



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi
Odd Ivar Lekang

Evaluering av desentralisert energigjenvinning av slam fra oppdrettsanlegg

Evaluation of decentralized energy recovery from
aquaculture sludge

Einar M. Berg

Prosess- og energiteknikk
Fakultet for realfag og teknologi

Stig Larsen

Prosess- og energiteknikk
Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne rapporten er utarbeidet av Einar Berg og Stig Larsen som avsluttende masteroppgave på studiet Prosess- og energiteknikk ved NMBU. Rapporten bygger i hovedsak på innsamling av tilgjengelig litteratur i tillegg til forfatterne egne beregninger og analyser.

Forfatterne ønsker særlig å takke veileder Odd Ivar Lekang for viktige faglige bidrag og god støtte til gjennomføring av oppgaven. Videre skal Ola Sørby Omberg ha takk for veiledning og korrektur. Vi ønsker også å takke Øyvind Thorsen ved Sterner og Lars Rohold ved Scanship for sine bidrag. Takk til Petter Heyerdahl for lån av laboratorieutstyr.

Einar Berg

Stig Larsen

Sammendrag

Fiskeoppdrett er en bransje i vekst som følge av en global etterspørsel etter fett og proteiner. Laks dominerer den norske oppdrettsnæringen, og salget av laks har doblet seg fra 2012 til 2016. Laksen produseres i landbaserte settefiskanlegg før den overføres til merder i sjøen. Ved settefiskanlegg produseres slam. Slam består av fekalier og uspist fôr og inneholder næringsstoffer som fosfor og nitrogen. Disse næringsstoffene kan benyttes som gjødsel og de kan føre til eutrofiering om slammet slippes ut i vannmiljø.

Målsetningen til denne oppgaven er å evaluere potensialet til lokal forbrenning av fiskeslam som en egnet avhendingsmetode. Potensialet blir vurdert på brennverdi, masse og energistrømmer, energigjenvinning, teknologiske løsninger og gjenbruk av aske. Forbrenning blir så sammenlignet med nøkkelparametere fra gjødsel- og biogassproduksjon.

Som en del av oppgaven ble øvre brennverdien til fiskeslam bestemt til 18.5 MJ/kg ved hjelp av bombekalorimeter. Brennverdien ble brukt for å utarbeide et forslag til en forbrenningsprosess som demonstrerer at fiskeslam har potensiale som biobrensel for lokal varmeproduksjon. Videre er det også kartlagt teknologi som uten store inngrep burde kunne benyttes til forbrenning av fiskeslam.

Avhending av restproduktet fra forbrenningen, asken, ser ut til å være det største problemet knyttet til forbrenning av fiskeslam. Askemengde er estimert til å utgjøre 20 % av tørrstoffet til det forbrente slammet, og den kan trolig ikke brukes ubehandlet som gjødsel på grunn av tungmetallinnhold. Videre analyser på asken fra forbrenning av fiskeslam er foreslått for å bestemme fosforinnhold og tungmetallinnhold i ulike askefraksjoner. Dette vil kunne vise om fosforinnholdet i asken kan gjenvinnes ved separering av flygeasken.

Lokal forbrenning av fiskeslam med energigjenvinning vurderes som en behandlingsmetode som er verdt å undersøke nærmere. Energigjenvinningen bør kunne redusere oppdrettsanleggets energiforbruk for oppvarming. Volumet på produktstrømmer fra forbrenning små, som begrenser kostnadene ved etterfølgende lagring og transport. Forbrenning med energigjenvinning kan derfor være aktuelt dersom det ikke finnes andre lokale disponeringsmuligheter.

Abstract

Salmon is the predominant species in Norwegian fish farming, and salmon sales have doubled from 2012 to 2016. Salmon are hatched and grown in land-based farms, before they are transferred to sea-cages. Sludge is produced in the land-based hatcheries and farms. The sludge consists of fecal matter and uneaten fish food, and contains nutrients like nitrogen and phosphorus. The sludge can therefore be utilized as a fertilizer, and will lead to eutrophication if released to water bodies.

The purpose of this report is to evaluate local incineration as a treatment method for fish sludge. The process is evaluated by considering the net calorific value of the sludge, the volume and application of the biproducts, the potential for heat generation, and available technology. Production of fertilizer and biogas are the prevailing methods of disposal for fish sludge, and the incineration process is therefore compared to these, weighting key parameters.

The calorific value of fish sludge from “Senter for fiskeforsøk” was determined. An analysis using a calorimeter showed a calorific value of 18,5MJ/kg. This value is used to develop a proposed incineration and heat recovery process. The process demonstrates the potential for fish sludge to be used as biofuel in decentralized incineration with heat recovery. Available technology for use in the process is described in the report.

The disposal of ash from the incineration process is problematic. Ash is estimated to constitute 20% of the mass of the incinerated sludge, and unprocessed ash will likely not be eligible for agricultural use, due to high concentrations of heavy metals. Further studies of the ash is recommended to establish the phosphorus and heavy metal concentration in the different fractions of ash. Such studies could determine if the phosphorus is recoverable by separating bottom ash from fly ash.

Local incineration of fish sludge seems to warrant further study. Recovery of heat from the incineration should reduce the fish farms energy consumption for the purpose of heating. The reduction of solid mass resulting from the incineration will ease the storage and transportation. Incineration might therefore be attractive, especially if other possibilities of disposal does not exist.

Innholdsfortegnelse

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUKSJON..... | 1 |
| 1.1 | OPPGAVEN | 2 |
| 1.1.1 | <i>Problemstilling.....</i> | 2 |
| 1.1.2 | <i>Delmål</i> | 2 |
| 1.1.3 | <i>Avgrensninger.....</i> | 3 |
| 2 | TEORI..... | 4 |
| 2.1 | FISKEOPPDRETT..... | 4 |
| 2.1.1 | <i>Smolt-/settefiskproduksjon</i> | 5 |
| 2.1.2 | <i>Matfiskproduksjon.....</i> | 6 |
| 2.1.3 | <i>Miljøhensyn ved fiskeoppdrett.....</i> | 7 |
| 2.2 | FISKESLAM | 8 |
| 2.2.1 | <i>Avhendingsproblematikk og regulering av fiskeslam</i> | 8 |
| 2.2.2 | <i>Gjenvinningspotensialet i fiskeslam</i> | 11 |
| 2.2.3 | <i>Dagens bruksområder for fiskeslam</i> | 11 |
| 2.3 | FORBRENNING MED ENERGIGJENVINNING..... | 18 |
| 2.3.1 | <i>Brennverdi.....</i> | 18 |
| 2.3.2 | <i>Støkiometri.....</i> | 19 |
| 2.3.3 | <i>Flammetemperatur.....</i> | 21 |
| 2.3.4 | <i>Røygass og aske.....</i> | 22 |
| 2.3.5 | <i>Forbrenningsteknologi.....</i> | 23 |
| 2.3.6 | <i>Slambehandling.....</i> | 29 |
| 3 | PRAKTISK DEL MED ANALYSER OG BEREGNINGER..... | 36 |
| 3.1 | BASISANLEGG | 36 |
| 3.2 | FORBRENNING..... | 38 |
| 3.2.1 | <i>Forslag til forbrenningsprosess.....</i> | 39 |
| 3.2.2 | <i>Analyse med bombekalorimeter</i> | 40 |
| 3.2.3 | <i>Effektiv brennverdi.....</i> | 44 |
| 3.2.4 | <i>Adiabatisk Flammetemperatur.....</i> | 45 |
| 3.2.5 | <i>Estimering av tungmetallinnhold i aske.....</i> | 46 |
| 3.2.6 | <i>Oppsummering av resultater fra analysen</i> | 47 |
| 3.2.7 | <i>Massebalanse.....</i> | 48 |
| 3.2.8 | <i>Energibalanse.....</i> | 51 |
| 3.2.9 | <i>Oppsummering av resultater fra masse- og energibalanse</i> | 58 |
| 3.3 | BIOGASS..... | 60 |
| 3.4 | UBEHANDLET SLAM TIL GJØDSELBRUK | 62 |
| 3.5 | TØRKET SLAM..... | 63 |
| 3.6 | SAMMENLIGNING | 65 |
| 4 | DISKUSJON | 67 |
| 5 | KONKLUSJON..... | 69 |
| 6 | VIDERE ARBEID..... | 70 |
| | REFERANSER..... | 71 |

