

Mathias Myren-Smørholm og Anders  
Langvandsbråten

# Bærekraftig utnyttelse av slam fra landbasert lakseoppdrett

Bacheloroppgave i Fornybar energi

Veileder: Ann Rigmor Nerheim

November 2022





Mathias Myren-Smørholm og Anders  
Langvandsbråten

# **Bærekraftig utnyttelse av slam fra landbasert lakseoppdrett**

Bacheloroppgave i Fornybar energi  
Veileder: Ann Rigmor Nerheim  
November 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden





INSTITUTT FOR HAVROMSOPERASJONER OG  
BYGGTEKNIKK

FENA2900 - BACHELOROPPGAVE FORNYBAR ENERGI

---

# Bærekraftig utnyttelse av slam fra landbasert lakseoppdrett

---

*Forfattere:*

Anders Berg Langvandsbråten  
Mathias Myren-Smørholm

Høst, 2022

---

## Forord

Dette arbeidet er siste del av det treårige bachelorprogrammet "Ingeniørfag, Fornybar Energi" ved Norges teknisk-naturvitenskapende universitet (NTNU), som gir evalueringsgrunnlag for de siste 20 av totalt 180 studiepoeng. Arbeidet gjennomføres høstsemesteret 2022.

Prosjektet er en utredning for Salmon Evolution om bærekraftig utnyttelse av avfall fra landbasert lakseoppdrett i form av biogass- og biometanolproduksjon. Fra prosjektet skal Salmon Evolution få kunnskap og innsikt, som kan benyttes i senere avgjørelser angående utnyttelsen av avfallet.

Denne oppgaven er basert på tidligere arbeid gjennomført våsemesteret 2022 i form av en bacheloroppgave, som tar for seg biogassproduksjon basert på landbasert lakseoppdrett [1]. Noen av kapitlene fra det tidligere arbeidet er gjenfortalt i denne oppgaven der gruppen fant det nødvendig. Hvor det er tilfelle skal det være referert til den tidligere oppgaven eller grunnkilden.

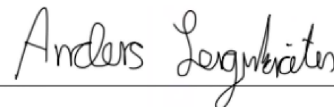
Det rettes en spesiell takk til førsteamanuensis Ann Rigmor Nerheim som har vært veileder. Gjennom ukentlige møter og godt samarbeid har hun kommet med faglige innspill og vært tilgjengelig for diskusjoner. Det rettes også en spesiell takk til ekstern mentor Olav Lyngstad og Inge Fossen fra Salmon Evolution, som har bidratt med mye kunnskap, data og erfaringer innen gitt tema.

Vi ønsker også å takke Inge Hoemsnes eier av gårdsbiogassanlegg, Dag Nikolai Ryste fra Glocal Green, John Morken fra NMBU, Stig Amdam fra Hyperthermics og Ole Kristian Nordvåg fra Equinor, Tjeldbergodden. Dette på grunnlag av at de alle har vært til stor hjelp for innhenting av data, informasjon og erfaringer.

Ålesund, 29.11.2022



Mathias Myren-Smørholm



Anders Berg Langvandsbråten

---

## Sammendrag

Fiskeoppdrett på land har mange fordeler for både miljøet og fisken. Når oppdrett foregår på land gir det mulighet til å rense avløpsvannet og ta ut næringsstoffer. Disse næringsstoffene blir omtalt som fiskeslam. Målet med oppgaven var å undersøke mulighetene for å utnytte fiskeslammet fra landbasert oppdrett på en bærekraftig måte.

Denne bacheloroppgaven fokuserer spesielt på produksjon av råbiogass, oppgradert biogass og biometanol fra fiskeslam. Basert på data gitt fra Salmon Evolution er produksjonsmengden av fiskeslam kartlagt. Med utgangspunkt i dette er potensiell produksjonsmengde biogass og biometanol beregnet. Videre blir potensiell produksjonsmengde brukt for å beregne potensiell energimengde.

Prosessbeskrivelser er gitt for biogass og biometanol, fra rensing av slam til ferdiglagret gass og metanol. Behovet for lagring av biogass i flytende og komprimert form er sammenlignet med lagringsbehovet for metanol.

Til slutt ble det gjennomført en livssyklusanalyse for å sammenligne det globale oppvarmingspotensialet til prosessene. I denne sammenligningen blir det tatt hensyn til utslippet av klimagasser ved produksjon av råbiogass, oppgradert biogass, flytende biogass, komprimert biogass og biometanol.

---

## Abstract

Fish farming on land has many advantages for both the environment and the fish. When farming takes place on land, it provides the opportunity to clean the waste water and extract nutrients. Those nutrients are referred to as fish sludge. The aim of the thesis is to investigate the possibilities of using the fish sludge from land-based farming in a sustainable way.

This bachelor's thesis focuses in particular on the production of raw biogas, upgraded biogas and biometamol from fish sludge. Based on data provided by Salmon Evolution, the production quantity of fish sludge has been mapped. From this, the potential production amount of biogas and biomethanol is calculated. Furthermore, the potential production quantity is used to calculate the potential energy quantity.

Process descriptions are given for biogas and biomethanol, from purification of sludge to stored gas and methanol. The storage requirement for biogas in liquid and compressed form is compared with the storage requirement for methanol.

At last, a life cycle analysis was done to compare the global warming potential of the processes. In this comparison, account is taken of the emission of greenhouse gases during the production of raw biogas, upgraded biogas, liquid biogas, compressed biogas and biomethanol.



---

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Figurer</b>	<b>vii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>viii</b>
<b>Forkortelser</b>	<b>xi</b>
<b>Symbolliste</b>	<b>xii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>2</b>
2.1 Generelt om landbasert lakseoppdrett . . . . .	2
2.2 Hva er bærekraft . . . . .	2
2.2.1 Norges klimamål . . . . .	2
2.3 Generell beskrivelse av biogass . . . . .	3
2.3.1 Husdyrgjødsel, biogass og fiskeslam sin rolle i norges klimamål	3
2.4 Generell beskrivelse av biometanol . . . . .	3
<b>3 Prosessteknologi</b>	<b>4</b>
3.1 Prosessbeskrivelse for biogassproduksjon ved bruk av slam . . . . .	4
3.1.1 Rensing av slam . . . . .	4
3.2 Produksjon av biogass i en reaktor . . . . .	5

---

3.2.1	Hydrolyse . . . . .	5
3.2.2	Syredannelse . . . . .	5
3.2.3	Metandannelse . . . . .	5
3.2.4	Rensing av råbiogass til biogass . . . . .	5
3.2.5	Biorest . . . . .	6
3.2.6	Biogassteknologi . . . . .	6
3.3	Prosessbeskrivelse for biometanolproduksjon . . . . .	8
3.3.1	Tjeldbergodden . . . . .	8
3.3.2	CH <sub>4</sub> - CO <sub>2</sub> separator . . . . .	9
3.3.3	Dampreformer . . . . .	9
3.3.4	Dampgenerator for varmegjenvinning - HRSG . . . . .	9
3.3.5	Metanreaktor . . . . .	11
3.3.6	Separering ved høytrykk - HP flash . . . . .	11
3.3.7	Separering ved lavtrykk - LP flash og destillasjon . . . . .	12
3.4	Utnyttelse av energi fra biogass og biometanol . . . . .	12
3.4.1	Kraftvarme (CHP) . . . . .	12
3.4.2	Elektrisk virkningsgrad for biogass . . . . .	12
3.4.3	Direkte metanol brenselcelle . . . . .	13
3.4.4	Forbrenningsmotor med ren metanol som drivstoff . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Bruksområder</b>	<b>13</b>
4.1	Biogass . . . . .	13
4.2	Biometanol . . . . .	14
4.3	Andre bruksområder for fiskeslam . . . . .	14
4.4	Bruksområde for hydrogen i biogass- og biometanolproduksjon . . . . .	15

---

---

4.4.1	Hydrogen som energibærer . . . . .	15
4.4.2	Ammoniakk som energibærer . . . . .	16
4.4.3	Biometanol som energibærer . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Avgrensninger for livssyklusanalysen</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Regional verdikjede</b>	<b>17</b>
6.1	Regional biometanolproduksjon . . . . .	17
6.1.1	Hva er mulighetene for en lokal brukerkjede . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Metode</b>	<b>18</b>
7.1	Forskningsmetode . . . . .	18
7.2	Potensiell mengde slam ut av anlegget . . . . .	18
7.3	Beregning av potensielt produksjonsvolum . . . . .	19
7.3.1	Biogass . . . . .	19
7.3.2	Biometanol . . . . .	20
7.4	Beregning av potensiell energimengde . . . . .	20
7.4.1	Biogass . . . . .	21
7.4.2	Biometanol . . . . .	21
7.5	Dimensjonering av lagringstank . . . . .	21
7.5.1	Komprimert- og flytende biogass . . . . .	22
7.5.2	Metanol . . . . .	22
7.6	Klimagassutslipp ved produksjon . . . . .	22
<b>8</b>	<b>Resultat og diskusjon</b>	<b>23</b>
8.1	Potensiell mengde slam ut av anlegget . . . . .	23
8.2	Potensielt produksjonsvolum . . . . .	24

---

8.2.1	Råbiogass . . . . .	25
8.2.2	Oppgradert biogass . . . . .	26
8.2.3	Biometanol . . . . .	27
8.3	Potensiell energimengde og energiforbruk . . . . .	28
8.3.1	Oppgradert biogass . . . . .	29
8.3.2	Biometanol . . . . .	30
8.3.3	Energiproduksjon . . . . .	32
8.3.4	Sammenligning . . . . .	32
8.4	Lagringsbehov . . . . .	33
8.4.1	Komprimert biogass - CBG . . . . .	33
8.4.2	Flytende biogass - LBG . . . . .	34
8.4.3	Biometanol . . . . .	34
8.4.4	Sammenligning . . . . .	35
8.5	Livssyklusanalyse . . . . .	36
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>41</b>
	<b>Forslag til videre arbeid</b>	<b>42</b>
	<b>Referanseliste</b>	<b>43</b>
 <b>Figurer</b>		
1	Salmon Evolution sitt landbaserte anlegg på Indre Harøy [4]. . . . .	1
2	Flytskjema for behandling av slam med andel tørrstoff for hvert steg. . . . .	5
3	Skisse av en anaerobic baffle reactor - ABR [1]. . . . .	7
4	Skisse av en gjennomstrømningsreaktor - CSTR [1]. . . . .	8

---

5	Flytskjema for biometanolproduksjon ved katalytisk hydrogenering av CO og CO <sub>2</sub> . . . . .	10
6	Daglig mengde slam ut av fullt utbygd anlegg med 48 kar med andel tørrstoff på 100% [1]. . . . .	24
7	Potensiell energimengde for oppgradert biogass og metanol ved VS1 som har 83% andel organisk materiell i tørrstoff, og VS2 som har 65,5% andel organisk materiell i tørrstoff. . . . .	33
8	Nødvendig lagringsvolum for metanol, komprimert og flytende biogass ved VS1 som har 83% andel organisk materiell i tørrstoff, og VS2 som har 65,5% andel organisk materiell i tørrstoff. . . . .	36
9	Globalt oppvarmingspotensial per kg slam for biogass- og metanolproduksjon. Verdiene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%. materiell i tørrstoff. . . . .	38
10	Globalt oppvarmingspotensial per kg slam for produksjon av metanol, komprimert og flytende biogass. Komprimert biogass blir omtalt som CBG, og flytende biogass omtales som LBG. Verdiene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%. . . . .	40

## Tabeller

1	Verdier brukt i beregninger for potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass. . . . .	19
2	Verdier brukt i beregninger for potensielt produksjonsvolum biometanol. . . . .	20
3	Molvekt for hydrogen, karbon og oksygen. . . . .	21
4	Globalt oppvarmingspotensial for de studerte prosessene [44]. . . . .	23
5	Mengde slam per byggetrinn med andel tørrstoff på 100% [1]. . . . .	24
6	Potensiell mengde råbiogass produsert ved utnyttelse av fiskeslam [1]. . . . .	25
7	Potensiell mengde oppgradert biogass produsert ved utnyttelse av fiskeslam [1]. . . . .	26

---

8	Produksjonvolum biogass per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff. . . . .	27
9	Potensiell mengde metanol produsert ved utnyttelse av fiskeslam. . . . .	28
10	Produksjonvolum metanol per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff. . . . .	28
11	Potensiell energimengde produsert i form av oppgradert biogass ved utnyttelse av fiskeslam [1]. . . . .	29
12	Energitetthet for oppgradert biogass per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff [1]. . . . .	30
13	Potensiell energimengde per kg slam for metanol, produsert ved utnyttelse av slam. . . . .	31
14	Energitetthet for metanol per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff. . . . .	31
15	Potensiell energimengde per kg slam for biogass og metanol produsert ved utnyttelse av slam. Beregningene er avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 er 83% og VS2 er 65,5%. . . . .	32
16	Potensielt lagringsbehov for komprimert biogass ved en måneds biogassproduksjon ved $T=18^{\circ}C$ og $p=250$ bar. Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5% [1]. . . . .	34
17	Potensielt lagringsbehov for flytende biogass ved en måneds biogassproduksjon. Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5% [1]. . . . .	34
18	Potensielt lagringsbehov biometanol ved en måneds biogassproduksjon. Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5. . . . .	35
19	Globalt oppvarmingspotensial for produksjon av råbiogass, oppgradert biogass og metanol. Råbiogass omtales som RBG og oppgradert biogass omtales som OBG. Beregningene er avhengig av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%. . . . .	37

