fra et landbasert oppdrettsanlegg. Fiskeslam som substrat har et høyt innhold av energi, men samtidig et høyt innhold av nitrogen og flyktige fettsyrer. Det er lite erfaring med biogassproduksjon basert på fiskeslam. Av de forsøkene som er utført med kun fiskeslam er resultatet ustabil produksjon, som en konsekvens av høyt innhold nitrogen og flyktige fettsyrer. Per idag er den mest sikre løsningen produksjon av biogass fra fiskeslam kombinert med et annet substrat. Husdyrgjødsel er et godt alternativ. Det er gitt en prosessbeskrivelse på produksjon av biogass, beskrivelsen går gjennom hele prosesskjeden, fra rensing av slam til ferdiglagret gass. Basert på data oppgitt fra oppdragsgiver, Salmon Evolution, er produksjonsmengde slam kartlagt. Det er gitt en produksjonsprofil på daglig, ukentlig og månedlig mengde slam. Videre er potensiell mengde råbiogass, biogass og energiinnhold i gass beregnet med grunnlag i kartlagt mengde slam. I data oppgitt fra Salmon Evolution er det kun tatt hensyn til mengde slam, og ikke næringsinnhold. Grunnet store variasjoner i mengde organisk innhold i slam fra lakseoppdrett, er potensiell mengde råbiogass, biogass og energi beregnet for to hypotetiske sammensetninger av slam. Andel organisk materiale har stor påvirkning på mengde biogass produsert. Beregnet potensielt volum gass er videre benyttet til å dimensjonere nødvendig lagringsvolum i en lagertank. Lagerberegninger er utført for både komprimert og flytende biogass. Komprimert gass opptar betydelig mindre volum sammenlignet med gass ved normalbetingelser. Flytende gass opptar igjen enda mindre volum enn komprimert gass.

Abstract

This bachelor thesis deals with sustainable production of biogas based on waste from a land-based fish farm. The purpose of the thesis is to investigate various solutions for the utilization of fish waste to produce biogas, as well as to investigate the biogas and energy potential in sludge. Fish sludge as a substrate has a high content of energy, but at the same time a high content of nitrogen and volatile fatty acids. There is little experience with biogas production based on fish sludge. Of the experiments performed, the results are unstable production, as a consequence of a high content of nitrogen and volatile fatty acids. As of today, the safest solution is the production of biogas from fish sludge combined with another substrate. Livestock manure is a good alternative. A process description has been given for the production process of biogas. The process description describes the entire process, from the cleaning of wastewater to gas storage after production. Based on data provided by the client, Salmon Evolution, the production volume of sludge has been mapped. A production profile of daily, weekly and monthly amounts of sludge has been given. Furthermore, the potential amount of raw biogas, biogas and energy has been calculated based on the mapped amount of sludge. The data provided by Salmon Evolution is based on the amount of sludge in weight, and not the nutrient content. Due to large variations in the amount of organic content in sludge from salmon farming, the potential amount of raw biogas, biogas and energy is calculated for two hypothetical compositions of sludge. Calculated potential volume of gas is used to dimension the required storage volume in a potential storage tank. Calculations have been performed for both compressed and liquefied biogas. Compressed gas occupies significantly less volume compared to gas under normal conditions. Liquid gas occupies even less volume than compressed gas.

Forord

Denne bacheloroppgaven er den avsluttende oppgaven ved studiet Fornybar energi på NTNU Ålesund. Oppgaven er utført våren 2022, ved Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk.

Prosjektet er en utredning for Salmon Evolution, der det sees på ulike muligheter for utnyttelse av avfall fra landbasert fiskeoppdrett til produksjon av bærekraftig biogass. Gjennom prosjektet skal Salmon Evolution få kunnskap og innsikt, som de senere kan bruke til en eventuell produksjon av biogass.

Denne oppgaven ble valgt på grunnlag av en interesse for fiskeoppdrett, og hvordan næringen kan bidra i det grønne skiftet. Biogass er en fornybar energikilde, det er derfor svært relevant å se på produksjon av biogass med tanke på studieretningen Fornybar energi.

Den opprinnelige oppgavebeskrivelsen var ment for en gruppe på tre studenter. Grunnet uforutsette hendelser var det nødvendig å revidere den originale oppgavebeskrivelsen til å inneholde passende arbeidsmengde for kun en student. Den oppdaterte oppgavebeskrivelsen er å finne i forprosjektet.

Ålesund, 19.05.2022

Andreas Falinski

Andreas Kabbe Falinski

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	ii
Forord	iii
Innholdsfortegnelse	vi
Figurer	vii
Tabeller	vii
Forkortelser	viii
Symbolliste	viii
1 Innledning	1
2 Bakgrunn	2
2.1 Generell beskrivelse av biogass	2
2.2 Generelt om lakseoppdrett	2
3 Konstruksjon og dimensjoner for landbasert oppdretsanlegg	3
4 Prosessbeskrivelse ved produksjon av biogass fra slam	4
4.1 Bruk av fiskeslam som substrat i biogassproduksjon	4
4.2 Rensing av slam	5
4.3 Forutsetninger for biogassproduksjon	7
4.3.1 Temperatur og pH	7
4.3.2 Karbon og nitrogen forhold	7
4.3.3 Flyktige fettsyrer	7
4.3.4 Kjemisk oksygenforbruk - KOF	7
4.3.5 Hydraulisk oppholdstid	8
4.4 Produksjon av biogass	8
4.4.1 Hydrolyse	8

4.4.2	Syredannelse	8
4.4.3	Metandannelse	9
4.5	Rensing av råbiogass til biogass	9
4.6	Biorest	9
4.7	Biogasteknologi	10
4.7.1	Anaerobic baffle reactor - ABR	10
4.7.2	Gjennomstrømningsreaktor - CSTR	11
4.8	Beskrivelse av lagring etter endt produksjon av biogass	11
4.9	Lagring ved atmosfærisk trykk i gasspose	11
4.9.1	Komprimert - CBG	12
4.9.2	Flytende - LBG	12
5	Bruksområder for biogass	12
6	Kan biogassen kjøres til biogassanlegget på Skogn	13
7	Metode	13
7.1	Potensiell mengde slam ut av anlegget	13
7.2	Beregning av potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass	13
7.3	Beregning av potensiell energimengde	14
7.4	Dimensjonering av lagringstank	14
7.4.1	Komprimert biogass - CBG	15
7.4.2	Flytende biogass - LBG	15
8	Resultat og diskusjon	16
8.1	Potensiell mengde slam ut av anlegget	16
8.2	Potensiell mengde råbiogass og oppgradert biogass	17
8.2.1	Råbiogass	18
8.2.2	Oppgradert biogass	19
8.3	Potensiell energimengde	20
8.4	Dimensjonering av biogassanlegg	21
8.5	Dimensjonering av lagring	21
8.5.1	Komprimert biogass - CBG	21

8.5.2	Flytende biogass - LBG	21
9	Konklusjon	22
	Referanseliste	23

Figurer

1.1	Det landbaserte anlegget på Indre Harøya [2]	1
2.1	Laks; produsent av slam.	2
3.1	Anlegget under konstruksjon.	4
4.1	Trommelfilter levert av Hydrotech.	5
4.2	Anlegg for behandling av slam. Levert av Blue Ocean technologies.	6
4.3	Flytskjema for behandling av slam.	6
4.4	Skisse av en ABR reaktor	10
4.5	Skisse av en gjennomstrømningsreaktor.	11
8.1	Daglig mengde slam ut av anlegget med andel TS på 100%.	16
8.2	Daglig mengde potensielt produsert oppgradert biogass basert på <i>BG1</i> og <i>BG2</i>	20

Tabeller

7.1	Verdier brukt i beregninger av potensielt volum råbiogass og oppgradert biogass.	14
7.2	Verdier brukt i beregning av lagringsvolum.	15
8.1	Mengde slam per byggetrinn med andel TS på 100%.	17
8.2	Potensiell mengde råbiogass fra slam.	18
8.3	Potensiell mengde oppgradert biogass fra slam.	19
8.4	Volum biogass per kg slam	19
8.5	Potensiell energimengde fra slam.	20
8.6	Energitetthet per kg slam	21
8.7	Potensielt lagringsvolum CBG ved en måneds biogassproduksjon ved $T=18^{\circ}\text{C}$ og $p=250$ bar	21
8.8	Potensielt lagringsvolum for LBG ved en måneds biogassproduksjon.	22

Forkortelser

ABR	Anaerobic baffle reactor
CBG	Compressed biogas - Komprimert biogass
CNG	Compressed natural gas - Komprimert naturgass
CSTR	Continuous stirred-tank reactor - Gjennomstrømningsreaktor
C/N forhold	Forhold mellom karbon og nitrogen
KOF	Kjemisk oksygenforbruk
LBG	Liquid biogas - Flytende biogass
LHV	Lower heating value - Nedre brennverdi
LNG	Liquid natural gas - Komprimert naturgass
NORSØK	Norsk senter for økologisk landbruk
TS	Tørrstoff
VS	Volatile solids - Organisk materiell i TS

Symbolliste

Symbol	Definisjon	Enhet
E	Energi	kWh
ϵ_v	Volumetrisk energiinnhold	$[kWh/Nm^3]$
ϵ_w	Vektbasert energiinnhold	$[kWh/kg]$
Nm^3	Normal kubikkmeter	[-]
m	Masse	kg
m_{VS}	Masse organisk materiale	[tonn]
n	Antall mol	[mol]
p	Trykk	[Pa]
ρ	Massetetthet	$[kg/m^3]$
R	Universiell gasskonstant	$[m^3 \cdot Pa/K \cdot mol]$
V_1	Volum før kompresjon	$[m^3]$
V_2	Volum etter kompresjon	$[m^3]$
v	Normalkubikkmeter CH_4 per masse VS	$[Nm^3/tonn]$

1 Innledning

Regjeringen la i 2021 frem en plan om øke den årlige produksjonsmengden oppdrettslaks og ørret til 50 milliarder tonn innen 2050 [1]. Dette er en femdobling av dagens nivå. Endel av denne veksten er planlagt å foregå på land, i landbaserte oppdrettsanlegg. Med en så kraftig økning i produksjonsvolum fisk, vil det være en økende mengde avfall fra oppdrett som behøver behandling. Avfall fra oppdrettsnæringen kan vise seg å være en verdifull ressurs i kampen mot klimaendringer. Verdien ligger i å benytte avfallet til produksjon av fornybar energi.