Tabelliste

| | |
|--|----|
| TABELL 1 GRENSEVERDIER FOR KVALITETSKLASSE FOR ORGANISK GJØDSEL PÅ BAKGRUNN AV TUNGMETALLINNHOOLD [30] | 9 |
| TABELL 2 KVALITETSKLASSE OG RESTRIKSJONER FOR BRUK AV ORGANISK GJØDSEL [30] | 10 |
| TABELL 3 MINSTE OG STØRSTE MÅLING AV NÆRINGSINNHOOLD I SLAM, MÅLT I % AV TØRRSTOFF. MÅLINGENE ER GJORT PÅ SAMME ANLEGG OVER 9 MÅNEDER AV EUROFINS [38] | 12 |
| TABELL 4 RESULTATER FRA ANALYSER FOR Å BESTEMME INNHOOLD AV TUNGMETALLER I FISKESLAM | 13 |
| TABELL 5 ANALYSE AV INNHOOLD AV ORGANISK MATERIALE I HUSDYRGJØDSEL OG FISKESLAM UTFØRT AV NOFIMA [39] | 14 |
| TABELL 6 RESULTATER FRA BIOGASSFORSØK MED OG UTEN INNBLANDING AV FISKESLAM | 15 |
| TABELL 7 INNHOOLD AV NÆRINGSSTOFFER OG TUNGMETALLER I BIOREST [40] | 16 |
| TABELL 8 STØKIOMETRISK SAMMENSETNINGENE FOR FISKESLAMMET | 20 |
| TABELL 9 REAKTANTER OG PRODUKTER FOR FORBRENNINGSREAKSJONENE | 20 |
| TABELL 10 BALANSERT FORBRENNING AV 1 KG SLAM | 20 |
| TABELL 11 KONSTANTENE BRUKT FOR BEREGNING AV $C_{p,i}(T)$ | 21 |
| TABELL 12 FORDELING AV ASKE UNDER FORBRENNING AV BIOMASSE PÅ RISTOVN ELLER UNDERMATET STOKER, MED UNNTAK AV STRÅ OG KORN SOM FYRET I «CIGAR BURNER» [54] | 22 |
| TABELL 13 UTDRAG FRA TABELL OM FORDELING AV TUNGMETALLER. TALLENE ER GJENNOMSNIITT AV 10 PRØVER FORBRENT I RISTOVN OG UNDERMATET STOKER. BIOMASSE ER FLIS OG BARK FRA GRAN. TABELLEN ER HENTET FRA «THE HANDBOOK OF BIOMASS COMBUSTION AND CO-FIRING» [54] | 23 |
| TABELL 14 BEREGNEDE VERDIER FOR ÅRLIG SLAMPRODUKSJON I ANLEGGET VED 100% TS | 36 |
| TABELL 15 DATA FOR RAS-ANLEGG | 37 |
| TABELL 16 MÅLTE OG BEREGNEDE VERDIER VED ANTENNING AV REFERANSESTOFF | 42 |
| TABELL 17 BEREGNEDE VERDIER FOR FISKESLAMMETS ØVRE BRENNVERDI OG ASKEANDEL | 43 |
| TABELL 18 NEDRE BRENNVERDI FOR FISKESLAM SAMMENLIGNET MED ULIKE BRENSLER [83] | 44 |
| TABELL 19 BEREGNET TUNGMETALLKONSENTRASJON I ASKEN ETTER FORBRENNING AV FISKESLAM. KONSENTRASJONENE ER ESTIMERT PÅ BAKGRUNN AV EN TØRRSTOFFREDUKSJON PÅ 80 % VED FORBRENNING. KONSENTRASJONENE ER BEREGNET MED UTGANGSPUNKT I TABELL 4 | 46 |
| TABELL 20 RESULTATER FRA FORBRENNING AV FISKESLAM | 47 |
| TABELL 21 BEREGNEDE VERDIENE FOR MASSEBALANSEN GJENNOM TØRKE | 49 |
| TABELL 22 BEREGNEDE VERDIER FOR MENGDER INN I FYRINGSENHETEN | 50 |
| TABELL 23 BEREGNENDE VERDIER FOR MENGDE UT AV FYRINGSENHET | 50 |
| TABELL 24 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV INNFYRT EFFEKT | 51 |
| TABELL 25 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV EFFEKTBEHOVET I TØRKE | 52 |
| TABELL 26 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV STRÅLINGSTAP | 52 |
| TABELL 27 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV KONVEKSJONSTAP | 53 |
| TABELL 28 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV ASKETAP | 53 |
| TABELL 29 VERDIER OG RESULTAT FOR BEREGNING AV SLAMTAP | 54 |
| TABELL 30 RESULTATENE FRA BEREGNING AV TAPENE I FYRINGSANLEGGET | 54 |
| TABELL 31 VERDIER OG RESULTAT VED BEREGNING AV GJENVUNNET VARMET UTEN KONDENSERING AV VÅT RØYKGASS | 55 |
| TABELL 32 VERDIER OG RESULTAT VED BEREGNING AV TERMISK VIRKNINGSGRAD AV FØLBAR VARME | 56 |
| TABELL 33 VERDIER OG RESULTAT VED BEREGNING AV GJENVUNNET VARME VED KONDENSERING AV VÅT RØYKGASS | 56 |
| TABELL 34 VERDIER OG RESULTAT VED BEREGNING AV TERMISK VIRKNINGSGRAD AV FØLBAR VARME | 57 |
| TABELL 35 OPPSUMMERING AV RESULTATER FRA ENERGIBALANSEN | 58 |
| TABELL 36 TEMPERATUR I BRENNZONE OG ETTER TØRKE MED TAP | 58 |
| TABELL 37 ESTIMERTE VERDIER FOR TUNGMETALLER I BIOREST | 61 |
| TABELL 38 VERDIER OG RESULTATER FRA BEREGNINGER OM BIOGASSPRODUKSJON | 61 |
| TABELL 39 VERDIER OG RESULTATER FRA BEREGNINGER OM UBEHANDLET SLAM | 62 |
| TABELL 40 VERDIER OG RESULTATER FRA BEREGNINGER FOR TØR KING AV SLAM FRA 25 % TIL 90 % TØRRSTOFF | 64 |

| | |
|---|----|
| TABELL 41 NØKKELPARAMETERE MED BEREGNEDE OG ESTIMERTE VERDIER FOR BEHANDLINGSMETODENE VURDERT I OPPGAVEN..... | 65 |
|---|----|

Figurliste

| | |
|---|----|
| FIGUR 1 EKSEMPEL PÅ SMOLTPRODUKSJONSANLEGG [1]..... | 5 |
| FIGUR 2 PRINSIPPSKISSE FOR GJENNOMSTRØMNINGSANLEGG [15] | 5 |
| FIGUR 3 PRINSIPPSKISSE FOR RESIRKULERINGSANLEGG [15] | 6 |
| FIGUR 4 BILDE AV EN MERD [2] | 6 |
| FIGUR 5 ULIKE FORMER FOR UTSLIPP KAN KOMME FRA ANLEGGENE [3] | 7 |
| FIGUR 6 INNMATING I RISTOVN OG LUFTFORDELING | 25 |
| FIGUR 7 TERMISK VIRKNINGSGRAD SOM EN FUNKSJON AV OKSYGENINNHOLD I RØYKGASSEN. FUNKSJONEN ER BEREGNET VED EN RØYKGASSTEMPERATUR PÅ 165 °C, O ₂ INNHOLD ER PÅ TØRR BASIS, FLIS OG BARK MED ØVRE BRENNVERDI PÅ 20.3 MJ/KG OG TS INNHOLD PÅ 55 M% FORBRENNES. VIRKNINGSGRAD BEREGNET MED EFFEKTIV BRENNVERDI. FIGUREN ER HENTET FRA «THE HANDBOOK OF BIOMASS COMBUSTION AND CO-FIRING» [54]..... | 26 |
| FIGUR 8 VIRKNINGSGRADEN TIL ET FORBRENNINGSANLEGG VIST SOM EN FUNKSJON AV RØYKGASSTEMPERATUREN. FIGUREN ER BEREGNET FRA FORBRENNING AV TREFLIS OG BARK MED EN ØVRE BRENNVERDI PÅ 20 MJ/KG, MED ET OKSYGENINNHOLD PÅ 9.5 VOLUMPROSENT I RØYKGASSEN. VIRKNINGSGRADEN BEREGNET MED EFFEKTIV BRENNVERDI. FIGUREN ER HENTET FRA «THE HANDBOOK OF BIOMASS COMBUSTION AND CO-FIRING» [54]..... | 27 |
| FIGUR 9 SYSTEM FOR GJENVINNING FOR LATENT VARME [54]..... | 28 |
| FIGUR 10 VIRKEMÅTE OG SKISSE AV ET TROMMELFILTER [72]..... | 29 |
| FIGUR 11 BELTEFILTER [9]..... | 30 |
| FIGUR 12 DEKANTERSENTRIFUGE [23] | 31 |
| FIGUR 13 SILBÅNDPRESSE [74]..... | 31 |
| FIGUR 14 KASKADE TØRKER [27] | 32 |
| FIGUR 15 FLASH TØRKER [27] | 33 |
| FIGUR 16 BELTETØRKE [29]..... | 33 |
| FIGUR 17 OVERSIKT AVVANNINGSMETODER MHT. TØRRSTOFFINNHOLD | 34 |
| FIGUR 18 STERNER MAT - PROCESS, KOMPAKTANLEGG FOR TØR KING AV FISKESLAM [81]..... | 35 |
| FIGUR 19 BIORETUR FRS-E, KOMPAKTANLEGG FOR PRODUKSJON AV BIOGASS [75]..... | 35 |
| FIGUR 20 METODIKK FOR BEREGNINGER, ANALYSER OG SAMMENLIGNINGER I KAPITTEL 3 | 38 |
| FIGUR 21 BLOKKSJEMA OVER FORBRENNINGSPROSESSEN..... | 39 |
| FIGUR 22 SKISSE AV BOMBOKALORIMETER OG INSTRUMENTER FOR Å BESTEMME BRENNVERDI TIL FISKESLAM..... | 40 |
| FIGUR 23 EFFEKTIV BRENNVERDI SOM FUNKSJON AV TØRRSTOFF FOR FISKESLAM..... | 44 |
| FIGUR 24 GRAFISK FREMSTILLING AV ADIABATISK FLAMMETEMPERATUR SOM FUNKSJON AV TØRRSTOFFINNHOLD OG VIST MED TRE FORSKJELLIGE STØKIOMETRISKE OVERSKUDD AV LUFT..... | 45 |
| FIGUR 25 SLAM TIL TØRKE..... | 48 |
| FIGUR 26 MASSEBALANSE OVER TØRKE | 49 |
| FIGUR 27 MASSEBALANSEN I FYRENGSENHET..... | 50 |
| FIGUR 28 OPPSUMMERING MASSE- OG ENERGIBALANSE MED TILHØRENDE TEMPERATURER | 59 |
| FIGUR 29 FORHOLD MELLOM AVSTAND OG TRANSPORTKOSTNAD..... | 66 |

1 Introduksjon

Fiskeoppdrett er en raskt voksende industri i Norge. Fra 2012 til 2016 har inntekten fra eksport av fisk, krepsdyr og bløtdyr økt med omkring 75 %, mens inntekt eksport av laks har i samme periode doblet seg [4]. I 2017 ble det eksportert Fisk, krepsdyr, bløtdyr til en verdi av 92 milliarder kroner [5]. Salg av laks står for mesteparten av inntekten, og det ble eksportert laks for 64 milliarder kroner i 2017 [4]. Mesteparten av laksen blir avlet opp i oppdrettsanlegg. Disse anleggene produserte i 1326 milliarder tonn med fisk og skalldyr, hvorav laks står for 93 % [6].