---

---

20	Globalt oppvarmingspotensial per kilowatttime for metanol- og oppgradert biogassproduksjon. VS1 tilsvarer en andel organisk materiell i tørrstoffet på 83%. VS2 tilsvarer en andel organisk materiell i tørrstoffet på 65,5%. . . . .	38
21	Globalt oppvarmingspotensial for produksjon av metanol, komprimert biogass og flytende biogass. Komprimert biogass omtales som CBG og flytende biogass omtales som LBG. Beregningene er avhengig av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%. . . . .	39

---

## Forkortelser

PSA	Pressure swing absorption
HRSG	Heat recovery steam generator
FEHE	Feed effluent heat exchanger
HP	High pressure
LP	Low pressure
CHP	Combined heat and power
NIBIO	Norsk institutt for bioøkonomi
TS	Tørrstoff
VS	Volatile solids - Organisk materiell i TS
VS1	VS på 83%
VS2	VS på 65,5%
BGF	Biogass feed
CBG	Komprimert biogass
LBG	Flytende biogass
OBG	Oppgradert biogass
RBG	Råbiogass
CO <sub>2</sub> -ekv.	CO <sub>2</sub> -ekvivalenter
GWP	Globalt oppvarmingspotensial



---

## Symbolliste

Symbol	Definisjon	Enhet
$\Delta H^0$	Endring i entalpi	<i>kJ/mol</i>
$m_{VS}$	Masse organisk materiale	<i>tonn</i>
$\eta$	Virkningsgrad	-
$v$	Normalkubikkmeter $CH_4$ per masse VS	<i>Nm<sup>3</sup>/tonn</i>
$m$	Mengde	<i>tonn/dag</i>
$\sigma$	Omdanningsfaktor for biogass til metanol	-
$E$	Energimengde	<i>MWh/dag</i>
$\epsilon$	Energitetthet	<i>MWh/tonn</i>
$V$	Lagringsvolum	<i>m<sup>3</sup>/måned</i>
$\rho$	Massetetthet	<i>tonn/m<sup>3</sup></i>

---

# 1 Innledning

Til tross for mange forsøk på oppdrett av andre fiskearter, består nesten alt fiskeoppdrett i Norge av atlantisk laks, regnbueørret og rensefisk. Politikere ønsker en mangedobling av sjømatnæringen i Norge innen 2030 og 2050, men at veksten skal skje på en bærekraftig måte [2]. Inntil for bare noen få år siden, var anlegg på åpen sjø ansett som den eneste aktuelle måten å drive fiskeoppdrett på. Den gang hadde man ikke avansert nok eller rimelig nok teknologi til å drive landbaserte oppdrettsanlegg på en bærekraftig måte [3].

I løpet av de siste årene har dette endret seg, men landbaserte oppdrettsanlegg må håndtere en rekke nye utfordringer. Med en mangedobling i sjømatnæringen, vil det føre til en kraftig økning i avfall fra oppdrettsnæringen som trenger behandling.

Denne rapporten er utarbeidet i samarbeid med Salmon Evolution. Salmon Evolution er en stor aktør innen landbasert oppdrett, som i dag er i gang med konstruksjon av et storskala landbasert oppdrettsanlegg på Indre Harøy [1]. Produksjon har startet i 6 kar, og fullskalert anlegg er 48 kar. I forbindelse med økende volum av avfall ønsker de at det utarbeides en rapport på muligheter for å utnytte avfallet på en bærekraftig og lønnsom måte. Rapporten avgrenses til å kun fokusere på biogass- og biometanolproduksjon fra fiskeslam.



Figur 1: Salmon Evolution sitt landbaserte anlegg på Indre Harøy [4].

---

## 2 Bakgrunn

I denne delen av oppgaven skal det beskrives hvorfor prosjektet blir gjennomført, og behovet for et prosjekt som dette i dag.

### 2.1 Generelt om landbasert lakseoppdrett

Lakseoppdrett innebærer å fø opp laks i fangenskap. Fiskeoppdrett på land har mange fordeler for både miljøet og fisken. Sistnevnte er at man unngår rømming og ytre påvirkninger som lakselus og alger. Landbasert oppdrett kan også bidra til kortreist fisk i land uten kystlinje [5]. Når oppdrett foregår på land gir det mulighet til å rense avløpsvannet og ta ut næringstoffer. De næringstoffene blir omtalt som fiskeslam. Fiskeslam består av fiskeavføring og litt fårrester som fisken ikke har spist.

### 2.2 Hva er bærekraft

Bærekraft er et ord som i dag vanligvis betyr at noe passer med idealet om bærekraftig utvikling. En bærekraftig utvikling vil si en utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov. Denne definisjonen av bærekraftig utvikling anerkjenner at det bare er en klode, med en begrenset mengde ressurser, og at det er i vår felles interesse å ta vare på den [6].

For å sikre bærekraftig utvikling har FN lagd noen bærekraftsmål. I tillegg har Norge sine egne klimamål. Disse målene skal fungere som en felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 [7].

#### 2.2.1 Norges klimamål

Norge meldte inn et forsterket klimamål til FN før klimatoppmøtet i Egypt november 2022. Det nye målet er å redusere utslippene med minst 55 prosent innen 2030. Regjeringen bestemte seg for dette etter en oppfordring fra klimatoppmøtet i fjor, om at alle land måtte vurdere sine klimamål på nytt. FNs klimapanelers hovedbudskap er at det trengs raske og kraftige utslippskutt dersom verden skal nå 1,5-gradersmålet [8].

---

## 2.3 Generell beskrivelse av biogass

Biogass dannes når organisk materiale, som gjødsel, matavfall, planterester, avløpsvann og annet, brytes ned av mikroorganismer i oksygenfritt miljø. Biogass består i hovedsak av metan. Ved forbrenning dannes  $\text{CO}_2$  og vann. Siden råstoffet kommer fra biologisk materiale regnes forbrenningen som  $\text{CO}_2$ -nøytral da denne går inn i det naturlige  $\text{CO}_2$ -kretsløpet [9].

### 2.3.1 Husdyrgjødsel, biogass og fiskeslam sin rolle i Norges klimamål

Jordbruk er den største kilden til utslipp av metan og lystgass i Norge. Mesteparten av metanutslippene kommer fra dyrenes fordøyelse, resten kommer fra lagring av husdyrgjødsel. I tillegg gir også jordbruket utslipp av  $\text{CO}_2$  fra fossil forbrenning til oppvarming og diesel til landbruksmaskiner. I 2021 sto jordbruket for 9,4 prosent av de totale klimagassutslippene i Norge [10].

I en sirkulær økonomi må produktene vare så lenge som mulig, repareres, oppgraderes og brukes om igjen [11]. Biogass sin rolle er å fullføre en sirkulær økonomi for jordbruket og landbasert lakseoppdrett. Ved å benytte avfall i biogassproduksjon, som ellers hadde sluppet ut metan, produseres varme og energi som blir utnyttet tilbake i prosessen. Det kan være oppvarming til tanker, elektrisitet, gjødsel osv.

I flere land i Europa utnyttet allerede husdyrgjødsel til å produsere bærekraftig biogass i stor skala. De største hindringene i Norge har vært konkurranse fra lave energipriser i markedet og mangel på anlegg tilpasset norske gårdsbruk. Det må være økonomisk lønnsomt å produsere biogass, og da kan fiskeslam være løsningen. Fiskeslam har et høyere energipotensiale enn husdyrgjødsel fordi det inneholder mye proteiner og fett. Samtidig gjør dette fiskeslam for ustabil til å produsere biogass på egenhånd. I Ås tester NIBIO og Antec Biogas AS biogassproduksjon med en blanding av fiskeslam og husdyrgjødsel. Konklusjonen er at prosessen tåler ca 20 prosent fiskeslam i reaktorene. Da ble produksjonen doblet, sammenlignet med ren husdyrgjødsel [12].

## 2.4 Generell beskrivelse av biometanol

Biometanol genereres vanligvis gjennom hydrogenering av CO og  $\text{CO}_2$ , med eller uten katalysator. Råmaterialene for metanolproduksjon kan være alle typer karbonholdige materialer, men skal det betraktes som biometanol må råmaterialet som brukes bestå av biomasse. Prosessen for biometanol regnes som karbonnøytral

---

når den er selvforsynende gjennom utnyttelse av varme og energi fra eksoterme prosesser.

Biometanol kan være en faktor som kan gjøre denne typen avfallshåndtering mer attraktiv for flere ved å tilby et annet marked enn biogass. Samtidig som forbrukere av biometanol kan være lengre unna, fordi metanol er enklere å lagre og transportere, når dette er en væske ved atmosfærisk trykk og temperatur på 0°C.

## 3 Prosessteknologi

I dette kapitlet skal det gis en detaljert beskrivelse av prosessene til produksjon av biogass og biometanol. Samtidig skal det drøftes andre teknologier som kan være relevant for Salmon Evolution og videre arbeid.

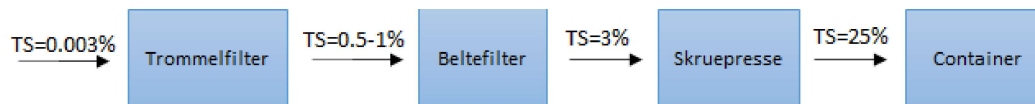
### 3.1 Prosessbeskrivelse for biogassproduksjon ved bruk av slam

Prosessbeskrivelse for biogassproduksjon ved bruk av slam er forklart i tidligere arbeid av Andreas Falinski [1]. I denne oppgaven blir det gitt en kortere mer generell forklaring, fordi en ikke ser behovet for å repetere tidligere arbeid. De siteringene og kildene Andreas Falinski har brukt i underkapitlene blir også sitert i denne oppgaven.

#### 3.1.1 Rensing av slam

I dag er landbaserte oppdrettsanlegg pålagt å samle opp fiskeslam før avløpsvannet slippes ut i sjøen. Kravet skal sørge for at kystområder med lav bæreevne ikke blir overbelastet [13]. En beskrivelse av renseanlegg for slam ble forklart under en omvisning med ekstern faglig mentor ved Salmon Evolution, Olav Lyngstad.

Avvanning og behandling av fiskeslam foregår i flere steg. Først blir vannet renses i ett trommelfilter, fulgt av avvanning gjennom et beltefilter. Deretter avvannes slammet ytterligere i en skruepresse. Hvert steg i prosessen har som mål å øke andel tørrstoff i vannet. Et flytskjema over prosessen og andel tørrstoff i vannet for hvert steg er gitt under i figur 2.



Figur 2: Flytskjema for behandling av slam med andel tørrstoff for hvert steg.

## 3.2 Produksjon av biogass i en reaktor

Prosessen for biogassproduksjon er sammensatt av tre steg: hydrolyse, syredannelse og metandannelse.

### 3.2.1 Hydrolyse

Første steget i prosessen handler om å bryte ned biomassen. Substratet inneholder mange store molekyler som er for store til å bli omsatt til biogass direkte. Disse stoffene må derfor kuttes opp (hydroleres) til mindre molekyler som aminosyrer, fettsyrer og forskjellige typer sukker.

### 3.2.2 Syredannelse

Syredannelse blir ofte omtalt i to steg. Først brytes sukker, aminosyrer og alkoholer videre ned til organiske syrer, karbondioksid, amoniakk og hydrogen av syreproduserende bakterier [14]. I steg to omdannes ulike fettsyrer, alkoholer, aminosyrer og karbonsyrer til karbondioksid og acetat mens hydrogen frigjøres [1].

### 3.2.3 Metandannelse

Det siste steget er metandannelse. Den vanligste metandannelsen skjer ved at metandannede organismer spalter acetat. Dette er ikke vanlige bakterier, men en form for urbakterie som på norsk blir omtalt som arker. Metandannelsen skjer alternativt ved at karbondioksid og hydrogen bindes og danner metan og vann [14].

### 3.2.4 Rensing av råbiogass til biogass

Råbiogass består hovedsakelig av metan og karbondioksid. Det inneholder også forurensninger som nitrogen, vanndamp, hydrogen, hydrogensulfid og ammoniakk.

---

Tilstedeværelsen av disse hemmer metanutbyttet, så for å øke kvaliteten på biogass er det nødvendig å fjerne urenheter. Dette er omtalt som oppgradering av biogass [15].

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 [16]. I renseprosessen vil det være små tap av metan avhengig av metoden. Det er flere ulike løsninger for rensing av CO<sub>2</sub>, av disse er det hovedsaklig to typer som benyttes i Norge:

### **Membraner**

Gassen settes under trykk til 15 bar, og ledes inn til membraner. CO<sub>2</sub> passerer gjennom membranen, mens metan ikke kan passere. CO<sub>2</sub> blir dermed skilt ut og man har tilbake en gass med mer enn 97% metan [17].

### **Absorpsjonsanlegg**

Rågassen ledes gjennom en væske som absorberer CO<sub>2</sub>. Væsken tas ut og CO<sub>2</sub> fjernes fra væsken, som så brukes om igjen. Væsken sirkulerer rundt i anlegget, og det vil som regel være lite behov for etterfylling. Væsken brukt for denne prosessen kan være vann (vannskrubber) eller en annen væske som er tilsatt et stoff fra gruppen aminer, som binder karbondioksid [17].

### **3.2.5 Biorest**

Etter ferdigstilt produksjon av biogass står en igjen med en biorest. Dette er materiale som ikke er nedbrytbart og tas ut av reaktoren etter prosessen [14]. Biorest fra lakseavfall har et høyt innhold av nitrogen og fosfor, som er to av tre hovedingredienser i kunstgjødsel. Disse stoffene fungerer som plantenæring og er essensielle næringstoffer innen jordbruk. Derfor er det et potensiale for å benytte bioresten til gjødsel [18].