Denne rapporten er utarbeidet i samarbeid med Salmon Evolution. Salmon Evolution er en stor aktør innen landbasert oppdrett, som idag er i gang med konstruksjon av et storskala landbasert oppdrettsanlegg på Indre Harøya. I forbindelse med oppstart av anlegget, ønsker de at det utarbeides en rapport på bruk slam som et substrat i produksjon av bærekraftig biogass. I denne rapporten skal ulike løsninger for produksjon av bærekraftig biogass basert på avfall fra et landbasert oppdrettsanlegg undersøkes. Mengde slam ut av anlegget skal kartlegges, og basert på slamdata skal potensielt volum biogass estimeres.

I et landbasert oppdrettsanlegg produsere det flere potensielle organsike kilder for biogassproduksjon. De kildene består av slam, ensilasje av død fisk og slakteavfall. Rapporten avgrenses til å kun fokusere på biogassproduksjon fra slam.



Figur 1.1: Det landbaserte anlegget på Indre Harøya [2]

2 Bakgrunn

2.1 Generell beskrivelse av biogass

Biogass er gass produsert gjennom anaerob nedbryting av organisk materiale [3]. Anaerob nedbrytning er nedbrytning i oksygenfritt miljø. Nedbrytningen gjennomføres av metanogene bakterier, det vil si bakterier som reduserer karbondioksid til metan [4].

Avfall fra lakseoppdrett gir en betydelig høyere andel produsert biogass per kg råstoff, sammenlignet med annet biologisk materiale som for eks. avfall fra husdyr [5]. I og med at biogass blir produsert av avfall anses den som utslippsfri. Dette begrunnes med at utslippet fra forbrenning av biogass inngår i det naturlige karbonkretsløpet [3].

Biogass består av en blanding av metan og karbondioksid, samt mindre mengder hydrogensulfid og ammoniakk [6]. Forholdene mellom de ulike stoffene varierer ut i fra produksjonskilden. Biogassen kan forbrennes til bruk av varme, strøm, samt som drivstoff i transportsektoren både til lands og til havs [3]. Bruk av biogass kan derfor være en viktig bidragsyter til det grønne skiftet.

2.2 Generelt om lakseoppdrett

Lakseoppdrett innebærer å fø opp laks i fangenskap. Oppdrett av laks utgjør den største andelen av oppdrettsfisk i Norge, og Norge er på verdensbasis den største produsenten av laks [7]. Idag foregår brorparten av oppdretten i merder langs kysten. De oppdrettsanleggene som er landbaserte er hovedsaklig settefiskanlegg. I settefiskanlegg foregår prosessen fra befruktning til lakseyngel stor nok til å plasseres i merder som matfisk [8]. I fiskeridirektoratets tillatelse 4.2.1. gis det at produksjon av yngel og settefisk fra laks kun kan skje i ferskvann [9]. Hos Salmon Evolution foregår hele prosessen, fra yngel til slakteklar matfisk, på land i saltvann [10]. Figur 2.1 viser laks i det første ferdigstilte karet hos Salmon Evolution.



Figur 2.1: Laks; produsent av slam.

Som beskrevet i en risikovurdering for norsk fiskeoppdrett, lagt fram av Havforskningsinstituttet, fører havbasert oppdrett med seg en rekke problemer. Flere av problemene løses dersom oppdretten flyttes på land. Blant de negative følgene innebærer lakselus, som smitter fra rømt fisk til villaks. Samt at rømt laks fra merdene og parre med villaks, parring mellom villaks og oppdrettslaks kan føre til endring i genetikken hos villaks. En annen negativ konsekvens av oppdrett til havs er eutrofiering. Eutrofiering defineres som overgjødsling forårsaket av utslipp av næringsstoffer i avfall fra merdene. En konsekvens av dette er overblomstring av planteplankton. Overblomstring av planteplankton kan ha en negativ effekt på økosystemet rundt oppdrettsanlegg [11].

Oppdrettsanlegg til havs har ikke et krav om oppsamling av avfall, slik at avfallet forurenser omgivelsene rundt merdene [12]. Det er derimot krav om akkumulasjon av slam i oppdrettsanlegg til lands, før vann føres tilbake til havet. Siden avfallstoffene ikke lengre siger ut av glipper i merdene forenkler dette oppsamlingen av slam til en eventuell produksjon av biogass. Per idag er det ingen etablert praksis i håndtering av slam [10].

3 Konstruksjon og dimensjoner for landbasert oppdrettsanlegg

Salmon Evolution er i gang med konstruksjonen av et landbasert oppdrettsanlegg. Generell info om anlegget ble oppgitt i samtaler med ekstern faglig veileder, Olav Lyngstad. Anlegget er plassert på Indre Harøya, i Hustadvika kommune som ligger i Møre og Romsdal fylke. Det ferdigstilte anlegget skal bestå av 48 kar med oppdrettslaks, med en total biomasse laks på 36 000 tonn. Karene har en dimensjon på 28m i diameter, vanndybde på 8m og et volum på 5 000m³ per kar.

Salmon Evolution forventes å være ferdigstilt med byggetrinn 1 av konstruksjonen innen November 2022. Byggetrinn 1 vil innebære 12 kar med oppdrettslaks, mens fult utbygd anlegg i byggetrinn 4 vil bestå av 48 kar. Anlegget under konstruksjon er vist i Figur 3.1. Et landbasert oppdrettsanlegg forenkler oppsamling av slam til produksjon av biogass. Det er betydelig lettere å filtrere ut slam fra vann i rør, enn det er i åpne merder til havs. Det er mye enklere å filtrere ut avfall fra et rør, enn det er å samle avfall fra merder. Karene vil ha en varierende fisketetthet som befinner seg mellom 8 kg/m³ og 80 kg/m³. De store variasjonene begrunnes med forskjeller i vekt i de ulike levestadiene til fisken. Anlegget vil ha et energiforbruk som befinner seg mellom 250-280 GWh per år [10].



Figur 3.1: Anlegget under konstruksjon.

4 Prosessbeskrivelse ved produksjon av biogass fra slam

I denne delen gis det en detaljert prosessbeskrivelse for produksjon av biogass basert på avfall fra et landbasert oppdrettsanlegg. Hele verdikjeden, fra rensing av slam til ferdig produsert biogass, skal undersøkes.

4.1 Bruk av fiskeslam som substrat i biogassproduksjon

Et problem med bruk av fiskeslam, som kilde til biogassproduksjon, er det høye innholdet av nitrogen. Fiskeslam inneholder rundt 5-7% nitrogen [13]. Konsekvensen av dette er at den anaerobe nedbrytningen av slam kan generere ammonium NH_3 . I høye konsentrasjoner kan ammonium destruere mikrober som utfører den anaerobe nedbrytningen, slik at biogassproduksjonen hemmes [14]. Et annet problem med fiskeslam er høyt innhold av fett, som videre brytes ned til flyktige fettsyrer. Opphopning av flyktige fettsyrer kan senke pH i biogassreaktor [6]. Det er flere mulige løsninger for å produsere biogass fra fiskeslam, uten at innholdet av nitrogen og flyktige fettsyrer overstiger en viss grense:

- **Lavt TS innhold:** Påse at tørrstoffinnholdet ikke er for høyt ved å fortynne slam med vann. Tidligere forsøk med slam fra settefisk anlegg på Smøla har vist at maksimal andel TS i fiskeslam, for å unngå for høyt nivå av ammonium, er 3% for en ABR reaktor [15].
- **Miks med andre substrat:** Produksjon av biogass fra en kombinasjon av fiskeslam og annet rå materiell. Eksempelvis husdyrgjødsel. Gjødsel fra storfe har et mindre energiinnhold, men lavere nivåer av uønskede stoffer. Husdyrgjødsel gir av den grunn en mer stabil produksjon. Den kan dermed fungere som en buffer i biogassproduksjon kombinert med fiskeslam, som vist i forsøk utført på Tingvoll. Her

ble en gjennomstrømningsreaktor brukt til å undersøke ulike blandingsforhold med fiskeslam og annet substrat. Forsøkene viste at 80% storfe gjødsel blandet med myse kombinert med 20% fiskeslam er optimalt for å opprettholde stabil produksjon [5]. I området rundt Salmon Evolution er det mye husdyrhold, slik at en kombinasjon i en lokal reaktor er en mulig løsning.