Oppdrettsfisken avles opp på landbaserte settefiskanlegg. Stadig flere av de norske settefiskanlegg pålegges å etablere løsninger for å filtrere ut partikler fra avløpsvannet [7]. Utslipp fra anleggene kan føre til eutrofiering av vannmiljø og overføre sykdom til villfisk om det slippes ut i nærområdet [8]. Partiklene består av spillfôr og fekalier fra fisken, og kalles slam. Behandling og avhending av slam representerer allerede en stor utfordring for settefisknæringen [7], og problemet vil trolig bli større som følge av utvikling og vekst i fiskeoppdrettet [9]. Slammet har lavt tørrstoff og må oppkonsentreres før avhending. Mulighetene for avhending av slammet er begrensende. Kostnads- og energieffektive løsninger er derfor ettertraktet for å gjøre oppkonsentrering og bruk av fiskeslam praktisk og økonomisk.

Slammet har potensial for gjenbruk av næringssalter og energi, som i dag hovedsakelig utnyttes til gjødsel og biogassproduksjon. Gjødsel og biogassproduksjon er godt beskrevet i litteraturen, og flere analyser er gjort for å undersøke potensialet til fiskeslam. Forbrenning er en gjenvinningsmetode som er mye brukt for avløpsslam og avfall. Ved forbrenning utnyttes energien i slammet til å produsere varme eller strøm. Det er gjort lite forskning på potensialet til gjenvinning av næringssalter og energi ved lokal forbrenning.

1.1 Oppgaven

Denne rapporten vurderer lokal forbrenning av fiskeslam ved oppdrettsanlegget som avhendingsmetode for fiskeslam. Den ser på den teoretiske og praktiske gjennomføringen av lokal forbrenning med gjenvinning av energi. Deretter sammenlignes løsningen med de mest aktuelle alternative behandlingsmetodene. For å danne et sammenligningsgrunnlag er de eksisterende behandlingsmetodene undersøkt og beskrevet.

1.1.1 Problemstilling

Hvordan er lokal forbrenning med energigjenvinning egnet som behandlingsmetode for slam fra settefiskproduksjon?

1.1.2 Delmål

Litteraturstudie:

- i. Presentere de mest aktuelle metodene for håndtering av slam og utfordringer knyttet til avhending.
- ii. Kartlegge tekniske løsninger og innretninger som kan brukes for forbrenning av slam
- iii. Evaluere mulighetene for gjenvinning og nye produktstrømmer fra fiskeslam
- iv. Bestemme forbrenningsstøkiometri basert på sammensetning av fiskeslam ved hjelp av en litteraturanalyse.

Praktisk del med analyser og beregninger:

1. Estimere slam-mengde produsert fra et tenkt settefiskanlegg(basisanlegg) som må behandles. (Grunnlaget for sammenligning av ulike behandlingsmetodene forbrenning, biogassproduksjon og gjødsel. Alle skal behandle samme mengde slam.)
2. Utarbeide et forslag for en egnet forbrenningsprosess som behandler slammengden fra basisanlegget
3. Bestemme øvre brennverdi med bombekalorimeter, og derifra beregne effektiv brennverdi samt flammtemperatur ved forbrenning
4. Analyser masse- og energibalanse av prosessen for å bestemme virkningsgrad for forbrenningsprosessen og produsert askemengde
5. Estimere sammensetning og redegjør aktuelle bruksområder for restproduktet - aske.
6. Identifisere kritiske parametere og utfør en beregning av disse for de mest aktuelle alternative ved behandling av slam fra basisanlegget
7. Sammenligne behandlingsmetodene på grunnlag av beregningene.

1.1.3 Avgrensninger

Det er gjort noen avgrensninger i oppgaven. Tidsrammen la begrensninger for oppgavens omfang. Noen av disse punktene kan ha påvirkning på slutninger i oppgaven, og burde undersøkes nærmere ved videre arbeid. Avgrensninger er som følgende:

- Investerings- og driftskostnader vurderes ikke i oppgaven
- Utslipp fra røykgass omfattes ikke av oppgaven. Alle nitrogenforbindelser i røykgassen antas å være N_2
- Analyser av fiskeslam og dens biprodukter blir ikke gjort, alle verdier er hentet fra litteratur
- Beregning av virkningsgrader er gjort ved ideelle forhold, hvilket innebærer tapsfri varmeoverføring i forbrenningsprosessen
- Det foretas ikke valg av komponenter for avvanning og forbrenningsprosess
- Oppgaven omfatter ikke sentralisert forbrenning
- Forbrenningsprosessen modelleres ikke

2 Teori

Her presenteres resultatet fra litteraturstudiet gjort for rapporten. I kapittel 2.1 forklares fiskeoppdretten i korte trekk. Kapittel 2.2 dreier seg om slammet fiskeoppdretten produserer, hvordan det behandles og hvor man avsetter produktet fra behandlingen. Videre gis en innføring i forbrenningsteori i kapittel 2.3.

2.1 Fiskeoppdrett

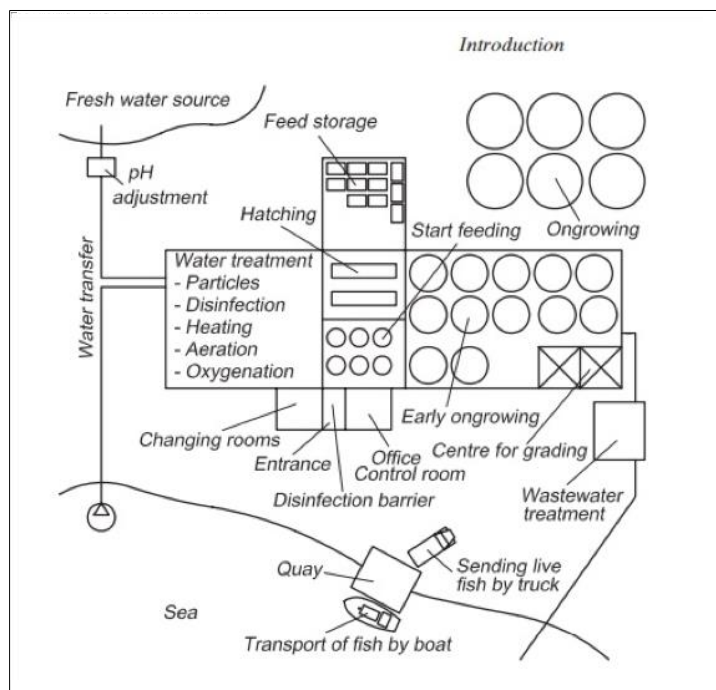
Oppdrettsprosessen starter i klekkeriet der rognen klekkes. For laks og ørret, de dominerende artene i norsk oppdrett, skjer dette i ferskvann. Laks og ørret er anadrome arter. Dette betyr at de gyter og klekkes i ferskvann før de emigrerer til havet. Prosessen å gå fra å være ferskvannsfisk til saltvannsfisk kalles smoltifisering, og fisken som har gjennomgått denne prosessen kalles smolt eller settefisk. Før smoltifisering er ikke fisken i stand til å overleve i saltvann. Etter smoltifisering må oppdrettsfisk flyttes til saltvannsanlegg. Det er derfor hensiktsmessig å dele oppdrettsprosessen i to; Smolt-settefiskproduksjon og matfiskproduksjon.

Det er i dag antallsbegrensning på nye konsesjoner til matfisk i sjøvann. Det innebærer at det er politisk valg når nye konsesjoner skal gis. Ordningen er innført for å beskytte miljø og marked da det er stor etterspørsel etter nye konsesjoner [10].

Det er derimot oppfordret til å søke om tillatelser til oppdrett på land ved bruk av landbaserte oppdrettsanlegg. Bruk av landbaserte anlegg fjerner risiko for lakselus, gir bedre miljøkontroll og fjerner risiko for rømning. Fiskeridepartementet har innført nye regler for landbasert oppdrett der tillatelser tildeles fortløpende uten vederlag [11]. Det begrunnes med å legge til rette for innovasjon og utvikling innen en bransje som er i vekst både i innland og utland. De nye reglene legger til rette for oppdrett av stor smolt, eller postsmolt. Postsmolt er fisk som er fôret opp til 1 kilo i motsetning til tradisjonell oppdrett som fôrer til omkring 100 gram før de overføres til merder i sjøen. Ved å holde fisken i landbaserte anlegg til den er nærmere slaktevekt reduseres risiko for fiskedød og rømning, noe som gir bedre økonomi og miljø.

2.1.1 Smolt-/settefiskproduksjon

Smoltproduksjon er en ferskvannspesess som omfatter fiskens liv fra befruktet rogn til og med smoltifisering. Smoltproduksjon i Norge skjer stort sett i lukkede anlegg på land[12], eksemplifisert i Figur 1. En typisk smoltproduksjon kjøper eller produserer befruktet rogn som klekkes til yngel i



Figur 1 Eksempel på smoltproduksjonsanlegg [1]

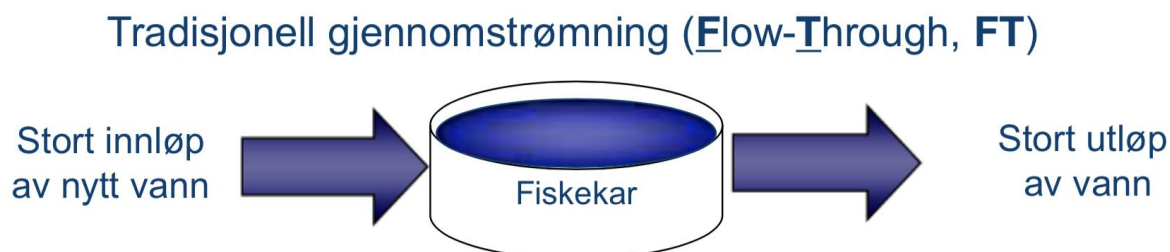
klekkerier. Fôringen av yngelen starter, og den overføres til gradvis større basseng ettersom den vokser.

Når yngelen har nådd en viss størrelse skjer smoltifiseringen. Fisken gjennomgår de fysiologiske forandringene som gjør den i stand til å overleve i saltvann. I moderne smoltproduksjon reguleres forholdene for å gjøre prosessen hurtigere enn i naturen. Ved å manipulere miljøet kan smoltifiseringen ta et halvt år etter startfôring av yngelen [13]. I naturen tar prosessen 1 til 4 år [13]. Ved gjennomført smoltifisering er fisken klar for å overføres til saltvannsanlegg. Normalt overføres fisken 16 til 17 måneder etter startfôring og smolten veier da 70-110 gram [13, 14]. Smoltproduksjon krever store mengder

vann. Høy vanngjennomstrømning sikrer godt oksygeninnhold og hindrer akkumulering av avfallsstoffer i vannet. Det høye vannbehovet gjør det nødvendig for slike anlegg å ligge i nærheten av en vannkilde. Her skiller vi på to typer anlegg; gjennomstrømningsanlegg og resirkulasjonsanlegg.