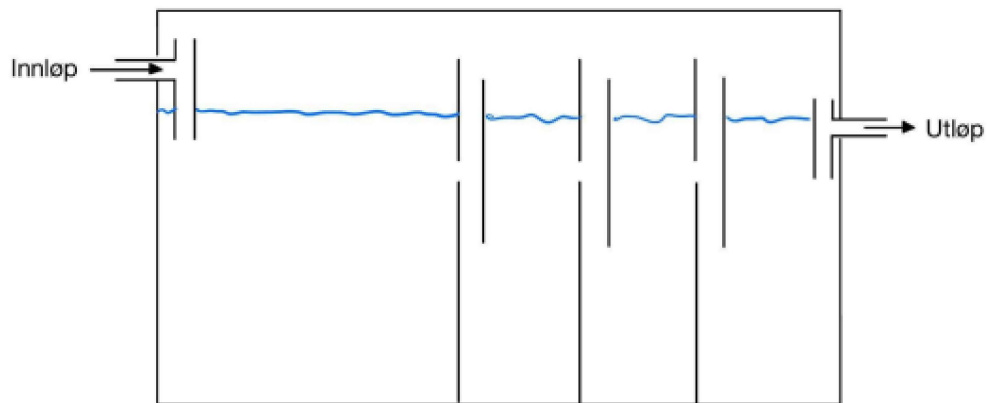
### **3.2.6 Biogasteknologi**

Biogass produseres i en reaktor. Generelt sett er det to typer som benyttes til produksjon av biogass, Anaerobic baffle reactor og gjennomstrømningsreaktor [1].

---

### Anaerobic baffle reactor - ABR

ABR-reaktor, skissert i figur 3, er en anaerob reaktor. Det som er spesielt for ABR-reaktoren er at mikroorganismene oppholder seg permanent i reaktoren. Disse organismene oppholder seg i granuler som har høyere egenvekt enn vann. Ved å velge riktig hastighet av råstoffet i reaktoren vil ikke granulene følge med råstoffet ut. Som en ekstra forsikring kan en galvimetrisk separator benyttes, denne vil tilbakeføre granuler i avløpsstrømmen til reaktoren [14].

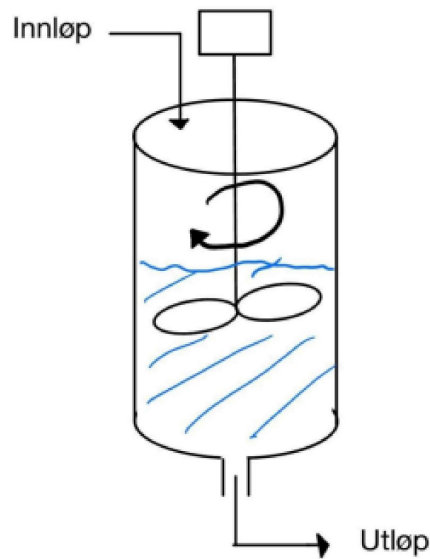


Figur 3: Skisse av en anaerob baffelreaktor - ABR [1].

### Gjennomstrømningsreaktor - CSTR

Den vanligste formen for en biogass-reaktor er en CSTR-reaktor, vist i figur 4. Her vil mikroorganismene leve på substratet. CSTR utgjøres av en sirkulær tank hvor innholdet røres sammen kontinuerlig. Råstoff pumpes inn hver dag, og biorest blir tatt ut hver dag.





Figur 4: Skisse av en gjennomstrømningsreaktor - CSTR [1].

Som nevnt tidligere var dette i korte trekk produksjon av biogass ved bruk av slam. For en mer utfyllende forklaring referes det til Andreas Falinski sin oppgave [1].

### 3.3 Prosessbeskrivelse for biometanolproduksjon

I denne delen av oppgaven skal det gis en detaljert prosessbeskrivelse for produksjon av biometanol. Flytskjema for prosessen er vist i figur 5.

#### 3.3.1 Tjeldbergodden

Equinor Tjeldbergodden ble kontaktet angående metanolproduksjon. Tjeldbergodden er et industriområde som utnytter gass fra petroleumsfeltet Heidrun på Haltenbanken. Anlegget ligger nord i Aure kommune, Møre og Romsdal, og er ansvarlig for den største metanolfabrikken i Europa. Gjennom et teamsmøte med Ole Kristian Nordvåg ved Tjeldbergodden ble prosessen for metanolproduksjon forklart. Samtidig ble det diskutert eventuelle endringer for et mindre anlegg. Eksempler på eventuelle endringer ble gitt i form av referanse [19], hvor 3 forskjellige

---

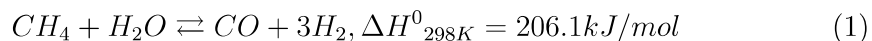
prosesser er sammenlignet. Prosessbeskrivelsen i denne oppgaven er basert på denne referansen. Delkapitlene under beskriver prosessen fra referanse [19]. Det er gjort noen forenklinger gjennom kapitlet for at det skal passe bedre til dette prosjektet.

### 3.3.2 CH<sub>4</sub> - CO<sub>2</sub> separator

Strømmen av biogass som simuleres i prosessen er råbiogass med 60 mol% metan og 40 mol% CO<sub>2</sub>. Først i prosessen separeres biogass i metan og karbondioksid gjennom teknologien pressure swing adsorption (PSA). Adsorpsjon er et termodynamisk fenomen som beskriver bindingen av molekyler fra gasser til overflaten av et fast stoff [20]. I denne prosessen er det antatt at adsorbent Zeolite 5A er benyttet. Dette vil fungere som et filter og beholde CO<sub>2</sub>-molekylene til adsorbenten. En metan utvinning på 99,4 vol% er mulig fra biogass som inneholder 60% metan og 40% karbondioksid. Det er verdt å notere at separatoren representerer flere enheter som kreves for å få til ønsket separasjon selv om den er vist som en enkelt PSA-enhet her.

### 3.3.3 Dampreformer

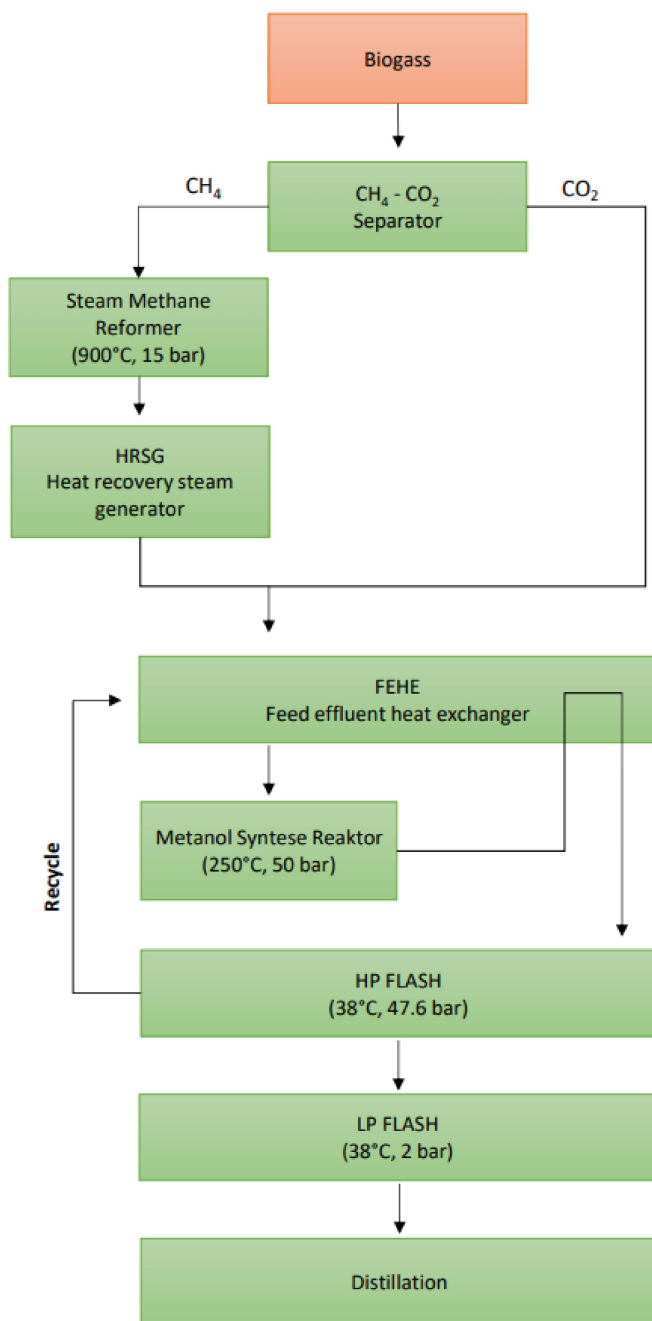
Dampreformerer i prosessen ble simulert som en likevektsreaktor som opererer ved 900°C og 15 bar. Prosessen er i likevekt fordi syngasstrømmen forlater reformatoren ved samme temperatur og cirka samme trykk, 13 bar i forhold til 15. Fra et termodynamisk perspektiv betyr dette at de kjemiske handlingene av reaktantene ikke har noen nettoendring på et gitt tidspunkt. Den kjemiske reaksjonen i dampreformerer er vist i ligning 1:



Siden dampreforming av metan er en endoterm prosess brukes en ovn for å tilføre varme. Reformatoren mottar metanstrømmen fra separatoren og damp ved 890°C og 15 bar. Det molare forholdet mellom damp og metan som mottas er 2,5. Avløpet fra reformatoren sendes til en dampgenerator for varmegjenvinning (HRSG)

### 3.3.4 Dampgenerator for varmegjenvinning - HRSG

En dampgenerator for varmegjenvinning er en høyeffekts dampkjele som bruker varme gasser for å genere damp i en termodynamisk rankine-syklus. En rankine-



Figur 5: Flytskjema for biometanolproduksjon ved katalytisk hydrogenering av CO og CO<sub>2</sub>.

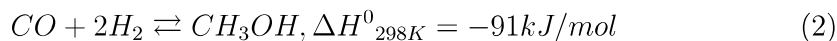
---

syklus er en prosess som konverterer termisk energi til arbeid. Dette systemet er i stand til å generere damp ved forskjellige trykknivåer.

HRSG bruker den varme syngassen fra reformatoren og genererer lavtrykkdamp på 209°C og 15 bar for reformering av metan. Samtidig produserer den høytrykkdamp på 263°C og 42 bar for kraftproduksjon. Resten av dampen som trengs for reformering genereres ved å benytte den eksoterme reaksjonen i metanolreaktoren. HRSG hever også temperaturen på lavtrykkdampen til reformatorinnløpet opp til en temperatur på 890°C. Den kalde strømmen av syngass ut av HRSG går inn i en kondenser for å fjerne eventuelle rester av vann. Etter fjerning av vann komprimeres denne strømmen til metanolreaktortrykket.

### 3.3.5 Metanreaktor

Metanol produseres hovedsakelig ved katalytisk hydrogenering av CO og CO<sub>2</sub>. Hydrogenering er prosessen hvor umettede forbindelser mellom karbonatomer blir redusert ved opptak av hydrogenatomer. Ved katalytisk hydrogenering foregår denne prosessen på en katalysator. En katalysator er et stoff som øker farten på en kjemisk reaksjon uten å forbrukes og uten å endre den kjemiske likevekten. Farten til reaksjonen øker fordi katalysatoren reduserer reaksjonens aktiveringsenergi [21]. Reaktoren operer ved 250°C og 50 bar. Reaksjonene i reaktoren er vist i ligning 2 og 3.



Entalpien  $\Delta H$  i reaksjonene har begge en negativ verdi, som betyr at det er en eksoterm prosess som gir fra seg varme. Denne varmen blir benyttet i en FEHE til å varme opp strømmen inn til reaktoren. Reaktoren mottar syngass-strømmen fra HRSG og CO<sub>2</sub>-strømmen fra CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> separatoren. Tilførselen til reaktoren varmes opp til ønsket temperatur på 250°C i FEHE. En del av resirkuleringsgassen (2 mol%) er fjernet for å unngå en økning av metan i prosessen.

### 3.3.6 Separering ved høytrykk - HP flash

Produktene fra metanolreaktoren avkjøles til 38°C for å kondensere vann og metanol. Denne strømmen går så gjennom en prosess kalt "HP flash" hvor den ureagerete

---

syngassen separeres og resirkuleres tilbake til reaktoren. En del av resirkuleringsgassen (2mol%) er rensset for å unngå akkumulering av metan i prosessen.

### **3.3.7 Separering ved lavtrykk - LP flash og destillasjon**

Væsken fra HP flash sendes til en LP flash som opererer på 2 bar for å fjerne eventuelle lette komponenter som er igjen i væsken. Videre går væsken til en rekke destillasjonskollonner. Destillasjonsprosessen separerer metanol, vann og damp. Den destillerte dampstrømmen blander seg med rensestrømmen til LP- og HP flash og brukes i en ovn som tilfører varme til damp-reformerer.

For mer informasjon om prosessen og eventuelle endringer som kan vurderes finnes dette i referanse [19].

## **3.4 Utnyttelse av energi fra biogass og biometanol**

I dette kapitlet beskrives de vanligste metodene for utnyttelse av den produserte energimengden for biogass og biometanol.