- **Forbehandlingsteknologi:** En forbehandlingsteknologi ble beskrevet etter mailkorrespondanse med CEO hos Ductor Sunndal AS, Mats Borgesen. Biogassanlegget til Ductor Sunndal AS benytter en forbehandlingsteknologi som muliggjør produksjon av biogass fra fiskeslam med høyt nitrogeninnhold. Teknologien går ut på å utføre hydrolysesteget separert fra resten av prosessen. Dermed kan nitrogen gjenvinnes som ammonium før anaerob nedbrytning. Ammonium separeres derfor fra substratet før selve produksjonen av biogass [14].

4.2 Rensing av slam

I et landbasert oppdrettsanlegg er det et krav om akkumulasjon av fiskeslam før avløpsvann slippes ut i havet. Årsaken er at kystområder ikke skal bli overbelastet med næringsstoff [12]. En beskrivelse av renseanlegg for slam ble gitt etter samtaler med ekstern faglig mentor, Olav Lyngstad.

I anlegget på Indre Harøya renses slamvann i ett trommelfilter levert av Hydrotech, vist i Figur 4.1. Trommelfilteret har en maskeåpning på 80 mikron. Her kommer vann med ett tørrstoffinnhold på 0.003%. Vannet går inn i trommelfilteret, som er plassert i et teknisk rom i anlegget. I trommelfilteret renses vann for slam slik at tørrstoffinnholdet ved utgangen av filteret ligger på 0.5-1%. Salmon Evolution har et krav om å rense ut minst 64% suspenderte stoff fra vannet, og trommelfilteret fjerner minst 70% suspendert stoff fra vannet. Ved utgangen av trommelfilteret føres vann med ett gjenværende varmeinnhold gjennom en varmeveksler, slik at den resterende varmen kan nyttes til oppvarming i anlegget.



Figur 4.1: Trommelfilter levert av Hydrotech.

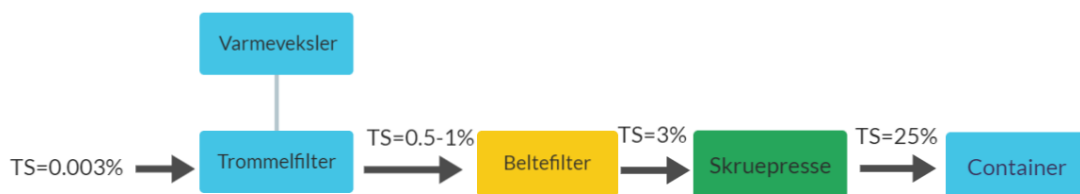
Videre sendes slam til et slambehandlingsanlegg, levert av Blue Ocean Technologies, vist i Figur 4.2. Her avvannes slam først i et beltefilter som gir ett tørrstoffinnhold på 3%

ved utgang av filteret. Deretter avvannes slammet ytterligere i en skruepresse som gir ett tørrstoffinnhold på 25%. Når behandling av slam er fullført, lagres det i en container. Fra container hentes slam med trailer.



Figur 4.2: Anlegg for behandling av slam. Levert av Blue Ocean technologies..

Et flytdiagram av anlegg for behandling av slam, med de ulike komponentene, er vist i Figur 4.3. I anlegget på Indre Harøya, er det små variasjoner i mengde slam som renses ut av anlegget, som forklart av ekstern faglig mentor. Når en meter fisken med 1 kg for, kommer det omtrentlig ut 1 kg slam med en andel TS på 25%. Data på daglig mengde slam fra oppdrettsanlegget er oppgitt fra Salmon Evolution. Datapunktene, som strekker seg over 378 dager, er beregnet for byggetrinn 4. Byggetrinn 4 innebærer fullt utbygd anlegg med 48 kar [10].



Figur 4.3: Flytskjema for behandling av slam.

4.3 Forutsetninger for biogassproduksjon

Anaerob nedbrytning av organisk materiale utføres av ulike mikroorganismer. For at mikroorganismene skal trives i reaktoren kreves det ulike forutsetninger.

4.3.1 Temperatur og pH

Det skilles mellom mesofile og termofile temperaturbetingelser under anaerob nedbrytning [6]. Med mesofile betingelser ligger temperatur i prosessen mellom 20-45°C, vanligvis rundt 37°C. Mens med termofile betingelser ligger temperaturen mellom 45-70°C, med en gjennomsnittlig temperatur på 55°C. Mesofile betingelser er lettere å håndtere samt gir en mer stabil produksjon, mens termofile betingelser gir en høyere biogassproduksjon [16]. Dannelsen av metan kan foregå ved lavere temperaturer, men prosessen vil da ta betydelig lengre tid [6]. En annen forutsetning for biogassproduksjon er pH verdier mellom 6.5 og 7.4 i biogassreaktor. pH mellom disse verdiene sannsynliggjør utviklingen av metanogene bakterier [17].

4.3.2 Karbon og nitrogen forhold

Forholdet mellom karbon og nitrogen i et substrat er en egenskap som har stor innvirkning på biogasspotensialet [18]. Tilstedeværelse av nitrogen tilrettelegger fremstilling av aminosyrer og protein, mens karbon fungerer som en energikilde for mikrober. Overflod av karbon forårsaker akkumulering av karbondioksid i biogassen, mens overflod av nitrogen forårsaker akkumulering av ammonium. I en optimal biogassproduksjon bør forholdstallet ligge mellom 20-30 deler karbon og en del nitrogen [6]. Bakgrunner for dette forholdstallet er at metanogene bakterier forbruker karbon 20-30 ganger raskere enn de forbruker nitrogen [18].

Analyser av nitrogeninnhold i fiskeslam har vist et lavt forholdstall mellom karbon og nitrogen [19]. Dersom fiskeslam skal brukes som substrat i biogassproduksjon er det derfor nødvendig med tiltak for å øke forholdet.

4.3.3 Flyktige fettsyrer

I en stabil biogassproduksjon blir organisk materiale nedbrutt til flyktige fettsyrer som eddiksyre. Disse spaltes videre til karbondioksid og metan. Dersom konsentrasjonen av flyktige fettsyrer blir for høy, vil stoffene akkumulere og pH verdien i reaktoren vil falle [6]. Biogassproduksjonen vil da hemmes. Konsentrasjonen av flyktige fettsyrer er av den grunn en essensiell forutsetning for stabil biogassproduksjon.

4.3.4 Kjemisk oksygenforbruk - KOF

Kjemisk oksygenforbruk gir et mål på hvor mye metan som kan produseres fra et substrat [6]. KOF defineres som andel nedbrytbart organisk stoff i vann [20]. Analyser av fiskeslam har vist en høy konsentrasjon av KOF sammenlignet med andre substrat, som for eks. husdyrgjødsel [19].

4.3.5 Hydraulisk oppholdstid

Hydraulisk oppholdstid er tidsrommet som et substrat tilbringer i en et biogassreaktor fra innmating til ferdig produsert gass [6]. Oppholdstiden varierer med hensyn til hvilket substrat som blir tatt i bruk og type reaktor, men vil vanligvis ligge mellom 15-30 dager [21]. Fiskeslam har en høyere organisk belastning på biogassreaktorene enn for eks. husdyrgjødsel. Her defineres organisk belastning som KOF per liter slam [19]. En konsekvens av dette er at en kan mate inn mindre volum i reaktoren per tid, og den hydrauliske oppholdstiden øker. Den hydrauliske oppholdstiden for fiskeslam vil variere med næringsinnhold og type reaktor, som vist i de ulike forøkene med slam fra settefiskanlegg på Smøla [15] og Tingvoll [19].

4.4 Produksjon av biogass

Produksjon av biogass i en reaktor foregår i tre steg [6]. De tre stegene er hydrolyse, syredannelse og metandannelse. Prosessen blir utført av en rekke ulike mikroorganismer. Produsert råbiogass og biogass oppgis i normalkubikkmeter Nm^3 , som tilsvarer gass ved atmosfærisk trykk og temperatur på $0^\circ C$ [22].

Produsert mengde biogass kan beregnes ved å ta i bruk Formel 4.1. Etter en samtale med Ingvar Kvande, forsker hos NORSØK, ble det tilsendt et regneark i excel med relevante beregninger for biogassproduksjon med fiskeslam. Regnearket er utviklet av LRF, som er en forening for bønder i Sverige [23]. Senere er regnearket tilpasset norske forhold av NILF i samarbeid med NORSØK [24]. I Formel 4.1 er v potensielt volum CH_4 , oppgitt i normalkubikkmeter, per tonn organisk materiale i fiskeslam. Verdien er funnet i forsøk med total nedbrytning av fiskeslam. Det er den teoretisk maksimale verdien. I en reell produksjon vil denne verdien være lavere [24]. m_{VS} er total organisk masse i TS. η er virkningsgraden til en reaktor. Det er krevende å definere en virkningsgrad i et biogassanlegg. Årsaken er at et substrat ofte inneholder stoff som ikke er nedbrytbare. Eksempelvis fiskebein [25]. I denne rapporten defineres virkningsgraden som andelen organisk materiale nedbrutt fra den totale mengden VS.

$$m_{VS} \cdot \eta \cdot v = V_{CH_4} \quad (4.1)$$

4.4.1 Hydrolyse

Det første steget går ut på å spalte komplekse molekyler som proteiner, fett og karbohydrater [6]. Disse molekylerne er for store til å danne metan direkte, og må derfor spaltes til mindre molekyler. Proteinene spaltes til aminosyrer, fett spaltes til fettsyrer og glyserol, og karbohydrater spaltes til ulike sukkerarter. Spaltingen utføres av enzymer som fungerer som katalysatorer.