2.1.1.1 Gjennomstrømningsanlegg (Flow Through, FT)

I gjennomstrømningsanlegg brukes vannet én gang, og strømmer rett igjennom anlegget (Figur 2). Slike løsninger brukes der vanntilgangen ikke er en begrensende faktor. Dette er den billigste og sikreste typen anlegg fordi det krever lite prosessutstyr.

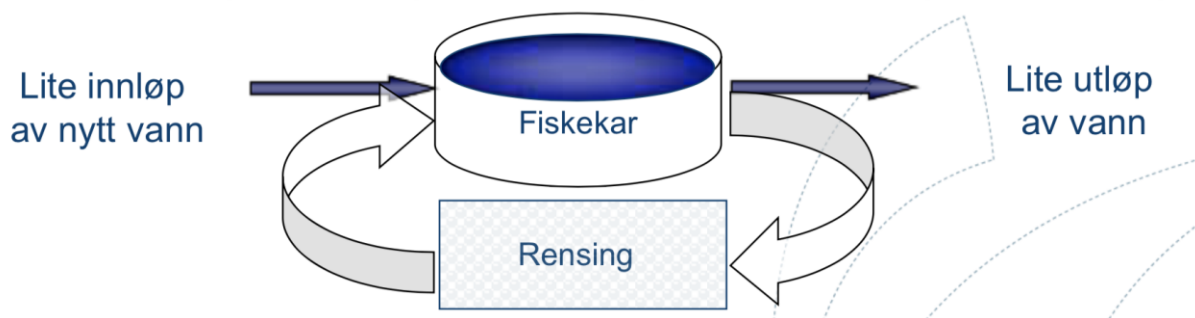


Figur 2 Prinsippkisse for gjennomstrømningsanlegg [15]

2.1.1.2 Resirkuleringsanlegg (Recirculating Aquaculture Systems, RAS)

Resirkuleringsanlegg er anlegg som renser deler av utløpet og bruker det om igjen som innløpsvann. Selv om slike anlegg krever høyere investering- og driftskostnader gir RAS-anlegg god kontroll over vannmiljøet og bruker mye mindre vann (<1 %) i forhold til FT [15].

Resirkulering av vann (Recirculating Aquaculture Systems, RAS)



Figur 3 Prinsippskisse for resirkuleringsanlegg [15]

2.1.2 Matfiskproduksjon



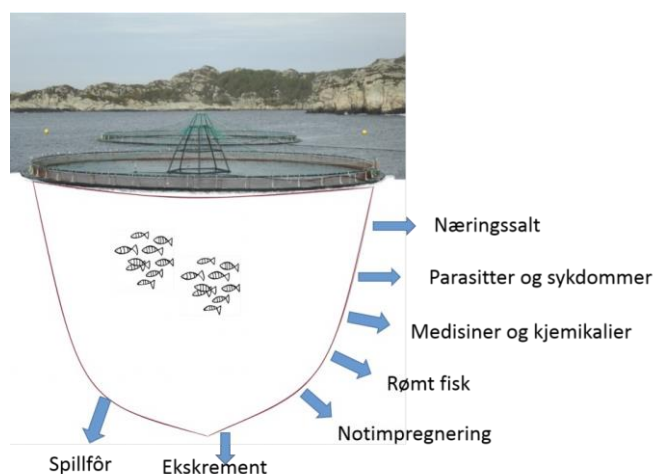
Figur 4 Bilde av en merd [2]

Når fisken er smoltifisert overføres den til saltvannanlegg. I Norge skjer matfiskproduksjon i stor grad i merder i sjøen. Et slikt anlegg består av en nettpose som holder fisken innhegnet. Nettposen holdes typisk på plass av en flyteenhet og forankring. Her føres fisken til den er fullvokst, og fraktes deretter til slakt. For laks tar hele prosessen rundt to år til slakting [16]. Fisken veier 3 til 6 kilo ved slakting [13, 16].

2.1.3 Miljøhensyn ved fiskeoppdrett

Med den voksende oppdrettsindustrien følger det en rekke miljømessige hensyn. Av disse er lakselus og rømming av laks de mest omtalte. Lakselus er en type hoppekreps som fester seg til laksen og ernærer seg på huden og blodet dens. Selv om lakselus ikke er et stort problem for oppdrettsindustrien er man redd for at lakselusen skal smitte villaksen og negativt påvirke dens livsvilkår [17]. Rømt laks kan også gyte med villaksen noe som kan føre til genetiske endringer villaksbestanden. Det kan føre til lavere produksjon av villaks i de aktuelle vassdragene [18]. I 2017 rømte 15 000 laks i Norge [19].

Fiskeoppdrett har tidligere brukt store mengder antibiotika for å håndtere med bakterielle fiske sykdommer (48 tonn i 1987) [20]. Frykt for antibiotikaresistente bakterier gjorde at bransjen innførte vaksinasjon. Ved bruk av vaksiner er forbruket av antibiotika redusert med 99 % siden 1987, og er i dag på et lavt nivå (273 kg i 2015) [20].



Figur 5 Ulike former for utslipp kan komme fra anleggene [3]

Utslipp forekommer også i form av slam som består av fekalier og uspist fôr (Figur 5). Slammet inneholder næringsalter, først og fremst fosfor og nitrogen [21]. Dette utslippet kan føre til økt algevekst [22]. På landbaserte anlegg er det mulighet for oppsamling av slam. Det er i dag ingen gode løsninger for oppsamling av slam fra merder i sjøen.

Effektivt fiskeoppdrett er avhengig av et godt miljø for fisken. Vannkvalitet er en viktig del av miljøet. I landbaserte anlegg der vann resirkuleres er derfor vannbehandling viktig og det fokuseres på tre elementer; oksygeninnhold, nøytralisering av ammoniakk-nitrogen og fjerning av slam [23].

Oksygeninnhold i vannet må møte fiskens behov for respirasjon, og oksygenering av vannet kan være nødvendig. Totalt innhold av ammoniakk-nitrogen (TAN) reguleres. Ammoniakk i vannet er utskilt fra fisken og vil akkumulere i intensive resirkulerte anlegg. Ammoniakk er giftig og konsentrasjonen i vannet må reguleres. Partikulært avfall, slam, i vannet vil ha flere negative effekter på vannkvaliteten og fisken. Det kan gjøre skade på fiskens gjeller, redusere effekten av ammoniakknøytralisering og øke ammoniakk konsentrasjon i vannet [23, 24]. Lav oppholdstid for slam i systemet vil redusere problemene tilknyttet slam [25, 26], da lekkasje av næringsstoffer ut i væske, fosfor og nitrogen, reduseres [26, 27].

2.2 Fiskeslam

En bærekraftig vekst av norsk oppdrettsnæring krever tekniske løsninger på flere av miljøutfordringene, blant dem er slam. Fiskeoppdrett produserer store mengder slam. Det er estimert at over 535.000 tonn fiskeslam produseres i året hvorav det aller meste slippes i sjøen [28]. I åpne merder i sjø er det ingen kommersielt tilgjengelig teknologier for oppsamling av slam og ingen alternativer for bruk av slikt slam [28].

I de fleste landbaserte settefiskanlegg blir derimot deler av slammet oppsamlet. Settefiskanlegg har historisk ikke hatt renskrav på utløpsvann, men nye og utbyggede anlegg blir i dag underlagt de samme restriksjonene på utslipp som for øvrig avløpsvann i henhold til forurensningsforskriften [7]. Med den voksende fiskeoppdrettsindustrien og strengere utslippskrav er det grunn for å tro at mengden slam som må behandles og avsettes vil øke i fremtiden.

I oppdrettsindustrien i liten tvil om at det er stort potensiale for verdiskapning i slammet [29]. Slammet er rikt i næringssalter og energi, og dette potensialet kan utnyttes på ulike måter beskrevet i Kapittel 2.2.3.

2.2.1 Avhendingsproblematikk og regulering av fiskeslam

Fiskeslam fra oppdrett har noen egenskaper som gjør det problematisk å håndtere. Tørrstoffet til slam er veldig lavt, noe som gjør at volumet skal behandles er stort. Det innebærer at transport over lengere avstander er lite kosteffektivt om slammet ikke er tilstrekkelig avvannet. Lavt tørrstoff setter også krav til lagring av slam. Ved tørrstoff under 25 % må det benyttes en tank, eller annen tett konstruksjon, for å sikre mot avrenning [30]. Det kan gi utfordringer med stort volum av lagringstanker. Avvanning må derfor kunne håndtere og fjerne store mengder vann.

Lagring og bruk av fiskeslam kan medføre problemer med lukt [14]. Fiskeslam lukter kraftig når det nedbrytes og kan medføre klager og problematiske arbeidsforhold. Det gjelder både ved slambehandling på anlegget og ved bruk, for eksempel som gjødsel. Stabilisering av slam er en fellesbetegnelse på prosesser som reduserer lukt. Lukkede tanker og stabilisering av slam vil kunne redusere luktproblemer. Metoder for stabilisering kan være kontrollert nedbrytning av organisk materialet i slammet, enten aerobt eller anaerobt. Slammet kan også tilsettes kjemikalier som hindrer nedbrytning. I noen slambehandlingsmetoder skjer stabiliseringen som en del av prosessen, mens andre krever et separat stabiliseringstrinn. Stabiliseringen kan være midlertidig eller permanent.

Ved håndtering og bruk av slam er det risiko for overføring av sykdom til mennesker, dyr og planter [8]. En mulig måte å spre sykdom på kan være avrenning fra jorder etter gjødsling med fiskeslam. En metode å redusere denne risikoen på er å hygienisere slammet. Hygienisering er prosesser som har til hensikt å fjerne smittefaren i slammet. I noen slambehandlingsmetoder skjer hygienisering som en del av prosessen, for eksempel ved tørking med høy temperatur, mens andre krever et separat hygieniseringstrinn.