### **3.4.1 Kraftvarme (CHP)**

Kraftvarme er et begrep som brukes når elektrisitet og varme produseres samtidig ved forbrenning av en energikilde [22]. Et kraftvarmeverk består av en stempelgassmotor som bruker energien i biogassen til å drive en veivaksel. Denne veivakselen dreier deretter en dynamo for å produsere strøm. Det frigjøres varme under gassforbrenningsprosessen. Denne varmen kan gjenvinnes under kraftvarme for å maksimere varmeverdien for systemet [23]. Dersom biogass skal benyttes til kraftvarmeproduksjon vil den totale virkningsgraden ligge opp til 90% [24].

### **3.4.2 Elektrisk virkningsgrad for biogass**

Biogass kan benyttes til varme- og elektrisitetproduksjon. Som beskrevet i delkapittel 3.4.1 produseres elektrisitet og varme samtidig ved forbrenning av biogass. Det er også en mulighet å ikke utnytte varmen som blir frigjort under gassforbrenningsprosessen. Dersom varmen ikke blir utnyttet vil man kun sitte igjen med elektrisitetproduksjon. Gjennom forskning på ulike biogassanlegg ble virkningsgraden for elektrisitetproduksjon anslått til å være 45-49% [24].

---

### 3.4.3 Direkte metanol brenselcelle

En direkte metanol brenselcelle er en elektrokjemisk energikonverteringsenhet som konverterer den kjemiske energien til flytende metanol til elektrisk energi. Brenselcellen har to elektroder som er atskilt med en membran; en anode og en katode. Ved å kombinere oksygen med metanol transformerer brenselcellen drivstoffet (metanol) til energi [25]. Energieffektiviteten for brenselceller vil variere på typen brenselcelle. De mest effektive brenselcellene har en virkningsgrad opp mot 60%. Det er verdt å legge merke til at disse brenselcellene bruker hydrogen som drivstoff. For en direkte metanol brenselcelle vil virkningsgraden ligge mellom 35-40% [26].

### 3.4.4 Forbrenningsmotor med ren metanol som drivstoff

En forbrenningsmotor er en varmekraftmaskin hvor brennstoffets energiinnhold blir omgjort til mekanisk arbeid. Brennstoffet forbrennes inne i motorens forbrenningsrom slik at forbrenningsproduktene utgjør maskinens varmførende medium. Frigjort varmeenergi fra brennstoffet omsettes direkte til mekanisk arbeid ved at forbrenningsgassene skyver et stempel eller driver et turbinhjul [27]. Ved å bruke ren metanol som brennstoff i en forbrenningsmotor vil forventet virkningsgrad være ca. 40%. [28]

## 4 Bruksområder

I denne delen av oppgaven blir de relevante bruksområdene for biogass og biometanol beskrevet. Disse bruksområdene vil gjelde for lokale og globale verdikjeder.

### 4.1 Biogass

Biogassproduksjon skaper kraftvarme, også kalt CHP (Combined heat and Power). Kraftvarme er et begrep som brukes når elektrisitet og varme produseres samtidig ved forbrenning av en energikilde [22]. Denne varmen kan brukes til oppvarming av vann i selve oppdrettsanlegget, eller for eksempel vann i et fjernvarmeanlegg. Biogass kan også benyttes som drivstoff. Det er da nødvendig med en behandling slik at metannivået overstiger 97%. Oppgradert biogass som består av tilnærmet ren metan kan også utnyttes i et naturgassnett [29].

---

## 4.2 Biometanol

I dag produseres det årlig cirka 100 millioner tonn metanol. Dette behovet er anslått til å øke fra cirka 100 millioner til over 500 millioner tonn i 2050. Biometanol vil utgjøre 135 millioner tonn av denne økningen. Det er et stort behov for grønn metanol som drivstoff for transportformål og ingrediens i ulik produksjon. Metanol kan brukes som drivstoff i forbrenningsmotorer og brenselceller, noe som gjør at det er en god erstatning for fossilt drivstoff innen landbasert- og maritim transportsektor [30].

Metanol har også en høy energitetthet, noe som gjør at det egner seg godt som energibærer. En liter reformert metanol ( $CH_3OH$ ) inneholder 2,1 ganger mer hydrogen enn en liter flytende hydrogen ( $LH_2$ ). På grunn av den høye energitettheten til metanol vil skip kunne benytte lastekapasiteten på en mer effektiv måte. Metanol tar ikke bare mindre plass, men er lettere og tryggere å forholde seg til en for eksempel ammoniakk og ulike former hydrogen. Et skip vil derfor kunne integrere tankene i skipsskroget og bruke enda mindre plass [31].

Behovet for kjemiske stoffer og materialer som maling, lim, plast og lignende er sterkt økende og det forventes en stor økning fra dagens globale produksjon de neste årene. Metanol er et viktig basisstoff i global kjemisk industri og er helt avgjørende for fremstillingen av de nevnte stoffene og materialene. Biometanol har tilsvarende kjemisk sammensetning som fossilt metanol ( $CH_3OH$ ) og kan være en erstatning for alle formål [30].

## 4.3 Andre bruksområder for fiskeslam

Som tidligere beskrevet blir det fokusert på bruken av fiskeslam som et substrat for biogass- og biometanol produksjon, men fiskeslam har også andre bruksområder. Slammet kan for eksempel brukes som gjødsel innen landbruksnæringen. Fiskeslam inneholder nitrogen og fosfor, og ved å bruke slammet som gjødsel vil disse stoffene føres tilbake til kretsløpet. Forsøk fra NIBIO [13] viser at fiskeslam har et stort potensiale som nitrogengjødsel til korn, men at det er stor variasjon mellom ulike produkter. Det ble også gjort forsøk hvor fiskeslam ble sammenlignet med husdyrgjødsel. I disse forsøkene viste det seg at husdyrgjødsel hadde en høyere fosforgjødseffekt, men en kombinasjon med andre kilder kan fiskeslam også være gunstig.

Det vil også være mulig å bruke fiskeslammet som gjødsel etter at det har blitt brukt i biogassproduksjon. For en biogassproduksjon vil det oppstå restprodukter

---

som ofte blir kalt biorester. Disse biorestene består i hovedsak av substratet som ble brukt i produksjonen. Gjennom forsøk utført av NIBIO har denne bioresten også vist potensiale som gjødsel innen landbruksnæringen [32]. I dette forsøket ble det sett på ulike blandingsforhold med fiskeslam og husdyrgjødsel som substrat i en biogassproduksjon. Resultatene viser at et høyt innhold med fiskeslam vil gi best resultater med tanke på gjødseleffekten.

## 4.4 Bruksområde for hydrogen i biogass- og biometanolproduksjon

I dag skal fiskeslam fra Salmon Evolution brukes som råstoff til biogassproduksjon. I denne oppgaven skal en verdikjede for å produsere biometanol undersøkes og sammenlignes med eksisterende system. Hydrogen kan anvendes fra ulike energibærere. Enten som rent hydrogen i flytende form, i komprimert form eller fra hydrogenrike kjemiske stoffer, som ammoniakk eller metanol.

For Salmon Evolution har hydrogenproduksjon en annen fordel. Når hydrogen blir produsert ved elektrolyse av vann blir det produsert oksygen som et biprodukt. Fiskene i landbasert oppdrett har et behov for oksygen, ved en produksjon på størrelse med Salmon Evolution blir dette en betydelig kostnad. Gjennom et samarbeid mellom lokal biometanolprodusent, hydrogenprodusent og landbasert fiskeoppdrett skaper dette en brukerkjede hvor alle parter kan være kunde og distributør. Dette er smarte løsninger som utnytter avfall og biprodukter.

### 4.4.1 Hydrogen som energibærer

Under alminnelig trykk og temperatur opptrer hydrogen i form av gass. Gass er lite egnet for transport og lagring, og derfor blir mesteparten av hydrogenet som produseres i dag brukt på stedet. I noen grad blir hydrogen lagret som komprimert gass eller i flytende form, og omsatt i trykksatte flasker eller tanker.

I dag omsettes komprimert hydrogen i tanker som er trykksatt til 35 MPa eller 70 MPa, tilsvarende 350 bar eller 700 bar. Disse er mye brukt i kjøretøy drevet med hydrogen, og tenkt å bytte ut petroleumsbasert drivstoff. For at hydrogen skal kunne gjøres flytende ved atmosfærisk trykk, må den kjøles ned til  $-252,87^{\circ}\text{C}$ . Dette gir den mest konsentrerte formen for hydrogen, men nedkjølingen er svært energikrevende [33].



---

#### 4.4.2 Ammoniakk som energibærer

Ammoniakk består av tre hydrogenatomer og ett nitrogenatom. Det betyr at den til forskjell fra fossile brensler er karbonfri slik at det ikke dannes  $\text{CO}_2$  når den forbrenner. Både hydrogen og ammoniakk opptrer som gass under normale temperaturer og trykkforhold, men siden kokepunktet er vesentlig høyere på  $-33,4^\circ\text{C}$ , kan det forholdsvis enkelt gjøres flytende [34].

#### 4.4.3 Biometanol som energibærer

I motsetning til hydrogen og ammoniakk opptrer biometanol i form av væske under normale trykk og temperaturforhold, fordi metanol har et kokepunkt på  $64,8^\circ\text{C}$ . Dette gjør at biometanol kan lagres og distribueres på tilsvarende måte som bensin og diesel, uten forbehandlinger. Biometanol er energibæreren med høyest innhold av hydrogenatomer i prosjektet med 4 hydrogenatomer ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), men i motsetning til ammoniakk vil det dannes  $\text{CO}_2$  når metanol forbrenner.

## 5 Avgrensninger for livssyklusanalysen

Livssyklusanalysen i denne oppgaven avgrenses til å se på produksjonen av biogass, metanol, komprimert biogass og flytende biogass. Transport og materialene som kreves ved lagring blir ikke tatt til hensyn i analysen. Hvordan de ulike produktene skal bli anvendt er heller ikke en del av analysen. Bruksområdet vil ha en stor betydning for den totale klimavirkningen. Som nevnt i delkapittel 2.3 og delkapittel 2.4 er både biogass og biometanol fornybare energikilder. Det forventes derfor et negativt globalt oppvarmingspotensial hvis den produserte energien erstatter fossile energikilder.

Smøla klekkeri og Settefisk AS har i samarbeid med Biotek Sterner et biogassanlegg som håndterer ren fiskeslam fra settefisk. For dette anlegget ble det gjort miljøberegninger for biogassproduksjonen [35]. I denne artikkelen ble det studert på ulike cases hvor biogassen ble benyttet på ulike måter. Resultatene fra artikkelen viser at netto  $\text{kg CO}_2 - \text{ekv./tonn TS}$  vil være negativ dersom biogassen erstatter 100% naturgass. Klimabelastningen reduseres også betraktelig ved å erstatte varme fra elektrisitet med biogassen som blir produsert.

---

## 6 Regional verdikjede

I Møre og Romsdal er det et stort potensiale for kortreist energi til lokale forbrukere. Regionen har flere nøkkelaktører med kunnskap og posisjon for å utvikle både hydrogen-, biogass- og biometanolproduksjon. De lokale energiressursene bør fordeles lokalt for å skape kortreiste og energieffektive løsninger.

### 6.1 Regional biometanolproduksjon

Glocal Green er en bedrift i oppstartsfasen som er lokalisert i Ålesund. Bedriften planlegger å starte metanolproduksjon i løpet av de neste årene. Gjennom pågående forsøk i samarbeid med SINTEF blir det forsket på potensialet til ulike biomasser og prosesser [36]. Det blir sett på potensialet ved å gå direkte fra biomasse til biometanol, altså ingen biogassproduksjon. Dette er allerede en kjent prosess, men Glocal Green planlegger å tilføre ekstra hydrogen til den normale syntesegassen. Ved å tilføre hydrogen i syntesegassen vil metanolet bli reformert og vil kunne inneholde 2,1 ganger mer hydrogen. Dette vil si at metanolet vil ha et høyere energiinnhold og øker verdien sin som energibærer [31].

#### 6.1.1 Hva er mulighetene for en lokal brukerkjede

Norwegian Hydrogen har planlagt et hydrogenanlegg ved Geirangerfjorden i Hellsylt som er antatt produksjonsklar i løpet av 2023. Et eksempel på en teoretisk brukerkjede kan være: Salmon Evolution distribuerer biomasse til Glocal green for biometanolproduksjon. Norwegian Hydrogen distribuerer hydrogen til Glocal Green for å tilsette ekstra hydrogenatomer i syntesegassen. Samtidig som biproduktet oksygen fra hydrogenproduksjonen blir fraktet til Salmon Evolution for å dekke oksygenbehovet til fisken.

Norges største anlegg for produksjon av biogass ligger i Skogn i Trøndelag. Her produseres flytende biogass fra en rekke ulike råstoff, blant annet avfall fra fiskeoppdrett og skogbruk. Anlegget i Skogn har erfaring med bruk av fiskeslam. Av den grunn kan det være aktuelt å sende slam til Skogn.

---

## 7 Metode

Formålet er å finne den mest bærekraftige løsningen for utnyttelse av slam fra landbasert lakseoppdrett. Dette kapitlet skal beskrive metoden vi har brukt for å komme frem til en konklusjon for prosjektet.

Hva som er mest bærekraftig i denne oppgaven avhenger av faktorene energimengde, energiforbruk og utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Det er verdt å merke seg at det fokuseres på energimengde i sluttproduktene og ikke produsert energi. Denne begrensingen i oppgaven har vi valgt på grunn av mangel på data når det gjelder virkningsgrader og energiforbruk. Med bruk av virkningsgradene beskrevet i delkapittel 3.4 vil det likevel bli gjort beregninger for utnyttelsen av energimengden, men disse utregningene vil kun være estimater og kan bare brukes som eksempler.