4.4.2 Syredannelse

Syresteget består av to steg. Først brytes sukker, aminosyrer og alkoholer videre ned til organiske syrer, karbondioksid, ammoniakk og hydrogen av syreproduserende bakterier [6]. I det neste steget omdannes ulike fettsyrer, alkoholer, aminosyrer og karbonsyrer til karbondioksid og acetat. Acetat er et ester av eddiksyre. I denne reaksjonen frigis hydrogen.

4.4.3 Metandannelse

Det siste steget er dannelse av metan. Metan dannes vanligvis ved at mikroorganismer omdanner acetat til metan og karbondioksid [4]. Prosessen utføres av mikroorganismer kalt arker. Arker har mange likhetstrekk med bakterier, men skiller seg fra disse ved at de er metanogene [4]. Dvs. at de utnytter en organisk kilde for karbondioksid og reduserer det til metan. Arkene er svært sensitive til omgivelsene. Metandannelse kan også skje ved at karbondioksid og hydrogen spaltes til metan og vann, men dette er mindre vanlig.

4.5 Rensing av råbiogass til biogass

Råbiogassen inneholder stoffer som bør renses før gassen tas i bruk. Stoffene innebærer hydrogensulfid, ammonium og vanddamp. Disse er problematiske fordi de kan føre til korrosjon i metallkomponenter i lagringstanker og generatorer. I denne oppgaven defineres rensed biogass som biogass som kun er separert fra hydrogensulfid, ammonium og vanddamp osv. Grunnet lave mengder av disse stoffene kan vol% neglisjeres i videre beregninger med biogass [26].

Dersom biogassen skal utnyttes til drivstoff, eller fraktes over lengre avstander, er det nødvendig med videre rensing av karbondioksid. Dette er beskrevet i kompendium til emnet Fornybar energi grunnkurs. Karbondioksid har ingen brennverdi, slik at et høyt innhold av CO_2 gir en lavere brennverdi. Oppgradert biogass består av tilnærmet ren metan. Innholdet er vanligvis over 97 vol% metan, 2 vol% eller mindre karbondioksid og under 0.10 ppm hydrogensulfid. Oppgradert biogass inneholder sjeldent 100% metan, da det både er vanskelig og dyrt å fjerne absolutt alt av andre stoff [21]. I renseprosessen vil det være små tap av metan. En studie på tap av metan, i anlegg for oppgradering, har vist gjennomsnittlig tap på 0.81%. Tapet varierer med hensyn på metode for rensing [27]. Det er flere ulike løsninger for rensing av karbondioksid. Av disse er det hovedsaklig to typer som brukes i Norge:

- **Membraner:** Gassen pumper opp til et trykk mellom 10-20 bar beskrevet i en svensk studie på rensemetoder. Videre føres biogassen gjennom flere membran fiber hvor det kun er karbondioksiden som kan passere. Årsaken til det er ulikheter i permeabilitet mellom karbondioksid og metan. Stoffene separeres og resultatet er oppgradert biogass [28]. Denne metoden gir et gjennomsnittlig tap av metan på 0.56% [27]
- **Absorpsjonsanlegg:** Gassen føres gjennom en væske, vanligvis vann, som binder seg til karbondioksid [6]. Denne metoden gir et gjennomsnittlig tap av metan på 1.97% [27],

4.6 Biorest

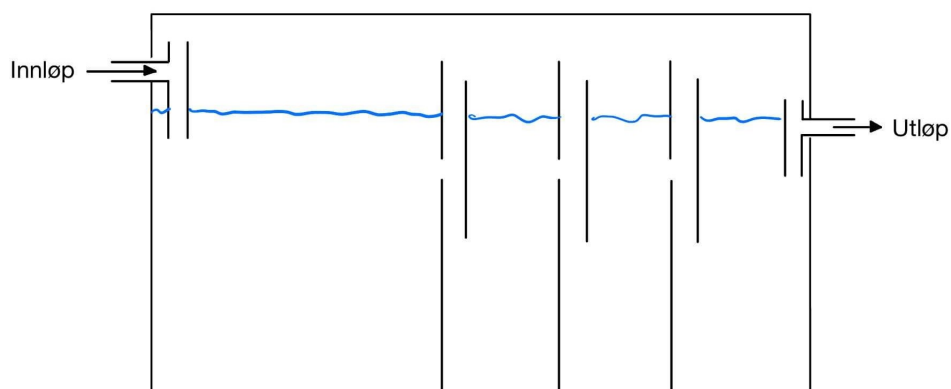
Etter ferdigstilt produksjon av biogass står man igjen med et gjenværende produkt i reaktoren. Denne massen defineres som biorest [15]. Biorest fra lakseavfall har et høyt innhold av nitrogen og fosfor [15]. Dette er to av tre hovedingredienser i kunstgjødsel, der den siste er kalium [29]. Disse stoffene fungerer som plantenæring og er essensielle næringstoffer innen jordbruk. Det er derfor et potensial for å bruke bioresten fra biogassproduksjon til gjødsel [29]. Et problem ved bruk av fiskeslam som gjødsel er høyt innhold av sink [13].

4.7 Biogasteknologi

Biogass produseres i en reaktor. Generelt sett er det to typer som utnyttes til produksjon av biogass, Anaerobic baffle reactor, og gjennomstrømningsreaktor.

4.7.1 Anaerobic baffle reactor - ABR

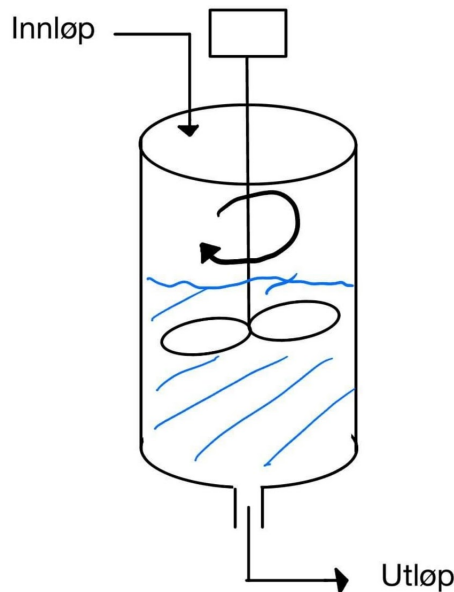
Anaerobic baffle reactor eller ABR reaktor, vist i Figur 4.4, er en anaerob reaktor [30]. En ABR reaktor er fordelt i ulike rom adskilt med skillevegger. Slammet beveger seg mellom de ulike rommene slik at kontaktiden mellom slam og mikrober blir så høy som mulig. Mikrobene i en ABR-reaktor opphoper seg i granuler, som vil si at de er fordelt i små korn. Granulene hindrer at mikrober følger med slamgjennomstrømningen og forblir i reaktoren. For å sikre granulene ytterligere mot uttømming, kan en galvimetrisk separator tas i bruk. En galvimetrisk separator tilbakefører granulene til reaktoren. Forsøk med biogassproduksjon fra fiskeslam i ABR-reaktor er utført på Sterner sitt settefiskanlegg på Smøla[15].



Figur 4.4: Skisse av en ABR reaktor

4.7.2 Gjennomstrømningsreaktor - CSTR

CSTR reaktor, også kalt gjennomstrømningsreaktor er den vanligste formen for biogassreaktor. I en CSTR reaktor, som vist i Figur 4.5, røres innholdet i reaktoren sammen kontinuerlig i en sylindrisk tank [6]. Substrat pumpes inn i reaktoren, og biorest hentes ut hver dag. Forsøk med fiskeslam er utført i en gjennomstrømningsreaktor på Tingvoll [5]. Forsøket viste ustabilitet i biogassproduksjon med rent fiskeslam grunnet forhøyet nivå av flyktige fettsyrer. En miks derimot, med 20% fiskeslam og 80% husdyrgjødsel blandet med myse, ga lovende resultater.



Figur 4.5: Skisse av en gjennomstrømningsreaktor.

4.8 Beskrivelse av lagring etter endt produksjon av biogass

Avhengig av bruksområdet til produsert biogass og mengde biogass, er det flere ulike løsninger for lagring av ferdigstilt gass.

4.9 Lagring ved atmosfærisk trykk i gasspose

Dersom biogassen skal benyttes ved produksjonsstedet kan gassen lagres i en gasspose ved atmosfærisk trykk, som forklart av Ingvar Kvande fra NORSØK. Denne løsningen er brukt i biogassanlegget i Elnesvågen, bygd av Hustadvika Biokraft AS. Her produseres biogass fra husdyrgjødsel som videre lagres i en $20m^3$ gasspose. Gassposen er koblet til en generator som starter når posen er full. På den måten kan en gasspose fungere som en buffer mellom biogassproduksjon og produksjon av varme/strøm [24].

4.9.1 Komprimert - CBG

Komprimert biogass eller CBG er oppgradert biogass som er komprimert til et trykk på rundt 250 bar [21]. CBG har veldig like egenskaper som komprimert biogass CNG, slik at CBG kan erstatte CNG i blant annet kjøretøy og industri. Volumet til CNG ligger under 1% av volumet før kompresjon [31]. Da CBG er tilnærmet likt CNG vil dette også gjelde for komprimert biogass. Hos mindre biogassanlegg er CNG en god løsning siden billigere [25].