Per i dag er det ingen helhetlig og generell avhendingsløsning for fiskeslam. Oppdrettsanleggene må ordne avhending selv ved å ordne avtaler med lokale aktører som kan nyttiggjøre slammet. Eksempler kan være bønder som bruker det som gjødsel, eller biogassanlegg. Med den økende slammengden vi kan vente i fremtiden trenger fiskeoppdretten flere gode løsninger for avhendingen av fiskeslammet.

Regulering ved bruk av fiskeslam som gjødsel

Per i dag er de mest aktuelle bruksområdene for fiskeslam gjødsel, biogassproduksjon og forbrenning. Fra biogassproduksjon og forbrenning er biproduktene henholdsvis biorest og aske. Bruksområdene for disse produktene er primært som gjødsel. Bruk av fiskeslam til gjødsel er regulert av «Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav» [30]. Denne forskriften setter krav til innhold av tungmetaller.

Tungmetaller

Innhold av tungmetaller i slam kan sette begrensninger for bruk av fiskeslam som gjødsel. Tungmetaller kan i større konsentrasjoner være giftig både for mennesker, dyr og planter. I «Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav» stilles krav til klassifisering og bruk av organisk gjødsel. Det er fire kvalitetsklasser for organisk gjødsel som avgjør i hvilken grad det kan benyttes som gjødsel eller jordforbedringsmiddel [30]. Kvalitetsklassene bestemmes på bakgrunn av tungmetallinnholdet i slammet (Tabell 1).

Tabell 1 Grenseverdier for kvalitetsklasser for organisk gjødsel på bakgrunn av tungmetallinnhold [30]

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

På grunn av innholdet av tungmetallene og kvalitetsklassen er det restriksjoner for bruk av slam innen jordbruk. Restriksjonene tilhørende kvalitetsklassene er vist i Tabell 2.

Tabell 2 Kvalitetsklasser og restriksjoner for bruk av organisk gjødsel [30]

| Kvalitetsklasse | Bruk |
|---------------------|---|
| Kvalitetsklasse 0 | Kan nyttes på jordbruksareal, private hager, parker, grøntarealer og lignende. Tilført mengde må ikke overstige plantenes behov for næringsstoffer. |
| Kvalitetsklasse I | Kan nyttes på jordbruksareal, private hager og parker med inntil 4 tonn tørrstoff pr. dekar pr. 10 år. Kan nyttes på grøntarealer og lignende der det ikke skal dyrkes mat eller førvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse og blandes inn i jorda på bruksstedet. |
| Kvalitetsklasse II | Kan nyttes på jordbruksareal, private hager og parker med inntil 2 tonn tørrstoff pr. dekar pr. 10 år. Kan nyttes på grøntarealer og lignende der det ikke skal dyrkes mat eller førvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse og blandes inn i jorda på bruksstedet. |
| Kvalitetsklasse III | Kan nyttes på grøntarealer og lignende arealer der det ikke skal dyrkes mat- eller førvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse hvert 10. år og blandes inn i jorda på bruksstedet. Brukt til toppdekke på avfallsfyllinger skal dekkjiktet være maksimalt 15 cm. |

Om slammet ikke oppfyller kvalitetskravene kan det bli problemer med å bli kvitt slammet på annen måte enn deponering eller forbrenning.

Revidert gjødselsvareforskrift

Det er levert et forslag til Landbruks- og matdepartementet, i samråd med Klima- og miljødepartementet, der gjødselsvareforskriften revideres [31]. Hensikten med forslaget er blant annet å sikre bedre utnyttelse av gjødsel i Norge, og redusere avrenning av næringsstoffer til vann for å hindre algeoppblomstring. God utnyttelse av fosfor er spesielt fremhevet. Forslaget kan påvirke omsetning av fiskeslam.

En del av det nye forslaget er å kreve stabilisering og hygienisering av alt fiskeslam som leveres til jordbruk. Det vil redusere problemer med lukt og smittefare. Det leveres i dag noe ubehandlet fiskeslam som gjødsel til jordbruk. Om den reviderte forskriften går igjennom vil det påføre ekstra kostander til oppdrettsanlegg som per i dag ikke stabiliserer og hygieniserer slam [31].

I forslaget er det foreslått å lempe på kravene til bruk av biorest fra biogassproduksjon. Disse havner gjerne i Klasse III, og er dermed ikke lov å bruke på jordbruksarealer under gjeldende forskrift. Den nye forskriften foreslår å måle mengde tungmetaller i biorest opp mot fosforinnholdet, fremfor tørrstoffinnholdet, slik det gjøres i dag. Det vil gjøre biorest lettere å omsette som gjødsel. Det innebærer at det kan bli mer attraktivt å benytte fiskeslam til biogassproduksjon [31].

2.2.2 Gjenvinningspotensialet i fiskeslam

Nitrogen og fosfor er nødvendige for plantevekst og må tilføres jorda ved jordbruk. Siden disse også fjernes med avlinga vil jorda etterhvert utarmes hvis det ikke tilføres like mye som avlinga fjerner [32].

Prisen på fosfor er økende på verdensbasis og fosfor reservene er minkende [33]. I Europa blir all fosforgjødsel importert, og myndighetene anser dette som lite holdbart på lang sikt [34]. Det er også gjort undersøkelser som viser at kvaliteten på den importerte fosforgjødslet synker [35]. Av den grunn er utarbeiding av en bærekraftig fosforresirkulering viktig for å sikre fremtidens matsikkerhet [34]. Dette kommer godt frem i forslaget til reviderte gjødselsvareforskriften, der gjenbruk og utnyttelse av fosfor er gjennomgående [31]. Det er per i dag et fosforoverskudd i Norge, inkludert import [34]. Utfordringen er å få fordelt fosforen fra regioner med overskudd til regioner med underskudd.

Fiskeslam kan potensielt være den nest største kilden til fosforresirkulering i Norge [34]. Bare en liten del av dette er tilgjengelig i dag, fordi det meste av fiskeoppdretten skjer til havs der det ikke er noen oppsamling av slammet. Oppdrettsnæringen går mer mot landbasert oppdrett med større individvekt på fisken, og det er grunn til å tro at oppsamlet slammengde dermed vil øke. Fosforresirkulering vil derfor trolig være en drivende faktor for behandling og disponering av fiskeslam i fremtiden.

Nitrogen er det grunnstoffet som oftest begrenser plantenes vekst, og er derfor essensielt i et hvert fullverdig gjødsel [36]. Gjenvinning av nitrogen er derfor ønsket av samme grunn som at vi ikke ønsker det som utslipp; det gir stor plantevekst. Dersom utslipp av nitrogen forekommer i vannmiljø kan dette føre til oppblomstring av alger, som kan ha negativ påvirkning på miljøet. Under forbrenning vil nitrogenet forsvinne med røykgassen og ikke være tilgjengelig for gjenvinning [37].

2.2.3 Dagens bruksområder for fiskeslam

Før man velger en slambehandlingsmetode må man vurdere hvilke disponeringsmuligheter man har, da de ulike sluttproduktene setter ulike krav til behandlingen. De mest aktuelle disponeringsmulighetene diskuteres her.

Gjødsel og jordforbedringsmiddel

Fiskeslam kan benyttes som våt- eller tørrgjødsel. Våtgjødsel vil ha et tørrstoff mellom 5 til 10 %, mens tørrgjødsel er tørket med tørrstoff omkring 90 % [7]. Ved bruk av fiskeslammet som gjødsel, eller jordforbedringsmiddel, er det viktig at det inneholder næringsstoffene plantene trenger. Næringsstoffer plantene trenger mest av kalles makro-næringsstoffer. Noen viktige makro-næringsstoffer er nitrogen, kalium og fosfor (NKP).

På bakgrunn av innhold av makro-næringsstoffer og tungmetall klassifiseres organisk avfallsmaterialer som enten;

- **Gjødsel:** materialer som inneholder konsentrasjoner av løselige plantenæringsstoffer som gjør produktet egnet til årlig bruk i forhold til plantenes behov for næringssalter. Et organisk gjødselprodukt skal ha forutsigbar effekt som gjødsel (målestokk husdyrgjødsel 200-400 kg TS/daa/år)[14]
- **Jordforbedringsmiddel:** materialer som har positiv virkning på en eller flere jordegenskaper (kjemisk, biologisk, fysisk) og som tilføres som en engangstilførsel med flerårig virkning (målestokk avløpsslam, ulike typer kompost 2-4 tonn TS/daa/10 år)[14]

Det er gjort flere analyser av fiskeslam, og disse varierer med hensyn på innhold av makro-næringsstoffer. Slambehandlingsmetode, fôr-type og andre lokale forhold påvirker slamkvaliteten. Analyser viser også at innholdet næringsstoffer varierer internt i anleggene i løpet av året, som funksjon av blant annet driftsintensitet og fiskestørrelse (Tabell 3) [38]. Det er derfor vanskelig å konstatere nøyaktig verdier for innhold av næringsstoffer i fiskeslam.

Tabell 3 Minste og største måling av næringsinnhold i slam, målt i % av tørrstoff. Målingene er gjort på samme anlegg over 9 måneder av Eurofins [38]

| | Min | Max |
|--------------------|--------|--------|
| Tot Nitrogen | 2,10 % | 7,40 % |
| NH ₄ -N | 1,90 % | 6,50 % |
| Fosfor | 4,30 % | 8,20 % |
| Kalium | 0,23 % | 1,70 % |

Forsøk gjort av Nofima konkluderer med at slammet er næringsrikt og kan utnyttes som plantenæring, men mer kunnskap er nødvendig før det kan erstatte husdyrgjødsel [39]. Forsøk gjort ved NIVA viser et stort overskudd av fosfor i forhold til mengde nitrogen som er dårlig tilpasset plantenes behov og kan føre til restriksjoner for anvendelse på enkelte typer areal [38]. To undersøkelser gjort ved Sintef og NIBIO gir et mer balansert forhold mellom nitrogen og fosfor [14, 40]. De konkluderer med at gjødselseffekten fra fiskeslam er sammenlignbar med effekten fra kjøttbeinmel og hønsegjødsel, som er mer tradisjonelle gjødsler. Sammenlignet med bløtgjødsel og kunstgjødsel er allikevel gjødselseffekten lavere. I et forsøk fra Bioforsk viser resultatene at fiskeslam inneholder næringsstoffer som er tilgjengelig for plantene som gjødsel [41]. Konsensus innenfor FoU-miljøet er at innholdet av kalium i fiskeslammet er lavt. Kalium er lett vannløselig og mye vil derfor forsvinne med vannfasen under avvanning.