### 7.1 Forskningsmetode

Kvantitativ metode er forskningsmetoder som brukes ved innsamling og analyse av data som foreligger i form av tall eller andre mengdetermer [37]. Denne rapporten har benyttet kvantitativ metode for å skaffe nødvendig data for å gjøre beregninger. Eksempler på dette kan være tall hentet fra Salmon Evolution sitt anlegg.

Kvalitativ metode er forskningsmetoder som brukes ved innsamling og analyse av data som vanligvis foreligger i form av tekst [38]. Den kvalitative metoden har også blitt benyttet i dette prosjektet. Dette i form av artikler, eposter og samtaler med ulike aktører.

### 7.2 Potensiell mengde slam ut av anlegget

Mengde slam for de ulike trinnene er beregnet i tidligere arbeid av Andreas Falinski. Dette ble gjort med en antagelse om at lik mengde slam blir produsert fra ett kar uavhengig av byggetrinn. Utbyggingen av anlegget er delt opp i tre byggetrinn. Byggetrinn 1 består av 12 kar, byggetrinn 2 består av 24 kar og byggetrinn 3 består av 48 kar. Mengde slam fra ett kar blir beregnet ved å dividere mengde slam fra byggetrinn 3 med 48 kar. Videre blir mengde slam fra ett kar multiplisert med antall kar for hvert byggetrinn. 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 [1].

## 7.3 Beregning av potensielt produksjonsvolum

I dette kapitlet beskrives metodikken for å beregne potensielt produksjonsvolum for biogass og biometanol.

### 7.3.1 Biogass

Produsert mengde biogass ( $m_{biogass}$ ) kan beregnes ved å ta i bruk formel 4. I formelen er  $v$  potensielt volum  $CH_4$ , oppgitt i normalkubikkmeter per tonn organisk materiale i fiskeslam.  $m_{VS}$  er total organisk masse i TS.  $\eta$  er virkningsgraden til en reaktor. Det er krevende å definere en virkningsgrad i et biogassanlegg, fordi et substrat ofte inneholder stoff som ikke er nedbrytbare. Eksempelvis fiskebein. I denne rapporten defineres virkningsgraden som andelen organisk materiale nedbrutt fra den totale mengden VS.

$$m_{VS} \cdot \eta \cdot v = V_{CH_4} \quad (4)$$

Verdier brukt i beregningene for potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass er vist i tabell 1. Det er oppgitt en minimum ( $\min_{VS}$ ) og maksimum ( $\max_{VS}$ ) verdi av andel VS. Årsaken til dette er usikkerhet i dataen. Analyser av fiskeslam viser en stor variasjon i andel VS. Videre blir det derfor undersøkt to biogass-strømmer. Biogass med en andel VS på 83% blir omtalt som VS1. Biogass med en andel VS på 65.5% omtales som VS2.

Tabell 1: Verdier brukt i beregninger for potensielt produksjonsvolum råbiogass og oppgradert biogass.

Symbol	Verdi	Enhet	Kilde
$\max_{VS}$	0,83	[-]	[39]
$\min_{VS}$	0,655	[-]	[35]
$\eta$	0,744	[-]	[39],[35]
$v$	720	$[Nm^3/tonn]$	[1]

---

### 7.3.2 Biometanol

Verdier brukt i beregninger av potensielt produksjonsvolum biometanol er vist i tabell 2.  $BGF_{sim}$  er innløpsstrømmen av biogass for en simulert metanolproduksjon [19]. Denne faktoren utgjør hvor mye biogass som blir brukt i den gitte metanolproduksjonen. I artikkelen er det gitt at innløpsstrømmen av biogass er  $1,8 \cdot 10^6 Nm^3/år$ , men dette viste seg å være en skrivefeil i artikkelen. Etter samtale med forfatter Srinivas Seethamraju ble den faktiske innløpsstrømmen av biogass avklart til å være  $2,2 \cdot 10^6 Nm^3/dag$ . I samme simulasjon er den maksimale mengden metanol produsert lik  $2042,25 Tonn/dag$  ( $m_{metanol,sim}$ ).

Det antas at prosessen i oppgaven vil være lik den prosessen som blir simulert i artikkelen [19]. Forholdet mellom metanol produsert og tilført biogass vil være den samme i denne oppgaven som i simuleringen. Beregningen av dette forholdet blir vist i ligning 5.

$$\sigma = \frac{m_{metanol,sim}}{BGF_{sim}} \quad (5)$$

Videre blir  $\sigma$  brukt som en omdanningsfaktor fra biogass til metanol. I delkapittel 7.3.1 fremføres det hvordan potensielt produksjonsvolum av biogass blir funnet. Produksjonsvolumet av biogass skal videre omgjøres til metanol. Dette blir gjort ved bruk av omdanningsfaktoren, som vist i ligning 6.

$$m_{metanol} = m_{biogass} \cdot \sigma \quad (6)$$

Tabell 2: Verdier brukt i beregninger for potensielt produksjonsvolum biometanol.

Symbol	Verdi	Enhet	Kilde
$BGF_{sim}$	$2,2 \cdot 10^6$	$Nm^3/dag$	[19]
$m_{metanol,sim}$	2042,25	Tonn/dag	[19]
$\sigma$	$9,283 \cdot 10^{-4}$	Tonn metanol/ $Nm^3$ biogass	[-]

### 7.4 Beregning av potensiell energimengde

I dette kapitlet beskrives metoden for å beregne potensiell energimengde for biogass og biometanol.

---

### 7.4.1 Biogass

Potensiell energimengde fra biogass beregnes ut i fra volumetrisk energiinnhold  $\epsilon_v$  for metan.  $\epsilon_v$  er basert på nedre brennverdi, og gitt til å være 9,94 kWh/Nm<sup>3</sup> [40]. Biogass inneholder både metan og karbondioksid, men karbondioksid har ingen brennverdi. Av den grunn beregnes energimengden i biogass kun fra mengde metan. Den totale årlige energimengden beregnes ved å gange  $\epsilon_v$  for metan med mengde biogass i Nm<sup>3</sup> 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.

### 7.4.2 Biometanol

Potensiell energimengde fra biometanol beregnes ut i fra energitettheten til metanol. Energitettheten er basert på den nedre brennverdien og molvekten for metanol. Den nedre brennverdien for metanol er gitt  $-726 \text{ kJ/mol}$  [41]. Molvekten til metanol beregnes frem ved bruk av molvektene til hydrogen, karbon og oksygen. Molvektene brukt for utregningen er oppgitt i tabell 3. Absoluttverdien til den nedre brennverdien blir deretter multiplisert med molvekten ( $M_{CH_3OH}$ ) for å finne energitettheten til metanol ( $\epsilon_{metanol}$ ). For å finne den potensielle energimengden blir energitettheten multiplisert med potensiell produksjonsmengde metanol ( $m_{metanol}$ ) som vist i ligning 8.

$$E_{metanol} = \epsilon_{metanol} \cdot m_{metanol} \quad (7)$$

Tabell 3: Molvekt for hydrogen, karbon og oksygen.

Symbol	Verdi	Enhet	Kilde
H	1	g/mol	[42]
C	12	g/mol	[42]
O	16	g/mol	[42]

## 7.5 Dimensjonering av lagringstank

Etter endt produksjon av metanol eller biogass er det nødvendig å lagre produktet i lagertanker. Det blir derfor beregnet nødvendig lagringskapasitet for metanol,

---

komprimert biogass og flytende biogass. I referansen [1] ble det antatt en hydraulisk oppholdstid på en måned for lagerberegningene. Denne antagelsen vil også gjelde for beregningene i denne oppgaven.

### 7.5.1 Komprimert- og flytende biogass

Lagringsvolum for CBG og LBG er beregnet i referansen [1] og disse beregningene blir videre brukt i denne oppgaven. I disse beregningene antas det en lagring tilnærmet 100% metan. Denne tilnærmingen skyldes at biogassen skal være rensset og omgjort til oppgradert biogass. Dette er nødvendig dersom biogassen skal fraktes over lengere avstander eller bli brukt som drivstoff.

### 7.5.2 Metanol

Metanol har en massetetthet ( $\rho_{metanol}$ ) på  $0,787 \text{ g/cm}^3$  [41]. Ved enhetsomgjøring tilsvarer dette  $0,787 \text{ tonn/m}^3$ . I delkapittel 7.3.2 ble det fremført hvordan potensielt produksjonsvolum av metanol ( $m_{metanol}$ ) blir beregnet. Dette produksjonsvolumet forteller hvor mye metanol som vil bli produsert per måned i tonn. Massetettheten for metanol blir derfor multiplisert med det potensielle produksjonsvolumet for å få et produksjonsvolum i kubikkmeter. Ved å se på et månedlig produksjonsvolum i kubikkmeter vil det kunne avgjøres nødvendig lagringskapasitet.

$$V_{metanol} = m_{metanol} \cdot \rho_{metanol} \quad (8)$$

## 7.6 Klimagassutslipp ved produksjon

Det globale oppvarmingspotensialet for biogassproduksjon med fiskeslam som substrat ligger mellom 22 og  $42 \text{ gCO}_2\text{-ekv/Mj}$  [43]. Siden det er en spredning på det globale oppvarmingspotensialet vil det være nødvendig å bruke en medianverdi på  $32 \text{ gCO}_2\text{-ekv./Mj}$  i videre beregninger. For å kunne utføre beregningene i denne oppgaven blir det gjort en antagelse om at veriden  $32 \text{ gCO}_2\text{-ekv./Mj}$  inneholder oppgradering av biogass. Metoden for oppgradering er vannskrubbingsteknologi for fjerning av  $H_2S$  og  $CO_2$ . Denne metoden kalles også absorpsjonsanlegg og er beskrevet tidligere i delkapittel 3.2.4.

I tabell 4 blir de andre verdiene brukt i beregningene fremført. Oppgraderingen av biogass for CBG vil være lik oppgraderingen av råbiogass, mens for LBG vil det

---

være et ekstra rensingsteg. For metanolproduksjon vil det ikke være nødvendig med tilsvarende oppgradering av biogassen, men biogassen må likevell renses [44].

Tabell 4: Globalt oppvarmingspotensial for de studerte prosessene [44].

Produkt	CBG	LBG	Metanol
Enhet	$g CO_2 - ekv./Nm^3 RBG$		
Oppgradering av biogass	289	298	70
Komprimering av biogass	45	-	-
Flytendegjøring av biogass	-	157	-
Metanolsyntese	-	-	106

## 8 Resultat og diskusjon

I dette kapittelet blir resultatene presentert og diskutert. De gitte resultatene er preget av usikkerhet i alle ledd, og av den grunn kan de gitte verdiene kun anses som estimater på potensielle mengder.

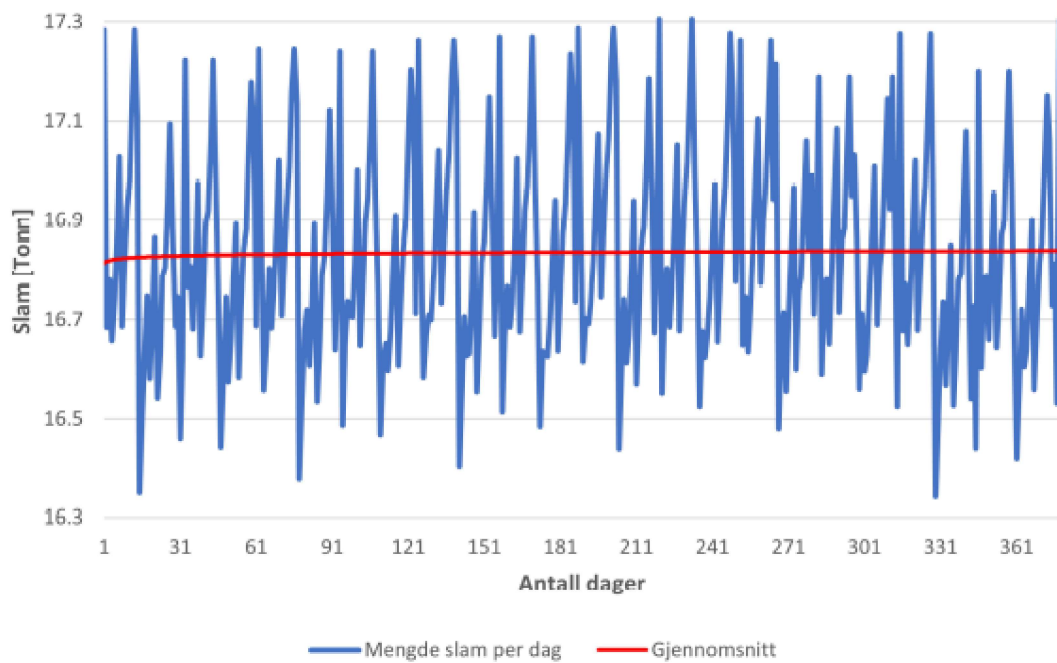
### 8.1 Potensiell mengde slam ut av anlegget

Potensiell mengde slam ut av anlegget er hentet fra tidligere arbeid [1]. Figur 6 viser en stabil mengde slam ut av anlegget. En biogassproduksjon vil derfor kunne belage seg på en forutsigbar mengde, med lite sesongbaserte variasjoner.

Det er viktig å notere seg at grafen kun viser mengde slam i vekt, uten å nevne variasjoner i sammensetningen til slammet. Dermed kan biogasspotensialet til slam variere over tid, selv om mengden slam forblir stabil. Her er det nødvendig med ytterligere analyser av sammensetningen til slam over en lengre periode for å fastsette sesongbaserte variasjoner.