For å dimensjonere lagertanker til lagring av komprimert gass kan ideell gasslov, vist i Formel 4.2, benyttes. Formel 4.2 er hentet fra kompendiet til faget Hybride energisystemer på skip. Formel 4.2 forutsetter ideell gass [32]. En reell gass vil avvike fra idealet. Dersom en gass er under høyt trykk vil den få et høyt avvik fra ideell gass [33].

$$pV = nRT \quad (4.2)$$

4.9.2 Flytende - LBG

Flytende biogass eller LBG er oppgradert biogass som er kjølt ned til kokepunktet til metan, på -162 °C [34]. Denne løsningen gir et mye mer energitett produkt, sammenlignet med komprimert biogass, som forklart av Andreas Berg, utviklingsingeniør hos Gasum. Større energitetthet gir bedre logistikkmuligheter. Det er dermed lettere å transportere. LBG har svært like egenskaper som flytende naturgass, LNG. Flytende biogass kan derfor utnyttes i industri og transport som er vant med bruk av flytende naturgass. Ulempen med LBG er at nedkjøling kan være en energikrevende og dyr prosess, satt i forhold til komprimering av biogass [25].

Når en skal beregne volum av flytende LBG er ikke lengre ideell gasslov gyldig, da den kun gjelder i gassfase. Istedet kan volumet til LBG beregnes ved å dele massetettheten ρ med massen m produsert biogass. Massen finnes ved å dele potensiell energimengde på ϵ_w til metan som vist i Formel 4.3. Siden LBG er tilnærmet lik LNG kan massetetthet til LNG, ved en temperatur på -162 °C , benyttes. Massetettheten ρ til LNG, med metaninnhold på 99.8%, er 405.4 kg/m^3 [35].

$$m = \frac{E}{\epsilon_w} \quad (4.3)$$

5 Bruksområder for biogass

Generelt sett er det tre hovedbruksområder for biogass beskrevet i rapporten; veileder for biogassanlegg. Et bruksområde for biogass er å produsere varme. Denne varmen kan blant annet utnyttes til oppvarming av vann i et fjernvarmeanlegg, eller til å oppvarme vann i selve oppdrettsanlegget. Kraftvarme eller CHP er kombinert produksjon av varme og strøm. Dersom biogassen skal benyttes til drivstoff er det nødvendig med en behandling slik at metannivået overstiger 97% [6]. Oppgradert biogass kan også utnyttes i et naturgassnett [25].

6 Kan biogassen kjøres til biogassanlegget på Skogn

Norges største anlegg for produksjon av biogass ligger i Skogn, i Trøndelag, som forklart på anlegget sine hjemmesider. Her produseres flytende biogass fra en rekke ulike råstoff, blant annet avfall fra fiskeoppdrett og skogbruk. Anlegget har en installert kapasitet på 25 tonn flytende biogass per dag. Biogass fra anlegget brukes til en rekke formål, men hovedsaklig som drivstoff innen norsk kollektivtrafikk [36].

Biogassanlegget i Skogn har erfaring med bruk av fiskeslam til Biogassproduksjon. Av den grunn kan det være aktuelt å sende slam til Skogn, framfor å etablere et lokalt anlegg til produksjon av biogass. Om denne løsningen skal være aktuell er det nødvendig å undersøke potensiell mengde produsert energi og utslipp spart fra slam. Resultatet må settes opp mot utslipp og energi brukt på frakt av slam fra Salmon Evolution til Skogn.

7 Metode

Framgangsmåten for beregninger utført, basert på oppgitt data, er beskrevet under. Utførte beregninger innebærer potensiell mengde råbiogass, potensiell mengde oppgradert biogass og energiinnhold i gass. Videre er det utført en dimensjonering av potensielle lagetanker, for komprimert og flytende biogass. Siden utbygging foregår i flere trinn over flere år, er det mulig med produksjon av gass før anlegget er fullt utbygd. Derfor er potensiell mengde biogass beregnet for både byggetrinn 1, 3 og 4. Som henholdsvis innebærer 12, 24 og 48 kar [10].

7.1 Potensiell mengde slam ut av anlegget

Mengde slam for de ulike trinnene er beregnet med en antagelse om lik mengde slam per kar uavhengig av byggetrinn. Slik at beregninger for mengde slam i byggetrinn 1 og 3 er utført ved å dele mengde slam fra byggetrinn 4 på 48, for så å gange med mengde kar for byggetrinn 1 og 3. Byggetrinn 2 er utelukket, da det tilsvarer byggetrinn 1 i antall kar.

TS innhold i oppgitt data er gitt til å være 100%, mens i praksis vil andel TS i slam ut av anlegget ligge på 25%. Andel TS har ingen betydning for videre beregninger siden mengde biogass og energi kun beregnes på grunnlag av mengde tørrstoff. Det er fortsatt interessant å se på den totale massen med vann og TS med tanke på transportberegninger.

7.2 Beregning av potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass

Verdier brukt i beregninger av potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass er vist i Tabell 7.1 er Andel metan i råbiogass settes til 62%. Dette begrunnes med at tidligere forsøk med biogassproduksjon fra fiskeslam har vist at metaninnholdet i vol% i biogassen ligger stabilt rundt 62% [19]. For å få mengde råbiogass ganges dermed mengde biogass med en faktor på $100/62$.

En formel for å regne ut potensiell mengde metan fra mengde fiskeslam er gitt fra regneark beskrevet i delkapitel 4.4. Denne er vist i formel 4.1. Her er m_{VS} masse organisk materiell av TS i tonn. Formelen beregner volum av ren metan per tonn organisk materiale. Mengde

Tabell 7.1: Verdier brukt i beregninger av potensielt volum råbiogass og oppgradert biogass.

Symbol	Verdi	Enhet	Kilde
$maks_{VS}$	0.83	[-]	[19]
min_{VS}	0.655	[-]	[15]
η	0.744	[-]	[19],[15]
v	720	$[Nm^3/Tonn]$	[24]

VS i slammet er en essensiell faktor i beregning av mengde biogass og energi. Analyser av fiskeslam viser stor variasjon i andel VS. Av den grunn sees det på en maksimum ($maks_{VS}$) og minimum (min_{VS}) faktor av andel VS. Tidligere forsøk i Tingvoll med slam fra settefiskanlegg har vist en andel VS på 83% [19], mens et annet forsøk med slam fra settefiskanlegg på Smøla har vist en andel VS på 65.5% [15]. Disse verdiene benyttes derfor i videre utregninger. Utregninger for biogass med en andel VS på 83% omtales i denne rapporten som Biogass 1, forkortet til *BG1*. Biogass med en andel VS på 65.5% omtales som Biogass 2, forkortet til *BG2*.

Virkningsgraden η er andel VS nedbrutt fra den totale mengden VS. Ulike forsøk viser også store variasjoner for denne verdien. Størst innvirkning her er den hydrauliske oppholdstiden, siden lengre tid gir mer nedbrytning av substrat [24]. Forsøket på Smøla viser en virkningsgrad på 68.7% [15], mens forsøket på Tingvoll viser en virkningsgrad på 80% [5]. I videre beregninger brukes en middelfaktor η på 74.4%. Etter fullførte beregninger skal resultatet deles på mengde slam. Formålet er å gi et estimat på potensiell mengde gass per masse slam.

7.3 Beregning av potensiell energimengde

Potensiell energimengde fra biogass beregnes ut i fra volumetrisk energiinnhold ϵ_v for metan [21]. ϵ_v er basert på nedre brennverdi, og gitt til å være $9,94 kWh/Nm^3$. Biogass inneholder både metan og karbondioksid, men karbondioksid har ingen brennverdi. Av den grunn beregnes energimengden i biogass kun fra mengde metan. Volumetrisk energiinnhold for metan er gitt til å være $9,94 kWh/Nm^3$. Den totale årlige energimengden beregnes ved å gange v for metan med mengde biogass i Nm^3 og andel metan i biogassen. Estimat for energimengde skal videre deles på mengde slam. Formålet er å gi et estimat på energitetthet per kg slam.

7.4 Dimensjonering av lagringstank

Etter endt produksjon og rensning av biogass er det nødvendig å lagre gass i lagertanker. I denne delen skal nødvendig lagervolum beregnes for en potensiell lagertank. Beregningene skal gjennomføres for både komprimert og flytende biogass. Som begrunnet i delkapitel 4.5 antas det lagring av tilnærmet 100% metan. Alle nødvendige verdier til beregninger for dimensjonering av lagertanker er gitt i Tabell 7.2. Som beskrevet i delkapitel 4.3.5 vil hydraulisk oppholdstid variere. I lagerberegninger antas det en hydraulisk oppholdstid på en måned, som er i det øvre sjiktet av vanlig oppholdstid. Nødvendig lagerkapasitet beregnes til en runde produsert biogass, der en runde tilsvarer tiden substrat oppholder seg i reaktor.

Tabell 7.2: Verdier brukt i beregning av lagringsvolum.