Ved bruk av slam fra sjøvannsbaserte anlegg kan innhold av natrium og klorid (havsalt) virke hemmende på planteveksten [38]. Det er mulig å redusere innhold av natrium og klorid ved å øke tørrstoffet på slammet eller benytte ferskvann i enkelte deler av slambehandlingen.

Slambehandlingsmetoder og anleggstyper varierer ved de forskjellige analysene, og resultatene er derfor forskjellige. Det er derfor viktig at en velger egnede avvannings- og/eller tørkemethoder for å ta vare på næringsstoffer.

Fiskeslam blir i dag brukt som gjødsel enkelte steder. Det benyttes utblandet med annen gjødsel, og som et eget gjødsel med gode resultater [38]. I samtale med Lars Rohold (Sales Manager Aquaculture) i Scanship forteller han at de er involvert i et prosjekt der det produseres gjødsel med innblanding av

omkring 10 % fiskeslam. Scanship er leverandør av blant annet tørke og avvanningsutstyr til settefiskindustrien. Gjødset er godkjent av mattilsynet og eksporteres i dag til Vietnam. Fiskelam kan allikevel ikke uten videre erstatte husdyrgjødsel. Ved bruk av fiskeslam som gjødsel eller jordforbedringsmiddel bør innhold av makro-næringsstoffer undersøkes.

Tungmetaller

Analyser viser at innhold av tungmetaller i fiskeslam lavt, med unntak av sink og kadmium, slik vist i Tabell 4.

Tabell 4 Resultater fra analyser for å bestemme innhold av tungmetaller i fiskeslam

| Stoff | Kystlab [42] | | Eurofins [42] | | NIBIO [40] | |
|-----------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse |
| Krom | 3,91 | 0 | 6,9 | 0 | 4,80 | 0 |
| Sink | 358 | I | - | - | 410 | II |
| Kobber | 16,0 | 0 | - | - | 22,0 | 0 |
| Nikkel | 0,97 | 0 | <0,5 | 0 | 1,20 | 0 |
| Kvikksølv | <1 | 0 | 0,06 | 0 | 0,04 | 0 |
| Kadmium | 0,63 | I | 0,89 | II | 0,77 | I |
| Bly | <1,00 | 0 | <0,5 | 0 | 0,59 | 0 |

På grunn av innhold av sink og kadmium havner fiskeslam i kvalitetsklasse 0 til 2 [14, 21, 38, 40-42]. Begrensinger til bruk som gjødsel øker med kvalitetsklassene, og kvalitetsklasse 3 kan per i dag ikke benyttes på matjord. Lokale analyser av slam bør derfor utføres for å bestemme kvalitetsklasse.

Oppsummering tørr gjødsel

Ved tørking av fiskeslammet er det lettere og billigere og transportere. Tørrt slammet er stabilisert og hygienisert ved tørking, slik at lagringen blir mindre problematisk. Det tørre slammet kan brukes til sentralisert gjødsel- eller biogassproduksjon, eller brukes som brensel.

Tørrgjødsel har den samme utfordringen som våtslam med tungmetaller. Dersom tungmetaller ikke er en begrensning har forsøk vist at tørket fiskeslam har god gjødslingseffekt. Næringsalter som nitrogen og fosfor blir gjenbrukt. Tørket slam kan også benyttes som brensel i forbrenning, da brennverdien til tørket slam er på høyde med tre-pellets. Denne muligheten undersøkes av Norcem, blant andre, som anser fiskeslam som et grønnere alternativ til kull. Selv om resultatene er lovende er det per i dag ikke etablert infrastruktur for levering og mottak av slammet. Slam kan også transporteres til sentralisert biogassproduksjon. Forsøk har vist en dobling av metanutbytte ved innblanding av fiskeslam i substrat av husdyrgjødsel.

Tørking er en energikrevende prosess som vil kreve investering i utstyr og økte driftskostnader. Til vederlag er dette bevist og kommersielt tilgjengelig teknologi, som vil bli diskutert senere i denne oppgaven. Tørket slam har potensiale som gjødsel, brensel og til biogass produksjon. Ved å tørke slam åpnes mulighetene for lokale disponeringsmuligheter, og øker radius på akseptabel transportavstand.

Oppsummering våt gjødsel

Av omtalte bruksområder har våtgjødselproduksjon det største volumet på produktet. Store volum vil skape høye transportkostnader om distansen til forbruker er lang. Ved våtgjødselproduksjon bør derfor oppdrettsanlegget ligge i umiddelbar nærhet til forbruker av gjødslet for å redusere transportkostnader. I tillegg kreves store lagringsvolum for å lagre slammet, da gjødsel ikke brukes kontinuerlig gjennom året. Ved lagring av vått slam må det stabiliseres for å unngå at slammet nedbrytes.

Innholdet av tungmetaller kan være en utfordring alle bruksområdene til fiskeslam. Analyser av tungmetallinnholdet i fiskeslam varierer, men flere påpeker høyt innhold av sink og kadmium. Gjødselvareforskriften begrenser innholdet av disse metallene som lovlig kan spres på landbruksarealer. Det kan øke transportkostnader, da det kan bli problematisk for nærliggende jordbruk å benytte større mengder fiskeslam. Gjødslingseffekten til våtgjødsel er omdiskutert, og direkte bruk som gjødsel krever derfor mer utredning.

I dag benyttes noe ubehandlet slam til våtgjødsel. Da har anlegget direkte kontakt med bønder i nærområdet som sprer slammet sammen med husdyrgjødsel [34]. Dette krever minimalt med investeringer fra oppdretter og bønder, og fremstår som en god løsning for de som har muligheten til det. Denne løsningen vil trolig bli vanskeligere eller umulig dersom den nye gjødselvareforskriften blir godkjent. Forslaget tydeliggjør krav om hygienisering og stabilisering, og dette vil pålegge krav om behandling av slammet. Det vil føre til ekstra kostnader for de som i dag benytter seg av ubehandlet slam. Bruk av slammet som gjødsel gir ingen gjenvinning av energien i slammet. Til gjengjeld vil det være noe karbonlagring i slammet dersom det brukes som gjødsel. Næringsstoffer som fosfor og nitrogen vil også gjenvinnes.

Biogass

Biogassproduksjon av fiskeslam er attraktivt fordi det utnytter energiinnholdet, reduserer volumet og beholder næringsstoffene i bioresten. Ved fremstilling av biogass bryter de anaerobe bakteriene ned den organiske delen av slammet til metan og karbondioksid. Den uorganiske delen blir igjen som biorest. Biogassen kan enten forbrennes lokalt eller videre-behandles for å øke andel metan før den selges. Fiskeslam består av 80 til 90 % organisk tørrstoff (VS), hvor resten er uorganiske forbindelser [39, 40, 43]. Det er et høyere innhold av organisk tørrstoff (VS) enn husdyrgjødsel (Tabell 5), og burde gjøre fiskeslam til et godt egnet substrat for produksjon av biogass [39].

Tabell 5 Analyse av innhold av organisk materiale i husdyrgjødsel og fiskeslam utført av Nofima [39]

| | Organisk Tørrstoff |
|-----------------------------|--------------------|
| Storfegjødsel Tingvoll gard | 66 % |
| Fiskeslam Marine Harvest | 90 % |

Utfordringen med produksjon av biogass fra fiskeslam er ammoniumdannelse [39, 43]. Fiskeslam har et høyt innhold av proteiner som gir et lavt karbon-nitrogen forhold (C/N-forhold) (<20 [44, 45]). Et nitrogenrikt substrat kan føre til dannelse av høye konsentrasjoner av ammonium i bioreaktoren (>1500 mg/l [43]). Ammonium inhiberer prosessen ved å hemme de metandannende bakteriene. Ved å hemme de metandannende bakteriene øker konsentrasjonen av flyktige fettsyrer (VFA). VFA er et mellomprodukt i fermenteringen og kan i høye konsentrasjoner ytterligere inhibere prosessen (>1000-5000 mg/l [39, 43]). I bioreaktoren vil da ammonium og VFA akkumuleres over tid og gassproduksjonen

vil reduseres. Det er årsaken til at det kan være vanskelig å oppnå like gode resultater som i potensialtesten.

Enkelte bakteriekulturer vil kunne tilpasse seg forhold med høye konsentrasjoner av ammonium og fremdeles produsere tilfredsstillende med metangass. Under forsøk utført av NIBIO har det blitt observert ammonium konsentrasjoner på 10000 til 15000 mg/l hvor en metanproduserende kultur fremdeles produserte gass [43]. Nofima registrerte konsentrasjoner av VFA på 15000 til 25000 mg/l hvor bakteriekulturene fremdeles produserte metangass [39]. Dersom man kan fremstille en ammoniums-resistent bakteriekultur kan dette gjøre biogassproduksjon lettere.

Ved å blande inn andre substrater med et høyere C/N-forhold, som husdyrgjødsel, kan stabil drift oppnås. Husdyrgjødsel vil komplettere fiskeslammet ved at det har et høyere C/N-forhold og dermed redusere dannelse av ammonium til et nivå som ikke inhiberer prosessen. Innblanding av fiskeslam i biogassproduksjon har gitt gode resultater. Innblandingen øker metanproduksjonen i forhold til en biomasse kun bestående av husdyrgjødsel (Tabell 6).

Tabell 6 Resultater fra biogassforsøk med og uten innblanding av fiskeslam

| Institutt | Husdyrgjødsel | Blanding | |
|--------------|---------------|----------|----------------------|
| Nofima [39]* | 148 | 190 | L metan/kg VS, v/STP |
| NIBIO [43]** | 131 | 304 | L metan/kg VS, v/STP |

*25 masse % fiskeslam innblandet i husdyrgjødsel, HRT 26 dager

**Forsøk 3.1a, 20 volum % fiskeslam innblandet i husdyrgjødsel, HRT 30 dager

Energipotensialet i fiskeslam er høyere enn husdyrgjødsel, noe som kommer fram fra forsøkene. I forsøket fra NIBIO var spesifikk metanproduksjon over det dobbelte av ren husdyrgjødsel. Forsøk gjort av Nofima gir en spesifikk produksjon betraktelig høyere enn ren husdyrgjødsel, på tross av at forsøket var sterkt inhibert (VFA >15000 mg/l) [39].