Total mengde i dette prosjektet er basert på en produksjon over en periode på 361 dager. Gjennomsnittsverdier for daglig, ukentlig, månedlig og total mengde slam produsert i anlegget for hvert byggetrinn er vist i Tabell 5. I videre beregninger er det antatt at utregninger med grunnlag i gjennomsnittsverdier vil gi et tilnærmet riktig estimat på produksjonsmengde biogass.





Figur 6: Daglig mengde slam ut av fullt utbygd anlegg med 48 kar med andel tørrstoff på 100% [1].

Tabell 5: Mengde slam per byggetrinn med andel tørrstoff på 100% [1].

Byggetrinn	1	2	3
Enhet	tonn		
Daglig gjennomsnitt	4,2	8,4	16,8
Ukentlig gjennomsnitt	29,3	58,9	117,8
Månedlig gjennomsnitt	128,1	256,1	511,9
Daglig maks	4,3	8,6	17,3
Daglig min	4,1	8,2	16,3
Total mengde	1 590,8	3 181,6	6 363,3

## 8.2 Potensielt produksjonsvolum

Basert på produsert mengde slam fra anlegget til Salmon Evolution er potensiell mengde råbiogass, oppgradert biogass og biometanol beregnet. Beregningene har

---

blitt gjennomført for både VS1 og VS2.

For beregningene ble verdien for det potensielle volumet av  $CH_4$  per masse VS satt som den maksimale teoretiske verdien. I en reell produksjon vil denne verdien være lavere. Siden den maksimale teoretiske verdien er brukt i beregningene vil resultatet reflektere et maksimal potensial for biogass og energi fra fiskeslam [1]. Som beskrevet i delkapittel 7.3.2 blir  $\sigma$  beregnet ved bruk av maksimal metanolproduksjon. Dette gjør at også resultatene for metanol vil reflektere et maksimal potensial.

### 8.2.1 Råbiogass

I tabell 6 er potensiell mengde råbiogass basert på VS1 og VS2 presentert. Det kommer tydelig frem at mengde gass som blir produsert er avhengig av andel organisk materiale i slammet. Det blir produsert ca. 27% mere biogass fra VS1 enn for VS2. For en reell biogassproduksjon vil det være avgjørende å fastsette andel organisk materiale i tørrstoffet.

Tabell 6: Potensiell mengde råbiogass produsert ved utnyttelse av fiskeslam [1].

VS1			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 83%			
Byggetrinn	1	2	3
Enhet	$Nm^3$		
Daglig gjennomsnitt	3 019	6 039	12 076
Ukentlig gjennomsnitt	21 136	42 271	84 531
Månedlig gjennomsnitt	91 840	183 677	367 306
Total mengde	1 140 795	2 281 603	4 563 214
VS2			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 65,5%			
Byggetrinn	1	2	3
Enhet	$Nm^3$		
Daglig gjennomsnitt	2 383	4 764	9 529
Ukentlig gjennomsnitt	16 678	33 349	66 705
Månedlig gjennomsnitt	72 471	144 911	289 850
Total mengde	900 271	1 800 542	3 601 090

---

### 8.2.2 Oppgradert biogass

Potensiell mengde oppgradert biogass er vist i tabell 7. Det er gjort en antagelse om at oppgradert biogass består av 100% metan, men dette vil ikke være tilfellet for en reell produksjon [1]. I realiteten vil det være vanskelig å rense bort alt av andre stoff, og det forventes derfor et faktisk metaninnhold mellom 97% og 100% [16].

I beregningene er også tap av metan utelatt. For en reell renseprosess vil det være små tap av metan, og tapet vil variere med hvilken rensesmetode som blir brukt. Metantapet er derfor et usikkerhetsmoment, og dersom Salmon Evolution skal oppgradere biogass er det viktig å påpeke at valg av rensesmetode vil påvirke mengde metan som er tapt [1].

Volumtettheten til oppgradert biogass er beregnet og vist i tabell 8. Som i delkapittel 8.2.1 er det også en tydelig differanse på hvor mye biogass som kan bli produsert avhengig av andel organisk materiale i tørrstoffet. En høyere andel organisk materiale i tørrstoffet resulterer i mer produsert biogass.

Tabell 7: Potensiell mengde oppgradert biogass produsert ved utnyttelse av fiske-slam [1].

<b>VS1</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 83%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	$Nm^3$		
Daglig gjennomsnitt	1 872	3 744	7 488
Ukentlig gjennomsnitt	13 103	26 206	52 411
Månedlig gjennomsnitt	56 934	113 871	227 739
Total mengde	707 297	1 414 585	2 829 170
<b>VS2</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 65,5%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	$Nm^3$		
Daglig gjennomsnitt	1 477	2 954	5 909
Ukentlig gjennomsnitt	10 340	20 680	41 361
Månedlig gjennomsnitt	44 932	89 856	179 723
Total mengde	558 168	1 116 336	2 232 673

---

Tabell 8: Produksjonvolum biogass per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff.

Andel organisk materiell i tørrstoff	kg metanol/kg slam
VS1: 83%	0,44
VS2: 65,5%	0,35

### 8.2.3 Biometanol

Potensell produsert mengde metanol er vist i tabell 9. Mengden av metanol som blir produsert er avhengig av mengden råbiogass som blir produsert. Derfor vil også andel av organisk materiale i tørrstoffet ha en betydning for dette resultatet. Som beskrevet i delkapittel 7.3.2 er beregningene gjort med hensyn til et simulert anlegg og det vil derfor være usikkerhet i rundt resultatet. Dette vil være et usikkerhetsmoment som gjør at resultatet kun vil være et estimat. Dersom Salmon Evolution skal produsere biometanol vil det være nødvendig med egne simuleringer for et mer reelt resultat.

Tabell 9: Potensiell mengde metanol produsert ved utnyttelse av fiskeslam.

<b>VS1</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 83%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>tonn</b>		
Daglig gjennomsnitt	2,8	5,6	11,2
Ukentlig gjennomsnitt	19,6	39,2	78,5
Månedlig gjennomsnitt	85,3	170,5	341,0
Total mengde	1 059,0	2 118,0	4 236,0
<b>VS2</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 65,5%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>tonn</b>		
Daglig gjennomsnitt	2,2	4,4	8,8
Ukentlig gjennomsnitt	15,5	31,0	61,9
Månedlig gjennomsnitt	67,3	134,5	269,1
Total mengde	835,7	1 671,4	3 342,9

Tabell 10: Produksjonsvolum metanol per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff.

<b>Andel organisk materiell i tørrstoff</b>	<b>kg metanol/kg slam</b>
VS1: 83%	0,67
VS2: 65,5%	0,53

### 8.3 Potensiell energimengde og energiforbruk

Energiforbruk forteller hvor mye energi produksjonen forbraker. For at energiutbyttet skal være positivt må energiforbruket være mindre enn potensiell energimengde. I dette delkapitlet presenteres resultatet for potensiell energimengde og energiforbruk.

---

### 8.3.1 Oppgradert biogass

Den potensielle energimengden fra den oppgraderte biogassen for VS1 og VS2 er gitt i tabell 11. For det årlige energiforbruket til Salmon Evolution's anlegg tilsvarer dette ca. 10,5% for VS1, og ca. 8% for VS2 [1]. Som beskrevet tidligere er dette resultatet energiinnholdet til biogassen. For å oppnå et realistisk resultat vil det være nødvendig å ta hensyn til virkningsgrad og energiforbruk.

På grunnlag av dårlig datagrunnlag vil det ikke være mulig å fastslå energiforbruket til biogassproduksjonen. Etter en samtale med Inge Hoemsnes, eier av gårdsbiogassanlegg, ble det erfart at biogassanlegget som idag tar i mot fiskeslammet er selvforsynt med elektrisitet [45]. Det gjør at det antas også i denne oppgaven at en del av energien som blir produsert går tilbake til produksjonen.

Tabell 11: Potensiell energimengde produsert i form av oppgradert biogass ved utnyttelse av fiskeslam [1].

<b>VS1</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 83%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>MWh</b>		
Daglig gjennomsnitt	18,7	37,4	74,8
Ukentlig gjennomsnitt	130,9	261,9	523,8
Månedlig gjennomsnitt	569,0	1 138,0	2 276,0
Total mengde	7 068,7	14 137,4	28 274,7
<b>VS2</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 65,5%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>MWh</b>		

---

Tabell 12: Energitetthet for oppgradert biogass per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff [1].

Andel organisk materiell i tørrstoff	kWh/kg slam
VS1: 83%	4,4
VS2: 65,5%	3,5

### 8.3.2 Biometanol

Som beskrevet i delkapittel 7.4.2 er det nødvendig å beregne molvekten til metanol for å videre kunne beregne energitettheten. Beregningen blir vist i ligning 9.

$$M_{CH_3OH} = (1 \cdot M_C) + (4 \cdot M_H) + (1 \cdot M_O) = [(1 \cdot 12) + (4 \cdot 1) + (1 \cdot 16)] g/mol = 32 g/mol \quad (9)$$

Med en molarvekt på  $32 g/mol$  vil energitettheten være lik  $6,3 MWh/tonn$ . Denne energitettheten vil som beskrevet i metodekapittelet være avgjørende for beregningene av den potensielle energimengden for metanol.

Energiinnhold for den potensielle metanolproduksjonen er gitt i tabell 13. For det totale energiforbruket til anlegget tilsvarer dette 9,5% for VS1 og 7,5% for VS2, dette med en produksjonstid på ett år.

Energiforbruket til metanolproduksjon vil være hovedsaklig rensing av biogassen, metanolsyntesen og dampgenerering. Metanolsyntesen er en eksoterm prosess som vil skape ekstra energi som kan være til nytte. Denne energien kan bli brukt til å generere elektrisitet som kan brukes til metanolsyntesen eller dampgenerering [44]. Energiforbruket og virkningsgrader for metanolproduksjonen vil allerede være en del av beregningene i denne oppgaven siden verdiene brukt i utregningen kommer fra simuleringen i artikkelen [19].

Tabell 13: Potensiell energimengde per kg slam for metanol, produsert ved utnyttelse av slam.

<b>VS1</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 83%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>MWh</b>		
Daglig gjennomsnitt	17,7	35,3	70,6
Ukentlig gjennomsnitt	123,6	247,2	494,4
Månedlig gjennomsnitt	537,1	1 074,2	2 148,1
Total mengde	6 671,7	13 343,5	26 687,0
<b>VS2</b>			
Andel organisk materiell i tørrstoff på 65,5%			
<b>Byggetrinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Enhet</b>	<b>MWh</b>		
Daglig gjennomsnitt	13,9	27,9	55,7
Ukentlig gjennomsnitt	97,5	195,0	390,1
Månedlig gjennomsnitt	423,8	847,5	1 695,1
Total mengde	5 265,0	10 530,1	21 060,2

Tabell 14: Energitetthet for metanol per kg slam, avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff.

<b>Andel organisk materiell i tørrstoff</b>	<b>kWh/kg slam</b>
VS1: 83%	4,2
VS2: 65,5%	3,3



---

### 8.3.3 Energiproduksjon

Dersom den potensielle energimengden skal utnyttes vil det være nødvendig å benytte seg av metodene beskrevet i delkapittel 3.4. I tabell 15 presenteres resultatene for de ulike metodene med hensyn til beregnet energimengde. Resultatene fremført i tabell 15 er et estimat på hvor mye energi en eventuell forbruker vil sitte med per kilo fiskeslam.

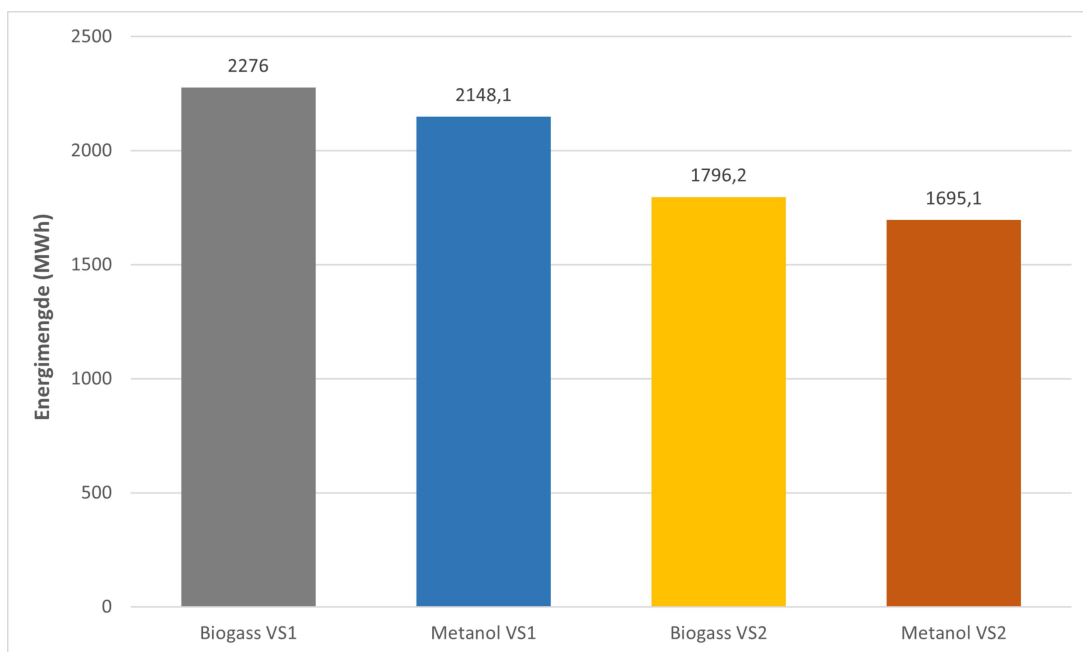
Hvilken av disse metodene som blir valgt vil være avhengig av bruksområdet. Kraftvarme fra biogass vil egne seg godt dersom det er behov for varme og elektrisitet, men det vil kreve et lokalt kraftverk. Bruken av metanol i en forbrenningsmotor eller brenselcelle viser seg å ikke være like effektive metoder som kraftvarmeproduksjon, men vil ikke kreve et lokalt kraftverk. Metanol kan erstatte fossile drivstoff i en forbrenningsmotor og egner seg godt til lagring og transport.