Symbol	Verdi	Enhet	Kilde
ϵ_w	13.9	[kWh/kg]	[21]
p_1	101 325	[Pa]	[32]
p_2	$250 \cdot 10^5$	[Pa]	[21]
ρ_{LNG}	405.4	[kg/m ³]	[35]
R	8.314472	[m ³ Pa/K · mol]	[37]
T_1	273.15	[K]	[32]
T_2	291.15	[K]	[-]
T_3	-162	[°C]	[34]

7.4.1 Komprimert biogass - CBG

Det antas at komprimeringsprosessen foregår i et lukket system slik at ideell gasslov omskrives, som vist i Formel 7.1. Her vil n være konstant på grunn av konstant antall mol i et lukket system.

$$n = \frac{P_1 V_1}{T_1 R} = \frac{P_2 V_2}{T_2 R} \quad (7.1)$$

Volum, temperatur og trykk er gitt før kompresjonen. Volum er beregnet i beregning av potensiell mengde biogass, temperatur for normalbetingelser er gitt til å være T_1 og trykk for normalbetingelser er gitt til å være p_1 . Ut ifra disse verdiene kan n beregnes. n kan videre utnyttes i en beregning av volum V_2 etter kompresjonen, som vist i Ligning 7.2. Her er T_2 bestemt til å være lik temperatur som omgivelsene til lagertanken. Temperatur til omgivelsene bestemmes til å være 18°C.

$$V_2 = \frac{n T_2 R}{p_2} \quad (7.2)$$

7.4.2 Flytende biogass - LBG

Ved dimensjonering av lagertanker til flytende biogass må massen til biogassen beregnes. Massen kan beregnes ved å dele potensiell energimengde på det vektbaserte energiinnholdet ϵ_w til metan vist i Formel 4.3. Siden LBG er tilnærmet likt LNG kan tettheten ρ til LNG, ved temperatur T_3 , benyttes.

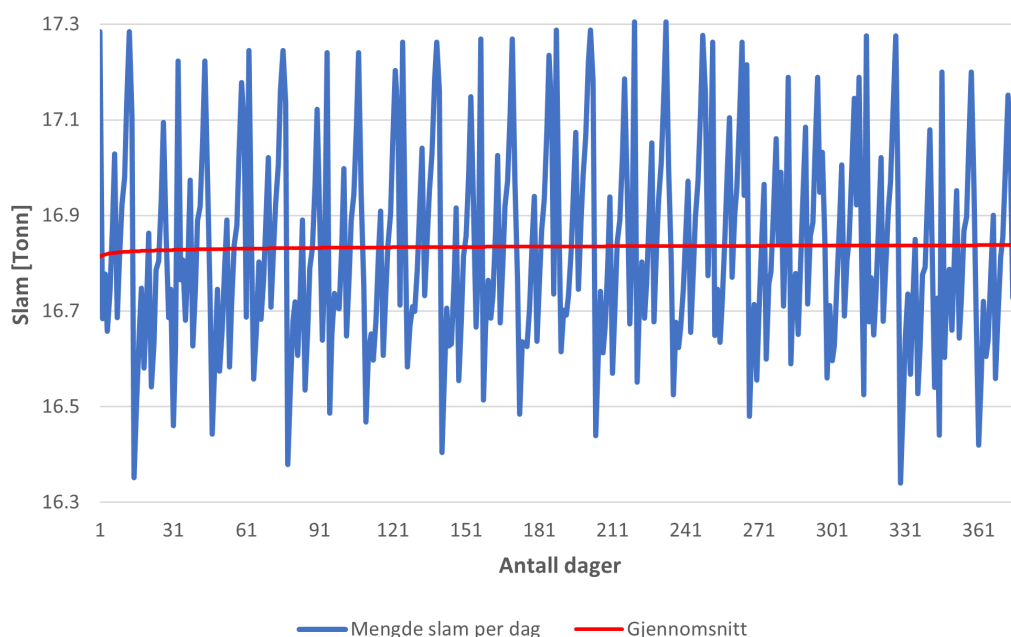
8 Resultat og diskusjon

I denne delene er resultatene, fra beregningene beskrevet i Delkapittel 7, presentert. De gitte resultatene i denne er preget av usikkerhet i alle ledd. Av den grunn bør verdiene presentert her kun brukes som et estimat på potensielle mengder-

8.1 Potensiell mengde slam ut av anlegget

Som vist i Figur 8.1 varierer daglig mengde slam ut av anlegget svært lite. En biogassproduksjon på slammet vil derfor kunne belage seg på en forutsigbar mengde slam fordelt over hele året, med lite sesongbaserte variasjoner.

Det er viktig å presisere at grafen kun viser mengde slam i vekt, uten å si noe om variasjoner i næringsinnhold. Som tidligere forklart i Delkapittel 4.1 varierer innholdet av næringsstoffer i slam gjennom året. Dette grunnet bruk av ulikt for, ulike tall for fôrspill og variasjoner i fordøyelighet hos fisk. Data oppgitt fra salmon Evolution gir kun mengde slam i vekt, uten å si noe om variasjoner i næringsinnhold. Biogasspotensialet til slam kan av den grunn variere over tid, selv om mengden slam ikke gjør det. Her er det nødvendig med ytterligere analyser av næringsinnholdet til slam over en lengre periode for å fastsette sesongbaserte variasjoner.



Figur 8.1: Daglig mengde slam ut av anlegget med andel TS på 100%.

En antagelse fra Figur 8.1 er at utregninger med grunnlag i gjennomsnittsverdier vil gi et tilnærmet riktig estimat på produksjonsmengde biogass. Gjennomsnittsverdier for daglig, ukentlig og månedlig mengde slam produsert i anlegget er vist i Tabell 8.1.

Tabell 8.1: Mengde slam per byggetrinn med andel TS på 100%.

Byggetrinn	1	3	4
Enhet	[tonn]	[tonn]	[tonn]
Daglig gjennomsnitt	4.21	8.42	16.83
Ukentlig gjennomsnitt	29.47	58.94	117.81
Månedlig gjennomsnitt	128.05	256.1	511.9
Daglig max	4.32	8.65	17.31
Daglig min	4.09	8.17	16.34
Total mengde	1 590.81	3 181.62	6 363.25

8.2 Potensiell mengde råbiogass og oppgradert biogass

Basert på produsert mengde slam fra anlegget er potensiell mengde råbiogass og oppgradert biogass beregnet for både *BG1* og *BG2*. Resultatene gir et estimat på forventet volum produksjonsmengde biogass og råbiogass, samt potensiell mengde energiinnhold. Den største usikkerheten er å finne i anaerobisk nedbrytning av slam fra fisk. Årsaken er høy andel nitrogen i forhold til karbon og høy andel flyktige fettsyrer som beskrevet i Delkapittel 4.3.2 og 4.3.3. Grunnet lite erfaring med biogassproduksjon fra fiskeslam, er det stor usikkerhet knyttet til beste måte å håndtere høye nivåer av de uønskede stoffene.

Per idag er den sikreste løsningen å produsere biogass fra fiskeslam i en kombinasjon med annet substrat. Kriteriet til et eventuelt kombinasjonssubstrat er at det skal jevne ut forholdet mellom karbon og nitrogen, samt det høye nivået av flyktige fettsyrer. Gjødsel fra husdyr er en god kandidat som stabilisator. Dette er et godt alternativ for Salmon Evolution grunnet mye husdyrhold i nærmiljøet til anlegget. Som forklart i Delkapittel 4.1

En annen stor usikkerhet er at beregningene baserer seg på tall fra litteraturen, og ikke innhold i slam fra anlegget til Salmon Evolution. Årsaken er mangel på data. Det er store variasjoner i næringsinnhold i fiskeslam, som beskrevet i Delkapittel 4.1. Av den grunn kan beregningene kun sees på som et estimat på en generell basis når det gjelder fiskeslam. Dersom det er ønskelig med mer nøyaktige beregninger, basert på kun slam fra Slamon Evolution, er det nødvendig med ytterligere analyser.

Verdier oppgitt i litteraturen baserer seg på settefiskanlegg grunnet få storskala landbaserte oppdrettsanlegg. Settefiskanlegg er beskrevet i Delkapittel 2.2. Det er usikkerhet knyttet til ulikheter i slam fra landbasert oppdrettsanlegg og settefiskanlegg. Samt hvordan saltvannsinhold i slam vil påvirke biogassproduksjonen. I denne rapporten er det antatt at ulikhetene er neglisjerbare, men det er ikke nødvendigvis tilfellet.

8.2.1 Råbiogass

Potensiell mengde råbiogass basert på BG1 og BG2 er vist i Tabell 8.2

Tabell 8.2: Potensiell mengde råbiogass fra slam.

Byggetrinn	1	3	4
BG1			
Enhet	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$
Daglig gjennomsnitt	3019.4	6038.7	12 075.8
Ukentlig gjennomsnitt	21 135.8	42 270.9	84 530.6
Månedlig gjennomsnitt	91 840.1	183 677.1	367 305.6
Total mengde	1 140 794.5	2 281 603.3	4 563 213.8
BG2			
Byggetrinn	1	3	4
Enhet	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$
Daglig gjennomsnitt	2382.6	4764.2	9529.3
Ukentlig gjennomsnitt	16 678.2	33 349.4	66 705.1
Månedlig gjennomsnitt	72 470.8	144 911.1	289 849.5
Total mengde	900 271.2	1 800 542.4	3 601 090.4

Som vist i Tabell 8.2 vil *BG2* gi en betydelig lavere mengde gass, enn hva som er produsert fra *BG1*. Dette tyder på at andel organisk materiale i slam er en svært viktig faktor når det gjelder gass- og energipotensial. Dersom Salmon Evolution skal produsere biogass er det essensielt å fastsette andel organisk materiale i tørrstoff.

Volum råbiogass er beregnet fra den maksimale teoretiske verdien på v , beskrevet i Delkapittel 4.4. Siden dette er en maksimal teoretisk verdi vil den i en reell biogassproduksjon være lavere. Grunnet manglende datagrunnlag på minimum verdi av v , er den maksimale teoretiske brukt som grunnlag i beregninger. Resultatene vil av den grunn reflektere et maksimalt potensial for biogass og energi fra fiskeslam.