Bruk av slam fra brakk og saltvanns anlegg til biogass produksjon er testet. Forsøk ved bruk av brakkvann (Na^+ 2.4 til 4.6 g/l) produserte metangass. Det er konkludert i to rapporter med at det er potensiale for biogassproduksjon, men videre testing og optimalisering bør gjøres før storskala anlegg er aktuelt [46, 47]. Ved bruk av slam fra saltvannsanlegg er konsentrasjonen natrium et problem (Na^+ 10 g/l), og produksjonen av biogass var ustabil og sterkt inhibert [48].

Eksempler på biogassproduksjon av fiskeslam finnes på «Ecopro» i Trøndelag[49] og «Smøla Klekkeri og Settefiskanlegg» (SKS) [50]. Her løser de ammoniums-problemet ved å stoppe nedbrytingen før den er fullstendig. På denne måten hindrer man at akkumuleringen av ammonium når et kritisk nivå, men man får da ikke nedbrutt alt organisk materiale i slammet. Etter samtaler med Øyvind Thorsen, salgssjef avløp, i Sterner som har utviklet og bygget biogassanlegget, forteller oss at ca. 60% av det organiske materialet blir omsatt i reaktoren. Scanship, som blant annet leverer avvanningsutstyr til settefiskindustrien, har også gjort forsøk på biogasspotensialet til fiskeslam. De forteller om en omsetningsgrad på omkring 65 % (Samtale med Lars Rohold, Sales Manager Aquaculture, Scanship)

Biorest

Ved biogassproduksjon produseres også en betydelig mengde biorest. Denne bioresten består av den ikke-nedbrutte delen av fiskeslammet, samt de uorganiske næringsstoffene. Bioresten har potensiale som gjødsel eller jordforbedringsmiddel avhengig av kvalitetsklassen. En undersøkelse utført av NIBIO viser, i likhet med ubehandlet fiskeslam, høye mengder av kadmium og sink (Tabell 7). Det setter begrensinger til bruk. Analyser vist i Tabell 7 er gjort på biorest der fiskeslam er utblandet i annet substrat. Om problemene med inhibering ved bruk av fiskeslam som eneste substrat til biogassproduksjon skulle løses, kan det antas at konsentrasjonen av tungmetaller vil være vil være høyere enn vist i Tabell 7.

Tabell 7 Innhold av næringsstoffer og tungmetaller i biorest [40]

| | | Flytende fiskeslam | Biorest 1 (20/80)* | Biorest 2 (20/80)* | Biorest 3 (40/60)* | Biorest 4 (40/60)* | Husdyrgjødsel |
|----|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| TS | m% | 13 | 3,8 | 3,7 | 3,9 | 4,9 | 93,3 |
| N | g/kg TS | 82 | 220 | 190 | 87 | 130 | 64,6 |
| P | | 24 | 26 | 17 | 26 | 31 | 37 |
| K | | 8,2 | 150 | 200 | 47 | 46 | 47 |
| S | | 8,4 | 13 | 9,8 | 7,9 | 9,6 | 24 |
| Cd | mg/kg TS | 0,77 ^I | 1,4 ^{II} | 0,69 ^I | 1,1 ^{II} | 1,7 ^{II} | 0,054 ⁰ |
| Pb | | 0,59 ⁰ | 1,8 ⁰ | 1,5 ⁰ | 0,77 ⁰ | 0,76 ⁰ | 0,24 ⁰ |
| Hg | | 0,038 ⁰ | 0,121 ⁰ | 0,059 ⁰ | 0,098 ⁰ | 0,141 ⁰ | - |
| Ni | | 1,2 ⁰ | 13 ⁰ | 14 ⁰ | 12 ⁰ | 15 ⁰ | 1,2 ⁰ |
| Zn | | 410 ^{II} | 800 ^{II} | 430 ^{II} | 750 ^{II} | 990 ^{II} | 110 ⁰ |
| Cu | | 22 ⁰ | 90 ^I | 67 ^I | 57 ^I | 68 ^I | 16 ⁰ |
| Cr | | 4,8 ⁰ | 18 ⁰ | 15 ⁰ | 18 ⁰ | 22 ⁰ | 1,8 ⁰ |

*Blandingsforhold henholdsvis fiskeslam og husdyrgjødsel i volum %
0-III angir kvalitetsklassen til bioresten

Næringsinnholdet i bioresten er mer konsentrert i forhold til ubehandlet slam, og gjødselverdien på bioresten burde være høyere. Forsøk gjort på NIBIO i 2017 viser imidlertid at gjødselseffekten til biorest av fiskeslam og husdyrgjødsel er lavere enn gjødselseffekten ved tørket fiskeslam [40]. Det antas at innhold av makronæringsstoffer og tungmetaller vil variere avhengig av anlegget slammet kommer fra. Lokale analyser av biorest burde utføres for å avgjøre hvilken kvalitetsklasse bioresten havner i.

Oppsummering biogassproduksjon

Biogass fremstår som en god behandlingsmetode, men byr på flere utfordringer. Lokal produksjon av biogass av fiskeslam er vanskelig på grunn av akkumulering av ammonium. Ammonium er skadelig for bakteriefloraen i bioreaktoren og hindrer fullstendig omdannelse til biogass. Dette kan løses ved å tilsette husdyrgjødsel eller andre substrater i tillegg til fiskeslammet. Det fordrer transport av husdyrgjødsel til anlegget, i tillegg til avhending av biorest ved lokal biogassproduksjon. Det fører til økte transportkostnader og krav til hygienisering av biorest kan føre til ytterligere investeringer. Forsøk har vist at noen bakteriekulturer kan produsere biogass selv under høye konsentrasjoner av ammonium og Sterner AS har over de siste årene jobbet med å få fram en slik bakteriekultur (Samtale med Øyvind Thorsen, salgssjef avløp Sterner). Per i dag finnes det ikke gode kommersielle løsninger for lokal produksjon av biogass, men det kan endre seg i fremtiden. Levering av fiskeslammet til sentraliserte biogassanlegg er derfor en bedre løsning dersom transportavstanden er akseptabel. Forsøk har vist at innblanding av fiskeslam i substrat av husdyrgjødsel gir forbedret metanproduksjon. Det burde fungere som et insentiv for biogassprodusenter til å benytte fiskeslam.

Bioresten etter utråtnelse har potensiale som gjødsel og inneholder det meste av næringsstoffene til fiskeslammet. Allikevel viser forsøk at plantetilgjengeligheten til næringsstoffene kan være begrenset. Tørrstoff på biorest er relativt lavt og transportkostnader blir derfor høye dersom man ikke avvanner/tørker. Innhold av tungmetaller kan være utfordrende, og biorest fra settefiskslam kommer gjerne i kvalitetsklasse III, og kan derfor ikke brukes på jordbruksareal etter gjeldende gjødselvarselsforskrift. Dette gjelder sentrale biogassanlegg der mindre mengder fiskeslam blandes med husdyrgjødsel. Det forventes at ved lokal biogassproduksjon, på kun fiskeslam, vil innhold av tungmetaller være høyere. Bruk av biorest som gjødsel kan endre seg ved innføring av redigert gjødselvarselsforskriften. Den redigerte forskriften åpner for bruk av biorest med kvalitetsklasse III på matjord, og vurderer å måle tillatt tungmetallinnhold opp mot innhold av næringsstoffer. Det vil legge til rette for mer bruk av blant annet settefiskslam i biogassanlegg.

Andre bruksområder

Børstemarkproduksjon

Børstemarkproduksjon er et mulig bruksområde for fiskeslam. Fiskeslammet brukes som næringssubstrat til børstemarken. Børstemarken er en form for leddorm som inneholder marint protein og fett [51]. Børstemarken kan benyttes som en ingrediens i fiskefôr og potensielt erstatte deler av den vegetabiliske komponenten i fôret [51]. AgriMare Bio skal drive oppdrett av børstemark, på fiskeslam, til bruk i fiskefôr. De vant "Norges beste studentbedrift 2017", en pris utdelt av Ungt Entreprenørskap for AgriMare Bio SB [52].

Deponering

Deponering av fiskeslam er problematisk [14]. Det er forbud mot deponering av biologisk nedbrytbart avfall der glødetapet overstiger 20%, eller hvor innhold av totalt organisk karbon overstiger 10 % [53]. Det gis unntak om slammet havner over kvalitetsklasse III i forskrift om gjødselvarer [53]. Fiskeslam består av 80 til 90 % organisk materiale og vil normalt ikke kunne deponeres. Det er mulig å lagre slam på ubestemt tid om det er tilrettelagt i henhold til lovverket.

2.3 Forbrenning med energigjenvinning

Det er lite litteratur om forbrenning med energigjenvinning som bruksområdet for fiskeslam. Denne rapporten skal omhandle dette området og det tas utgangspunkt i tilgjengelig litteratur som omhandler fiskeslammets; næringsinnhold, tungmetallinnhold, andel organisk materiale, sammensetning og behandlingsmetoder. Teknologi og teori fra lignende fagfelt benyttes for å gjøre vurderingen. Basert på denne dataen er utgangspunktet å forbrenne en gitt mengde slam, anta potensiell energigjenvinning, sammensetning i aske og vurdere potensialet til forbrenning som avhendingsmetode.

2.3.1 Brennverdi

Fiskeslam har en brennverdi, og for å kunne vurdere fiskeslam som brennstoff må denne bestemmes. Brennverdien er energiinnholdet til fiskeslam og er avgjørende for potensiell energigjenvinning. Brennverdien er knyttet til støkiometrien og flammetemperatur. Disse må bestemmes for å kunne avgjøre nødvendig tørrstoff på slam, mengde forbrenningsluft og røykgassmengde. Brennverdi, forbrenningsreaksjon og røykgasstemperatur er utgangspunktet for vurdering av forbrenning.

Brennverdien er et uttrykk for frigitt energimengde når biomasse blir fullstendig forbrent, med benevnningen Joule eller kilowatt-timer. Brennverdier inndeles i øvre, nedre og effektiv brennverdi. Disse verdien bestemmes for fiskeslam.