Tabell 15: Potensiell energimengde per kg slam for biogass og metanol produsert ved utnyttelse av slam. Beregningene er avhengig av VS som er andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 er 83% og VS2 er 65,5%.

<b>Andel organisk materiell i tørrstoff</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>
<b>Enhet</b>	<i>kWh/kg slam</i>	
Kraftvarme (biogass)	3,96	3,15
Elektrisk virkningsgrad (biogass)	2,07	1,65
Forbrenningsmotor (metanol)	1,68	1,32
Brenselcelle (metanol)	1,58	1,24

### 8.3.4 Sammenligning

I figur 7 sammenlignes den potensielle energimengden for oppgradert biogass og metanol. Ved en produksjonstid på en måned vil det være en differanse på 127,9 MWh for VS1 og 101,1 MWh for VS2. Dette tilsvarer et tap på 5-6%, dette tapet vil også variere med tanke på utnyttelse av energimengden.



Figur 7: Potensiell energimengde for oppgradert biogass og metanol ved VS1 som har 83% andel organisk materiell i tørrstoff, og VS2 som har 65,5% andel organisk materiell i tørrstoff.

## 8.4 Lagringsbehov

Nødvendig lagringsbehov er vist i tabell 16, 17 og 18. Resultatene er beregnet basert på en antagelse om en hydraulisk oppholdtid på en måned for fiskeslam. For et reelt resultat vil det være nødvendig med ytterlige forsøk med fiskeslam i ulike typer reaktorer for å kunne fastsette optimal hydraulisk oppholdtid for fiskeslam. De fremførte resultatene i dette kapitlet vil dermed kun være estimater som kun kan brukes som eksempler [1].

### 8.4.1 Komprimert biogass - CBG

Forventet lagringsvolum av komprimert biogass er vist i tabell 16. Volumet er beregnet med en antagelse om ideell gass. I realiteten vil produsert CBG avvike fra idealet på grunn av høyt trykk. Dersom en gass er under høyt trykk vil den få et høyt avvik fra ideell gass [46]. For å kunne beregne et nøyaktig volum av CBG vil det være nødvendig med målinger fra en reell biogassproduksjon [1].

---

Tabell 16: Potensielt lagringsbehov for komprimert biogass ved en måneds biogassproduksjon ved  $T=18\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $p=250\text{ bar}$ . Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5% [1].

Byggetrinn	1	2	3
Enhet	$m^3$		
Månedlig gjennomsnitt (VS1)	246,0	491,9	983,9
Månedlig gjennomsnitt (VS2)	194,1	388,2	776,4

#### 8.4.2 Flytende biogass - LBG

Forventet lagringsvolum av flytende biogass er vist i tabell 17. Det nødvendige lagringsvolumet for LBG tilsvarer 41% av det nødvendige lagringsvolumet for CBG. Energiinholdet for LBG og CBG er likt, noe som betyr at LBG har større energitetthet enn CBG. Dersom produsert biogass skal fraktes eller lagres med begrenset lagringskapasitet kan dette være nyttig kunnskap [1].

Tabell 17: Potensielt lagringsbehov for flytende biogass ved en måneds biogassproduksjon. Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5% [1].

Byggetrinn	1	2	3
Enhet	$m^3$		
Månedlig gjennomsnitt (VS1)	101,0	202,0	404,0
Månedlig gjennomsnitt (VS2)	79,8	159,3	318,8

#### 8.4.3 Biometanol

Beregnet volum av metanol er vist i tabell 18. Volumet for metanol tilsvarer 66% av det nødvendige lagringsvolumet for LBG, og 26% av lagringsvolumet for CBG. Metanol vil ha lavest lagringsbehov, men som vist i delkapitell 7.3.3 vil også metanol ha lavest energimengde. Dette vil si at det totale energiinholdet til metanol ikke vil være likt det totale energiinholdet til CBG og LBG.

---

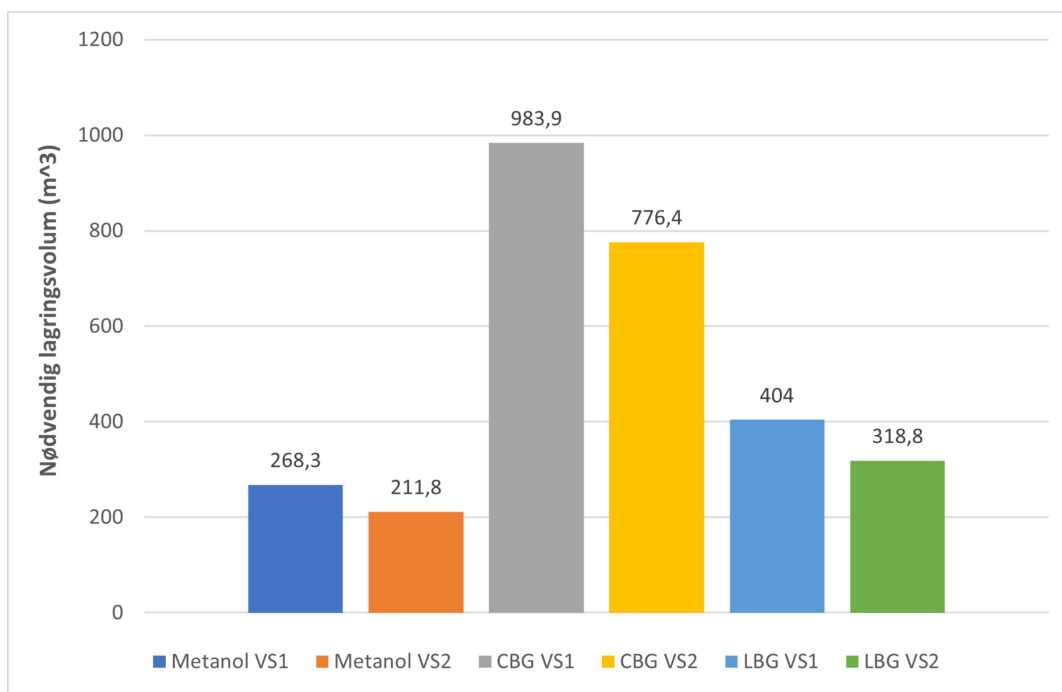
Tabell 18: Potensielt lagringsbehov biometanol ved en måneds biogassproduksjon. Beregningene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoff, hvor VS1 tilsvarer 83% og VS2 tilsvarer 65,5.

Byggetrinn	1	2	3
Enhet	$m^3$		
Månedlig gjennomsnitt (VS1)	67,1	134,2	268,3
Månedlig gjennomsnitt (VS2)	52,9	105,9	211,8

#### 8.4.4 Sammenligning

I figur 8 sammenlignes nødvendig lagringsvolum for Metanol, CBG og LBG. CBG skiller seg ut med tanke på volum, men komprimeringen vil være billigere med tanke på energiforbruk. Flytendegjøring av biogass vil kreve ca.  $0,63 \text{ kWh}/Nm^3 \text{ OBG}$ , mens komprimering av biogass vil kreve ca.  $0,18 \text{ kWh}/Nm^3 \text{ OBG}$  [44].

For CBG og LBG vil det kreves oppgradert biogass, noe som ikke er nødvendig for metanolproduksjon. Biogassen som blir brukt til metanolproduksjon vil likevel kreve rensning. For CBG og LBG vil oppgradering av biogass ha et energiforbruk på ca.  $0,45 \text{ kWh}/Nm^3 \text{ OBG}$  [44]. Dette tilsvarer 102,5 MWh for VS1, og 80,9 MWh for VS2 ved en produksjonstid på en måned. Energiforbruket til en metanolproduksjon blir beskrevet i delkapittel 8.3.2.



Figur 8: Nødvendig lagringsvolum for metanol, komprimert og flytende biogass ved VS1 som har 83% andel organisk materiell i tørrstoff, og VS2 som har 65,5% andel organisk materiell i tørrstoff.

## 8.5 Livssyklusanalyse

I tabell 19 blir forventet globalt oppvarmingspotensial presentert. Alle resultatene er oppgitt i  $g CO_2 - ekv./kg\ slam$ . Som nevnt tidligere i delkapittel stammer alle sluttproduktene fra RBG (råbiogass). Derfor vil oppvarmingspotensialet til RBG være grunnsteinen for alle resultatene.

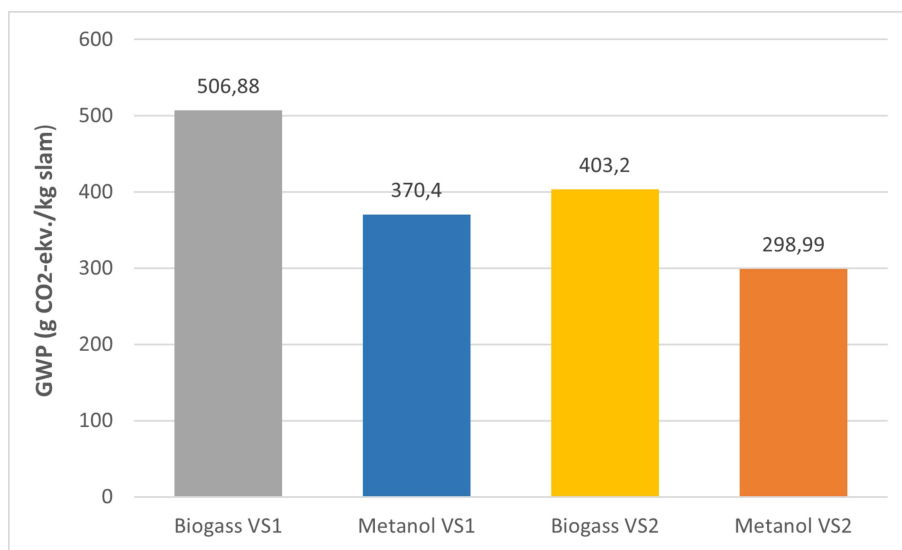
Resultatene for livssyklusanalysen er basert på et begrenset datagrunnlag. I litteratursøket ble det funnet kun to relevante kilder. Lite og mangelfull data forårsaker en usikkerhet i resultatene. På grunn av dette var det nødvendig med noen antagelser som beskrives i delkapittel 7.6. For et reelt resultat vil det være nødvendig med ytterligere og mer nøyaktige analyser av de forskjellige prosessene.

---

Tabell 19: Globalt oppvarmingspotensial for produksjon av råbiogass, oppgradert biogass og metanol. Råbiogass omtales som RBG og oppgradert biogass omtales som OBG. Beregningene er avhengig av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%.

<b>GWP-verdi per kg fiskeslam (<math>g CO_2 - ekv./kg\ slam</math>)</b>	
<b>Produkt</b>	<b>Verdi</b>
RBG VS1	298,08
RBG VS2	238,57
OBG VS1	506,88
OBG VS2	403,20
Metanol VS1	370,40
Metanol VS2	298,99

Som vist i Figur 9 sammenlignes GWP-verdien til oppgradert biogass og metanol for VS1 og VS2. Figuren viser en høyere GWP-verdi for biogass enn metanol i begge tilfellene av VS. Siden begge produktene stammer fra RBG viser det seg at prosessen for å oppgradere RBG har en høyere GWP-verdi enn prosessen fra RBG til biometanol.



Figur 9: Globalt oppvarmingspotensial per kg slam for biogass- og metanolproduksjon. Verdiene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5% materiell i tørrstoff.

Tabell 20 viser det globale oppvarmingspotensialet for metanol og OBG gitt i  $g CO_2 - ekv./kWh$ . Medianverdien for OBG i tabell 20 er tilsvarende for medianverdien på  $32 g CO_2 - ekv./MJ$  fra delkapittel 7.6. Her også viser resultatet at metanol har et lavere global oppvarmingspotensial i forhold til OBG.

Tabell 20: Globalt oppvarmingspotensial per kilowatttime for metanol- og oppgradert biogassproduksjon. VS1 tilsvarer en andel organisk materiell i tørrstoffet på 83%. VS2 tilsvarer en andel organisk materiell i tørrstoffet på 65,5%.

Metanol (VS1)	Metanol (VS2)	OBG (Medianverdi)
$g CO_2 - ekv./kWh$		
88,19	90,60	115,20

Tabell 21 presenterer det globale oppvarmingspotensialet ved å komprimere biogass eller gjøre biogassen flytende. Metanol er lagt til i tabellen for å sammenligne. Som beskrevet i delkapittel 7.5.1 er det nødvendig å produsere CBG eller LBG dersom biogassen skal fraktes over lengere avstander eller bli brukt som drivstoff.