8.2.2 Oppgradert biogass

Som forklart i Delkapittel 4.5 er oppgradert bioagass, brukt som drivstoff, tilnærmet ren metan. Mengde potensiell oppgradert biogass, beregnet fra mengde slam ut av anlegg, er vist i Tabell 8.3. I denne rapporten er det gjort en antagelse om 100% metan. I en reell biogassproduksjon vil det være vanskelig å rense vekk alt av andre stoff. Den reelle andelen metan vil da ligge mellom 97% og 100%. .

Tabell 8.3: Potensiell mengde oppgradert biogass fra slam.

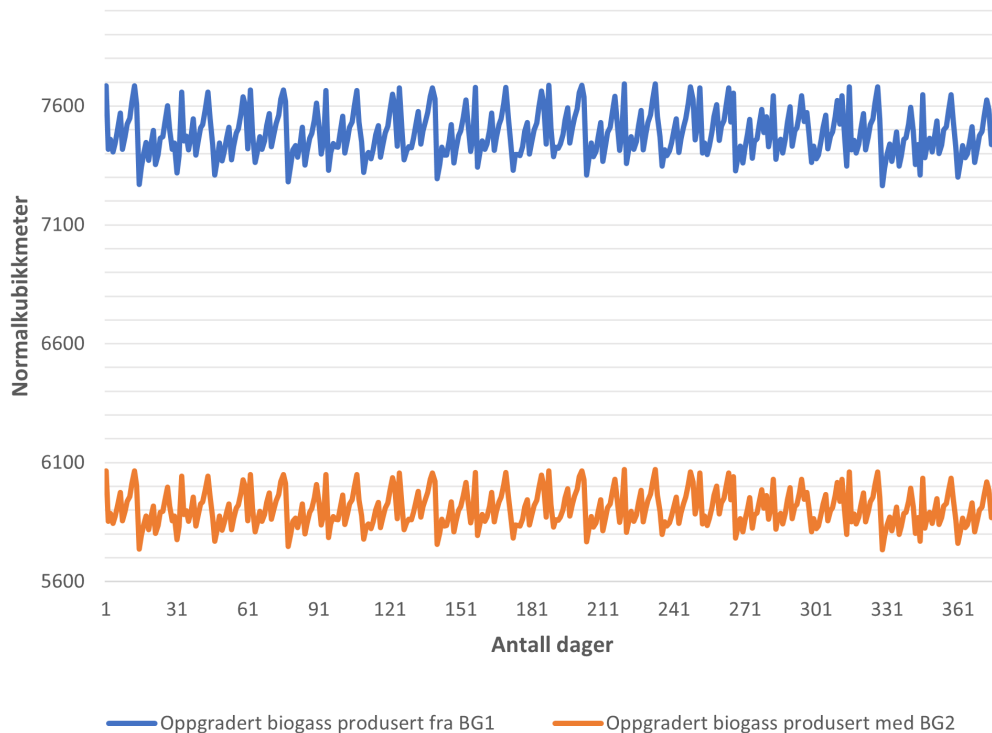
Byggetrinn	1	3	4
BG1			
Enhet	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$
Daglig gjennomsnitt	1871.8	3743.7	7487.3
Ukentlig gjennomsnitt	13 102.6	26 205.9	52 411.1
Månedlig gjennomsnitt	56 933.9	113 870.9	227 738.7
Total mengde	707 297	1 414 585.2	2 829 170.4
BG2			
Byggetrinn	1	3	4
Enhet	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$	$[Nm^3]$
Daglig gjennomsnitt	1477.2	2954.3	5908.7
Ukentlig gjennomsnitt	10 340.4	20 680.1	41 360.9
Månedlig gjennomsnitt	44 931.5	89 856	179 723
Total mengde	558 168	1 116 336	2 232 672.6

Tap av meten ved rensing av biogass er også nevnt i Delkapittel 4.5. I beregninger for oppgradert metan er tap av metan utelatt. Tap av metan er av den grunn et usikkerhetsmoment. Dersom Salmon Evolution skal oppgradere biogass er det viktig å påpeke at valg av rensemetode vil påvirke mengde metan tapt.

Tabell 8.4: Volum biogass per kg slam

<i>BG1</i>	<i>BG2</i>
$[Nm^3]$	$[Nm^3]$
0.44	0.35

I Tabell 8.4 er volumtettheten til oppgradert biogass per kg slam beregnet. Figur 8.2 viser daglig mengde produsert oppgradert biogass basert på BG1 og BG2. Her vises det tydelig at høyere andel organisk materiale i slam gir betydelig mer produsert oppgradert biogass.



Figur 8.2: Daglig mengde potensielt produsert oppgradert biogass basert på BG1 og BG2.

8.3 Potensiell energimengde

Energiinnhold i den potensielt produserte gassen er gitt for BG1 og BG2 i Tebell 8.5. Den totale årlige energimengden tilsvarer ca. 10.5% av årlig energiforbruk i anlegget basert på BG1, og ca. 8% basert på BG2.

Tabell 8.5: Potensiell energimengde fra slam.

BG1			
Byggetrinn	1	3	4
Enhet	[MWh]	[MWh]	[MWh]
Daglig gjennomsnitt	18.7	37.4	74.8
Ukentlig gjennomsnitt	130.9	261.9	523.8
Månedlig gjennomsnitt	569	1138	2276
Total mengde	7068.7	14137.4	28 274.7
BG2			
Byggetrinn	1	3	4
Enhet	MWh	MWh	MWh
Daglig gjennomsnitt	14.8	29.5	59.1
Ukentlig gjennomsnitt	103.3	206.7	413.4
Månedlig gjennomsnitt	449	898	1796.2
Total mengde	5578.3	11 156.7	22 313.3

Tabell 8.6: Energitetthet per kg slam

BG1 [kWh/kg]	BG2 [kWh/kg]
4.4	3.5

8.4 Dimensjonering av biogassanlegg

Det var opprinnelig en plan om dimensjonering av et biogassanlegg basert på mengde slam tilgjengelig. Planen ble sidelagt grunnet lite erfaring av biogassproduksjon basert på ren avfall fra fiskeoppdrett blant aktører innen biogasssteknologi. Usikkerheten knyttet hvordan en kan oppnå stabil biogassproduksjon med fiskeslam, uten å blande inn andre mer stabile substrat er såpass høy at en dimensjonering i denne rapporten ikke ville hatt en verdi. Det er flere interessante løsninger på markedet, som blant annet Ductor sin forbehandlingsteknologi beskrevet i Delkapittel 4.1

8.5 Dimensjonering av lagring

Lagringskapasitet, som vist i Tabell 8.7 og 8.8, er beregnet basert på en antagelse om hydraulisk oppholdstid på en måned for slam fra fisk. Her er det nødvendig med ytterligere forsøk med slam fra fisk i ulike type reaktorer for å kunne faste sette optimal hydraulisk oppholdstid til slam. Resultatene her kan dermed kun brukes som et eksempel

8.5.1 Komprimert biogass - CBG

Som beskrevet i Delkapittel 4.9.1 vil volumet av komprimert biogass ligge under 1% av gassvolum før kompresjon. Resultatene som viser forventet lagringsvolum for komprimert biogass, vist i Tabell 8.7, gir en vol% på 0.43% av gassvolum før kompresjonen.

Tabell 8.7: Potensielt lagringsvolum CBG ved en måneds biogassproduksjon ved $T=18^{\circ}\text{C}$ og $p=250$ bar

Byggetrinn	1	3	4
Enhet	[m^3]	[m^3]	[m^3]
BG1	246	491.9	983.9
BG2	194.1	388.2	776.4

Volumet ble beregnet fra en antagelse om ideell gass. I realiteten vil produsert CBG avvike fra idealet som beskrevet i Delkapittel 4.9.1. Det vil være et spesielt høyt avvik av idealet da CBG er under høyt trykk. Nøyaktig volum av CBG kan kun gis fra eksperimentelle målinger i en reell biogassproduksjon.

8.5.2 Flytende biogass - LBG

Beregnet volum LBG, vist i Tabell 8.8, er 41 Vol% av samme energimengde CBG. Dette bekrefter større energitetthet i flytende biogass sammenlignet med komprimert biogass, som beskrevet i Delkapittel 4.9.2. Dersom en skal oppgradere biogassen til enten CBG eller LBG, er dette svært nyttig kunnskap. Dersom produsert biogass skal fraktes langt, eller benyttes som drivstoff i kjøretøy som har begrenset lagringskapasitet kan det være en god ide å oppgradere til LBG.

Tabell 8.8: Potensielt lagringsvolum for LBG ved en måneds biogassproduksjon.

Byggetrinn	1	3	4
Enhet	[m ³]	[m ³]	[m ³]
BG1	101	202	404
BG2	79.8	159.3	318.8

9 Konklusjon

Beregninger har vist et høyt biogasspotensiale i slam fra et landbasert oppdrettsanlegg. Det er teknologiske utfordringer knyttet til produksjonen av biogass fra fiskeslam. Utfordringene er knyttet til høyt innhold av stoffer som kan skade mikrobene som står for produksjon av biogass. Av den grunn er det beste alternativet, per i dag, en biogassproduksjon basert på en kombinasjon av slam og annet substrat. Et eventuelt kombinasjonssubstrat bør jevne ut forholdet mellom karbon og nitrogen, der nitrogen er den begrensende parten når det gjelder slam fra laks. Kombinasjonen med husdyrgjødsel og slam er det beste alternativet basert på litteraturstudien utført i løpet av prosjektet. Ut i fra resultatene kan det konkluderes at andel organisk materiale i tørrstoff vil ha stor påvirkning på mengde produsert gass.