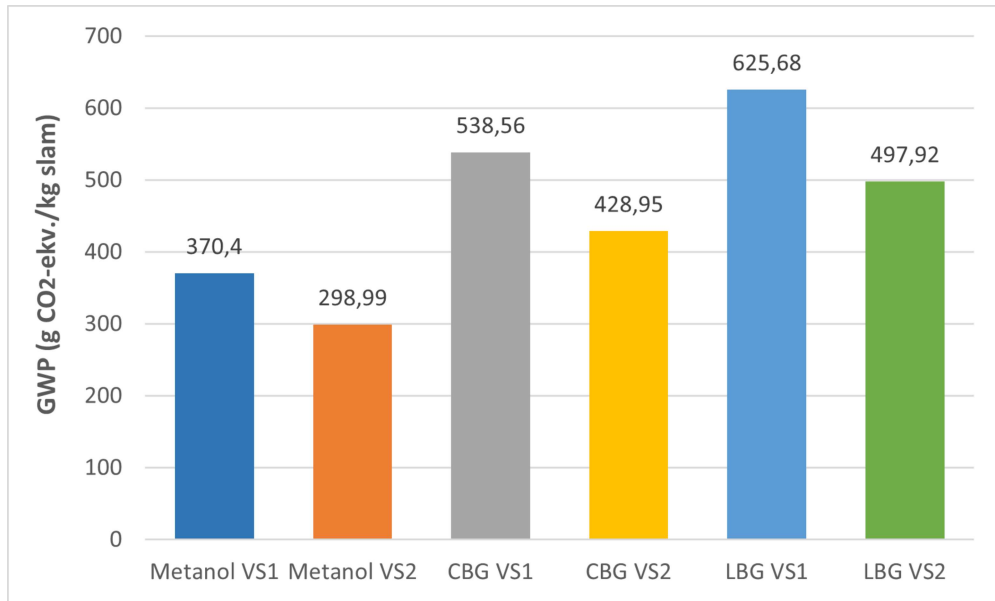
---

Tabell 21: Globalt oppvarmingspotensial for produksjon av metanol, komprimert biogass og flytende biogass. Komprimert biogass omtales som CBG og flytende biogass omtales som LBG. Beregningene er avhengig av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%.

GWP-verdi per kg fiskeslam ( $g CO_2 - ekv./kg\ slam$ )	
Produkt	Verdi
Metanol VS1	370,40
Metanol VS2	298,99
CBG VS1	538,56
CBG VS2	428,95
LBG VS1	625,68
LBG VS2	497,92

Som vist i figur 10 er det metanol som skiller seg ut med betydelig lavere globalt oppvarmingspotensial. Det er en liten differanse mellom CBG og LBG, men som beskrevet i delkapittel 7.6 har likvifisering av biogass et høyt globalt oppvarmingspotensial sammenlignet med komprimering av biogass. Dette gjør at LBG totalt vil ha det høyeste globale oppvarmingspotensialet.





Figur 10: Globalt oppvarmingspotensial per kg slam for produksjon av metanol, komprimert og flytende biogass. Komprimert biogass blir omtalt som CBG, og flytende biogass omtales som LBG. Verdiene er avhengige av andel organisk materiell i tørrstoffet, hvor VS1 har en andel på 83% og VS2 har en andel på 65,5%.

---

## 9 Konklusjon

Landbasert oppdrett og utnyttelse av avfallet er i en relativ tidlig fase, og det er lite eksakt data å hente. Dette resulterer i noe usikkerhet knyttet til prosjektet. Det vil derfor kunne være nødvendig å gjøre tilsvarende analyse når en har mer sikker data fra flere pilotanlegg.

I dette prosjektet er det blitt utført analyser av produksjonen til råbiogass, oppgradert biogass og biometanol basert på slam fra lakseoppdrett. Resultatene viste at det er mulig å produsere biogass og biometanol som en bærekraftig utnyttelse av fiskeslam.

Resultatene for potensiell energimengde viste at energitettheten til oppgradert biogass og biometanol er sammenlignbar. Dette viser potensialet for begge prosessene, men det er noen utfordringer knyttet til energiproduksjon. Basert på lite eksakt data resulterer det i usikre og lave virkningsgrader. Dette viste en lavere produsert energimengde for biometanol sammenlignet med oppgradert biogass.

I analysene ble det antatt et lagringsbehov basert på månedlig produksjon. I dette prosjektet er det utført analyser av biometanol, komprimert- og flytende biogass. Resultatene viste at biometanol har det desidert laveste lagringsbehovet av disse prosessene. Dette viser at prosessen til biometanol kan være en alternativ løsning for anlegg der det ikke er mulighet for å utnytte biogass lokalt.

Klimamålene i Norge fremhever hvor viktig det er å ta vare på kloden og bidra til det grønne skiftet. Basert på dette ble det utført en livssyklusanalyse for produksjonen til råbiogass, oppgradert biogass og biometanol. Dette viste at det globale oppvarmingspotensialet for prosessen til biometanol har en lavere verdi sammenlignet med prosessen for oppgradering av biogass.

Resultatene har vist at det kan være behov for begge prosessene. Hva som er den beste løsningen avhenger av forbruker og industrien i nærmiljøet.

---

## Videre arbeid

Prosjektrapporten har lagt et grunnlag for videre arbeid knyttet til biogassproduksjon og biometanolproduksjon basert på slam fra landbasert lakseoppdrett. Potensialet til metanolproduksjon burde også blitt undersøkt med tilført hydrogen i syntesegassen. Her kan det være interessant å se på oksygenforbruket til Salmon Evolution sammenlignet med hvor mye oksygen som blir produsert gjennom hydrogenproduksjonen. For livssyklusanalysen kan det være nyttig å sammenligne resultatene med scenarioer hvor slammet ikke blir benyttet til energiproduksjon. Dette kan være med å belyse hvor bærekraftig biogass- og biometanolproduksjon er i forhold til annet bruk av fiskeslam.

---

## Referanseliste

- [1] Andreas Falinski. «Bærekraftig biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert lakseoppdrett». I: (2022).
- [2] Bård Misud (Universitetet i Stavanger). *Fiskeoppdrett, Framtidsutsikter i Norge*. URL: <https://snl.no/fiskeoppdrett> (sjekket 10.11.2022).
- [3] Isabelle Kliger. *Derfor er landbasert fiskeoppdrett et mer bærekraftig alternativ*. URL: [https://www.linde-gas.no/no/news\\_ren/linde\\_stories/why-land-based-fish-farming-is-the-most-sustainable-option.html](https://www.linde-gas.no/no/news_ren/linde_stories/why-land-based-fish-farming-is-the-most-sustainable-option.html) (sjekket 10.11.2022).
- [4] Salmon Evolution. *Bilde til innledning*. URL: <https://salmevolution.no/salmon-evolution-launches-north-america-expansion-and-increases-long-term-production-target-to-100000-tonnes/> (sjekket 10.11.2022).
- [5] Havforskningsinstituttet. *Landbaserte oppdrettsanlegg/lukkede anlegg*. URL: <https://www.hi.no/hi/temasider/akvakultur/landbaserte-oppdrettsanlegg-lukkede-anlegg> (sjekket 21.11.2022).
- [6] Fagansvarlig for ordforklaringer samfunn Andreas Tjernshaugen SNL. *Hva er Bærekraft*. URL: <https://snl.no/b%C3%A6rekraft> (sjekket 16.09.2022).
- [7] United Nations Association of Norway FN-Sambandet. *Bærekraftig utvikling*. URL: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling> (sjekket 16.09.2022).
- [8] Regjeringen.no. *Nytt norsk klimamål på minst 55 prosent*. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/nytt-norsk-klimamal-pa-minst-55-prosent/id2944876/> (sjekket 22.11.2022).
- [9] Miljødirektoratet. *Fakta om biogass*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energitiltak/fornybar-energi/utrede-potensialet-for-biogass/hva-er-biogass/> (sjekket 21.11.2022).
- [10] Miljødirektoratet. *Metan fra husdyr og lystgass fra gjødsel*. URL: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/klimagassutslipp-fra-jordbruk> (sjekket 23.11.2022).
- [11] Miljødirektoratet. *Sirkulær Økonomi*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/avfall/sirkular-okonomi/> (sjekket 25.11.2022).
- [12] Anette Tjomsland Spilling. *Husdyrgjødsel + fiskeslam = biogass*. URL: <https://www.nibio.no/nyheter/husdyrgjodsel-fiskeslam--biogass> (sjekket 25.11.2022).
- [13] NIBIO. *Fiskeslam*. URL: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/fiskeslam> (sjekket 10.11.2022).

- 
- [14] J. Morken. T. Briseid. J. Hovland. K-A. Lyng og I. Kvande. «Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift.» I: (2018), s. 6–8.
- [15] H. Karne. U. Mahajan. U. Ketkar. A. Kohade. P. Khadilkar og A. Mishra. «A review on biogas upgradation systems». I: (2022), s. 4.
- [16] Jon Hovland og Kari-Anne Lyng og Ingvar Kvande John Morken Tormod Briseid. «Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift. - Revidert utgave». I: (2018), s. 20.
- [17] J. Morken. T. Briseid. J. Hovland. K-A. Lyng og I. Kvande. «Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift.» I: (2018), s. 19.
- [18] NIBIO. *Fosfor*. URL: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/fosfor> (sjekket 21.11.2022).
- [19] Shashwata Ghosh. Vikram Uday. Abhijay Giri. Seethamraju Srinivas. «Biogas to methanol: A comparison of conversion processes involving direct carbon dioxide hydrogenation and via reverse water gas shift reaction». I: (2019).
- [20] M. Mergenthal. A. Tawai. S.Amornraksa et al. «Methane enrichment for biogas purification using pressure swing adsorption techniques». I: (2022), s. 3.
- [21] Bjørn Pedersen (Universitetet i Oslo). *Katalysator*. URL: <https://snl.no/katalysator> (sjekket 11.11.2022).
- [22] Norsk Fjernvarme. *CHP - Kraftvarme*. URL: <https://www.fjernvarme.no/fakta/chp-kraftvarme> (sjekket 18.10.2022).
- [23] Clarke Energy. *CHP efficiency for biogas*. URL: <https://www.clarke-energy.com/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/> (sjekket 25.11.2022).
- [24] Anthony Rauseo og Jin-Yun Wang Mohammad Farooque Anthony Leo. «Efficient and ultra-clean use of biogas in the fuel cell - the DFC experience». I: (2015).
- [25] Interface Science og Technology. «Direct Methanol Fuel Cell». I: (2011), s. 1–3.
- [26] Finn Tore Holmeset Ann Rigmor Nerheim Vilmar Æsøy. «Hydrogen- og ammoniakkdrift av fartøy». I: (2022), s. 6.
- [27] Geir O. Fiskaa Arthur Sarsten. *Forbrenningsmotor*. URL: <https://snl.no/forbrenningsmotor> (sjekket 25.11.2022).
- [28] Yang Wang Xudong Zhen. «An overview of methanol as an internal combustion engine fuel». I: (2015).

- 
- [29] Andreas Falinski. «Bærekraftig biogassproduksjon basert på avfall fra landbasert lakseoppdrett». I: (2022), s. 12.
- [30] Glocal Green. *Stort marked*. URL: <https://glocalgreen.com/stort-marked/> (sjekket 18.10.2022).
- [31] Glocal Green. *Svært effektiv energibærer*. URL: <https://glocalgreen.com/svaert-effektiv-energibaerer/> (sjekket 18.10.2022).
- [32] Tore Krogstad Eva Brod Trond Knapp Haraldsen. «Fiskeslam som nitrogengjødsel». I: (2016).
- [33] Knut Hofstad. *Hydrogenlagring*. URL: <https://snl.no/hydrogenlagring> (sjekket 28.11.2022).
- [34] Knut Hofstad. *Ammoniakk (energibærer)*. URL: [https://snl.no/ammoniakk-\\_energib%C3%A6rer](https://snl.no/ammoniakk-_energib%C3%A6rer) (sjekket 28.11.2022).
- [35] J. Cabell og J. Morken og S. Saxegård A. E. Stensgård I. Kvande. «Følgeforskning Sterner sitt anlegg på Smøla settefisk - masse - og energibalanser, økonomi og klimanytte». I: (2018).
- [36] Dag Nikolai Ryste. Møte 28.09.2022.
- [37] Sigmund Grønmo. *Kvantitativ metode*. URL: [https://snl.no/kvantitativ\\_metode](https://snl.no/kvantitativ_metode) (sjekket 18.10.2022).
- [38] Sigmund Grønmo. *Kvalitativ metode*. URL: [https://snl.no/kvalitativ\\_metode](https://snl.no/kvalitativ_metode) (sjekket 18.10.2022).
- [39] J. Cebbel og O. Ween R. Gebauer. «Biogassproduksjon fra settefiskeslam i sentraliserte og desentraliserte biogassanlegg». I: (2016).
- [40] H. Karoliussen og T. Hennem. «Fornybar energi grunnkurs - Bioenergi». I: (2019), s. 36.
- [41] Lawrence Gahan Allan Blackman. «Aylward and Findlay's SI chemical data/ Allan Blackman; Lawrence Gahan. 7th edition». I: (2013), s. 106.
- [42] Carnegie Mellon University. *Sample Molecular Weight Calculation*. URL: <https://www.cmu.edu/gelfand/lgc-educational-media/polymers/what-is-polymer/molecular-weight-calculation.html> (sjekket 09.11.2022).
- [43] Simon Saxegård og Erik Svanes og Hanne Lerche Raadal Andreas Brekke Ellen Soldal. «Klimavirkninger av ikke-skogbasert bioenergi». I: (2017), s. 6–7.
- [44] Christian Hulteberg og Åke Nordberg Elham Ahmadi Moghaddam Serina Ahlgren. «Energy balance and global warming potential of biogas-based fuels from a life cycle perspective». I: (2015).
-

- 
- [45] Inge Hoemsnes. Møte 13.09.2022.
- [46] Lars Egil Helseth Helmer Fjellvåg Martin Ystnes. *Ideal gass*. URL: <https://snl.no/ideal.gass> (sjekket 15.11.2022).