Fra beregninger utført tilknyttet lagring, er konklusjonen at komprimert gass gir et betydelig redusert volum enn gass i normalt tilstand. Når det gjelder flytende biogass bekrefter beregningene et mer energitett produkt sammenlignet med komprimert gass. Beregninger utført i rapporten er preget av store usikkerheter i alle ledd. Av den grunn kan resultatene kun brukes som et generelt estimat på produksjonsvolum biogass når det gjelder potensialet i fiskeslam. Dersom Salmon Evolution ønsker mer nøyaktige beregninger basert på slam fra deres anlegg, er det nødvendig med ytterligere analyser over lengre tid.

Videre arbeid

Rapporten har lagt et grunnlag for videre arbeid knyttet biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert fiskeoppdrett. I rapporten er ikke lønnsomheten til en eventuell biogassproduksjon undersøkt. Bruk av biogass er nevnt kort, men det kan være nyttig å gjøre videre undersøkelser og beregninger knyttet til mest hensiktsmessig bruk av produsert gass. Her kan det være interessant å sammenligne fordelene og ulempene ved eget bruk av gass i anlegg, kontra å selge videre. Salmon Evolution bør vurdere å analysere slam over lengre tid, slik at et mer nøyaktig estimat på biogasspotensial kan utarbeides.

Referanseliste

- [1] P. Frostad. «Vil femdoble lakseproduksjon i Norge». Section: Sjømat, Nyheter, Børs. (6. jul. 2021), adresse: <https://finansavisen.no/nyheter/sjomat/2021/07/06/7701220/vil-femdoble-lakseproduksjon-i-norge> (sjekket 19.05.2022).
- [2] S. Evolution. «Our story», [salmonevolution.no](http://salmonevolution.no/about-us/our-story/). (), adresse: <https://salmonevolution.no/about-us/our-story/> (sjekket 20.05.2022).
- [3] R. Løvaas, *biogass*, i *Store norske leksikon*, 14. okt. 2020. adresse: <http://snl.no/biogass> (sjekket 11.04.2022).
- [4] H. Aarnes, *metanogene bakterier*, i *Store norske leksikon*, 12. mar. 2021. adresse: http://snl.no/metanogene_bakterier (sjekket 11.04.2022).
- [5] J. Cebbel, R. Gebauer, L. Solli, H. Kittelsen og T. Briseid, «Biogass fra marint fiskeslam sambehandlet med husdyrgjødsel og myse», s. 32, 9. okt. 2018.
- [6] J. Morken, T. Briseid, K.-A. Lyng og I. Kvande, «Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift.», nov. 2017, ISSN: 1503-9196.
- [7] B. Misund, *fiskeoppdrett*, i *Store norske leksikon*, 18. feb. 2021. adresse: <http://snl.no/fiskeoppdrett> (sjekket 26.04.2022).
- [8] E. Wilkinson. «Stamfisk, settefisk eller matfisk?», Labora. (1. apr. 2019), adresse: <https://labora.no/aktuelt/stamfisk-settefisk-eller-matfisk/> (sjekket 18.05.2022).
- [9] Fiskeridirektoratet. «4.2.1. Yngel og settefisk», Fiskeridirektoratet. (), adresse: <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Dokumenter/Veiledere/Akvakulturforvaltning/4.-Ulike-typer-tillatelser/4.2.-Laksefisk-i-ferskvann/4.2.1.-Yngel-og-settefisk> (sjekket 18.05.2022).
- [10] *Samtale med Olav Johan Lyngstad, Produksjonssjef for Salmon Evolution*, i samarbeid med O. J. Lyngstad, 2. mar. 2022.
- [11] L. B. Andersen, E. Grefsrud og T. Svåsand, «Risikoreport norsk fiskeoppdrett 2021 - risikovurdering», Rapport fra havforskningen, 9. feb. 2021, ISSN: 1893-4536. adresse: <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2021-8> (sjekket 26.04.2022).
- [12] E. Brod, T. Haraldsen og L. Solli. «Fiskeslam», Nibio. (), adresse: <https://nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/fiskeslam> (sjekket 14.04.2022).
- [13] T. Ytrestøyl, T. S. Aas, K. S. Nerdal og G. M. Berge, «Karakterisering av slam fra tre kommersielle settefiskanlegg gjennom ett produksjonsår», s. 29, 5. jul. 2016, ISSN: 1890-579x.
- [14] *Samtale med Mats Borgesen, CEO hos Ductor Sunndal*, i samarbeid med M. Borgesen, 27. apr. 2022.
- [15] I. Kvande, J. Cabell, A. E. Stensgård, S. Saxegård og J. Morken, «Følgforskning Sterner sitt anlegg på Smøla settefisk - masse- og energibalanser, økonomi og klimanytte», s. 43, des. 2018, ISSN: 1503-9196.
- [16] : M. A. F. Hamzah, «Comparative start-up between mesophilic and thermophilic for acidified palm oil mill effluent treatment», 2019.
- [17] A. Hajji, M. Rhachi, M. Garoum og N. Laaroussi, «The effects of pH, temperature and agitation on biogas production under mesophilic regime», i *2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/REDEC.2016.7577510.

-
- [18] S. K. Khanal, T. G. T. Nindhia og S. Nitayavardhana, «Chapter 11 - Biogas From Wastes: Processes and Applications», i *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches*, M. J. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong og A. Pandey, red., Elsevier, 2019, s. 165–174, ISBN: 978-0-444-64200-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00011-6>. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444642004000116>.
- [19] R. Gebauer, J. Cebbel og O. Ween, «Biogassproduksjon fra settefiskslam i sentraliserte og desentraliserte biogassanlegg», s. 75, 25. nov. 2016, ISSN: 2464-1162.
- [20] B. Pedersen, *kjemisk oksygenforbruk*, i *Store norske leksikon*, 7. mai 2019. adresse: http://snl.no/kjemisk_oksygenforbruk (sjekket 16.05.2022).
- [21] H. Karoliussen og T. Hennem, «Fornybar energi grunnkurs - Bioenergi», 2019, s. 36.
- [22] K. Hofstad, *normalkubikkmeter*, i *Store norske leksikon*, 5. des. 2018. adresse: <http://snl.no/normalkubikkmeter> (sjekket 16.05.2022).
- [23] LRF. «Berättelsen om LRF - LRF», Lantbrukarnas Riksförbund. (10. jan. 2019), adresse: <https://www.lrf.se/om-lrf/mer-om-lrf/berattelsen-om-lrf/> (sjekket 28.04.2022).
- [24] *Samtale med Ingvar Kvande, Norsøk*, i samarb. med I. Kvande, 6. apr. 2022.
- [25] *Samtale med Andreas Berg, Senior Manger development Projects hos Gasum*, i samarb. med A. Berg, 5. mar. 2022.
- [26] J. Hovland og L. E. Øi, «Compression and transport of raw biogas», 11. apr. 2019.
- [27] T. Kvist og N. Aryal, «Methane loss from commercially operating biogas upgrading plants», *Waste Management*, årg. 87, s. 295–300, 15. mar. 2019, ISSN: 0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.023. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19300935> (sjekket 18.05.2022).
- [28] K. Hoyer, C. Hulteberg, M. Svensson, J. Jernberg og Ø. Nørregård, *Biogas upgrading-Technical Review*. 2016, ISBN: 978-91-7673-275-5.
- [29] A. F. Øgaard, E. Brod og A. Kristoffersen. «Fosfor», Nibio. (), adresse: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/fosfor> (sjekket 11.04.2022).
- [30] T. Briseid og J. Morken, «Biogassanlegget hos Sondre Skoglund Følgeforskningen - Dokumentasjon av drift», 2018, ISSN: 2464-1162.
- [31] K. Hofstad, *CNG*, i *Store norske leksikon*, 7. nov. 2021. adresse: <http://snl.no/CNG> (sjekket 14.05.2022).
- [32] A. R. Nerheim, «Kompendium-Ideell gasslov. Emne FENA2030».
- [33] H. Fjellvåg og M. Ystenes, *ideal gass*, i *Store norske leksikon*, 18. des. 2019. adresse: http://snl.no/ideal_gass (sjekket 14.05.2022).
- [34] Gasum, «Safety Datasheet LNG/LBG - Liquefied Natural gas/Liquefied Biogas», 18. sep. 2017, s. 11. adresse: https://www.gasum.com/globalassets/pdf-files/sds-lng-lbg-eng_052019.pdf.
- [35] D. A. Wood, «Predicting saturated vapor pressure of LNG from density and temperature data with a view to improving tank pressure management», *Petroleum*, årg. 7, nr. 1, s. 91–101, 2021, ISSN: 2405-6561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.04.001>. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656120300596>.
- [36] B. Skogn. «Biokraft Skogn — Biokraft». (), adresse: <https://www.biokraft.no/biokraft-skogn/> (sjekket 15.05.2022).
- [37] B. Pedersen, *gasskonstant*, i *Store norske leksikon*, 6. mar. 2020. adresse: <http://snl.no/gasskonstant> (sjekket 16.05.2022).
-