- Øvre brennverdi: Denne verdien forteller om den totale frigitte energimengden ved fullstendig forbrenning, der vann dannet under forbrenning er i væskefase. Det er et teoretisk maksimum for tilgjengelig energi ved forbrenning.
- Nedre brennverdi: Når biobrenselet oksideres vil hydrogenet i brenselet binde seg med luftens oksygen og danne vann. Siden forbrenningen skjer ved over 100 °C vil vannet som dannes fordampe og forsvinne med røykgassen. Ved nedre brennverdi trekkes energi til fordampning av dannet vann fra maksimal frigitt energi ved forbrenning, H_ϕ .

Nedre brennverdi, H_n , kan uttrykkes som vist i Formel 1.

$$H_n = H_\phi - \Delta H_{vap} * X_{vann} \quad (1)$$

- H_n er nedre brennverdi
- H_ϕ er øvre brennverdi
- ΔH_{vap} fordampningsentalpien til vannet
- X_{vann} er massefraksjonen av vann som dannes i forbrenningen. X_{vann} beregnes fra støkiometrien til slammet.

- Effektiv brennverdi: I tillegg til det dannede vannet vil fiskeslammet inneholde vann, og det vil påvirke brennverdien. Brennverdien vil synke med økende andel vann. Vannet må fordampes, noe som krever energi. For å beregne den reelle brennverdien til fiskeslammet må denne energimengden beregnes.

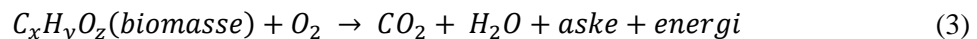
Energi som kreves for å varme og fordampe vann er vist i Formel 2.

$$H_e = H_n * X_{TS} - \Delta H_{vap}(1 - X_{TS}) \quad (2)$$

- H_e er den effektive brennverdien
- X_{TS} er slammets tørrstoffinnhold

2.3.2 Støkiometri

Støkiometrien bestemmer nødvendig mengde forbrenningsluft og avgitt røykgass fra forbrenningen. Den bestemmer også mengde dannet vann under forbrenningen hvilken er nødvendig for å avgjøre effektiv brennverdi. Det er kun den organiske delen av slammets som deltar i forbrenningsreaksjonen. Fra litteraturen er det oppgitt at fiskeslam består av 80 til 90 % organisk materiale. Generelt kan en forbrenning beskrives med forbrenningsreaksjon vist i Formel 3.

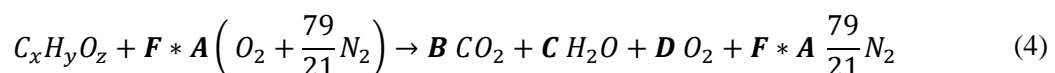


Under forbrenningsreaksjonen reagerer biomasse med oksygen og danner karbondioksid, vanndamp og aske. Reaksjonen frigjør også energi.

I en forbrenningsreaksjon er det nødvendig å beregne mengde O_2 for å sikre fullstendig forbrenning. Fravær av O_2 vil stoppe reaksjonen og et underskudd fører til ufullstendig forbrenning. For å sikre en fullstendig forbrenning av brennstoff tilføres et støkiometrisk overskudd av O_2 . Det vises med en faktor, F , i reaksjonsligningen. Det anbefales å benytte et luftoverskudd på minimum 50 % av støkiometrisk oksygenbehov ved småskala biomasse forbrenning for å sikre fullstendig forbrenning [54]. Det gir faktor F på 1,5.

I de fleste tilfeller forsynes reaksjonen med O_2 fra luft. Luften består hovedsakelig av oksygen og nitrogen. Det innebærer at N_2 også tilføres forbrenningen. N_2 antas inert i reaksjonen og vil påvirke mengde forbrenningsluft, mengde røykgass og røykgasstemperatur. Molforholdet mellom dem er $\frac{N_2}{O_2} = \frac{79}{21} \approx 3,76$.

Forbrenningsreaksjonen utvides for å ta høyde for ekstra O_2 og nitrogen, vist i Formel 4



Den kjemiske sammensetningen til fiskeslam er vanskelig å fastslå. Fiskeslag, fôrtype, anleggstype og slambehandling er variabler som vil påvirke sammensetningen av slammet. I oppgaven er det benyttet støkiometriske formel for fiskeslam fra Dorade [55]. Fisken lever i varmere deler av det østlige Atlanterhavet [56]. Det vil gi en tilnærming til hvilke produktmengder det kan forventes fra forbrenningen. Sammensetning er vist i Tabell 8.

Tabell 8 Støkiometrisk sammensetningene for fiskeslammet

| Slamtype | Sammensetning |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Fiskeslam fra Dorade (Sparus aurata) | $C_7H_{13.4}O_{3.5}P_{0.3}N_1$ |

Balansert ligninger ved forbrenning er vist i Tabell 9. F er faktor for luftoverskudd.

Tabell 9 Reaktanter og produkter for forbrenningsreaksjonene

| Slamtype | Reaktanter | | | Produkter | | | |
|-----------|--------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| | Sammensetting | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | H ₂ O | O ₂ | N ₂ |
| Fiskeslam | $C_7H_{13.4}O_{3.5}P_{0.3}N_1$ | F*8,6 | F*32,4 | 7,0 | 6,7 | F*8,6-8,6 | F*32,4 |

Det antas at alt nitrogen i forbrenningen går til N₂ iht. begrensning. Fosfor antas inert under reaksjonen.

Resultatene ved forbrenning av 1 kg biomasse og fiskeslam under støkiometriske forhold, $F=1$, er vist i Tabell 10. Ved omgjøring fra mol til masse benyttes $n_i = \frac{m_i}{M_i}$.

Tabell 10 Balansert forbrenning av 1 kg slam

| | C | H | O | N | + | O ₂ | + | N ₂ | → | CO ₂ | + | H ₂ O | + | N ₂ |
|----------------|------|------|------|------|---|----------------|---|----------------|---|-----------------|---|------------------|---|----------------|
| Fiskeslam [kg] | 0,40 | 0,06 | 0,27 | 0,07 | | 1,32 | | 4,33 | | 1,47 | | 0,58 | | 4,40 |

Forbrenningsmekanikk

Når biomasse antennes skjer en rekke komplekse prosesser. Den resulterende reaksjonen er beskrevet i Formel 3. For at biomasse skal gjennomgå denne endringen skjer en rekke prosesser under forbrenningen. Dette kapitlet tar for seg hovedtrinnene. De fire trinnene som omtales er tørking, pyrolyse, forgassing og forbrenning.

- Under tørking fordampes vann som følger med mediet. Fordampingen skjer ved 100 °C og tar energi fra forbrenningsreaksjonen. Det senker temperaturen i brennkammer og hastigheten på forbrenningsprosessen [54].
- Ved pyrolyse spaltes organisk biomassen til lette hydrokarbon gasser, karbonholdig koks og tjære, i tillegg til CO og CO₂ [54]. Oksygen reagerer ikke med produktene da de dannes inni biomassen der oksygen ikke kommer til. Pyrolysen skjer mellom 200 °C til 400 °C [57, 58].
- Forgassing er termisk degradering med tilgang på oksygen. Gassene som reagerer med oksygen er gassproduktene fra pyrolyse. Gassene består primært av CO, CO₂, H₂O, H₂ og CH₄ [54]. Under forgassing oksideres også karbonholdig koks og tjære. Forgassing skjer rundt 800 °C til 1100 °C [54] for biomasse. For avløpsslam er denne temperaturen ca. 600°C [59]
- Forbrenning er kan defineres som fullstendig oksidasjon av brennstoff [54]. De varme gassene dannet under forbrenning kan benyttes til oppvarming. Den avgitte energien fra forbrenning er avhengig av brennverdi av biomasse og tørrstoffet til biomassen.

2.3.3 Flammentemperatur

For at forbrenningen skal kunne opprettholdes må flammentemperaturen være tilstrekkelig høy. Denne tenntemperatur er den laveste temperaturen et stoff må varmes til for å antenne. Ulike stoffer har ulike tenntemperaturer hvor biomasse burde minimum ha 800°C og avløpsslam ca. 600 °C. Temperaturen på røykgassene vil også påvirke hvor mye energi som kan gjenvinnes ved varmeoverføring. Flammentemperaturen påvirkes primært av effektiv brennverdi, røykgassmengder og fuktighet på slam til forbrenning.

Energien fra forbrenningsreaksjonen, H_e , vil i førsteomgang gå til å varme røykgassene. Røykgassene består av CO₂, H₂O (g), N₂ og O₂. Her antas det at all den frigjorte energien fra forbrenningen varmer opp røykgassene, og prosessen er adiabatisk, altså har ingen varmetap.

Flammentemperatur kan finnes ved å bruke Formel 5

$$\Delta H_e = \sum_{i=\text{røykgasser}} m_i \int_{T_1}^{T_2} C_{p,i}(T) dT \quad (5)$$

- m_i er røykgassens masse og er beregnet fra støkiometriske forhold ved bruk $n_i = \frac{m_i}{M_i}$
- T_1 er temperatur før oppvarming
- T_2 er temperatur etter oppvarming
- $C_{p,i}$ er røykgassens varmekapasitet som funksjon av temperaturen
- H_e er den tilgjengelige energimengden

Varmekapasitet endres med temperaturen og er uttrykt som funksjonen $C_{p,i}(T)$, vist i Formel 6.

$$C_{p,i}(T) = A_i + B_i * t + C_i * t^2 + D_i * t^3 + E_i/t^2 \quad (6)$$

- A, B, C, D og E er individuelle konstanter for hver av komponentene røykgassen
- t er temperatur (K)/1000

Konstantene for hver komponent i røykgassen presenteres i Tabell 11, med fullstendige tabeller vedlagt som Vedlegg A. Disse er hentet fra «National Institute of Standards and Technology» [60].

Tabell 11 Konstantene brukt for beregning av $C_{p,i}(T)$

| | CO ₂ | H ₂ O | N ₂ | O ₂ |
|----------------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| Gyldighetsområde (K) | 298 - 1200 | 500 - 1700 | 500 - 2000 | 700-2000 |
| A | 24,99735 | 30,092 | 19,50583 | 30,03235 |
| B | 55,18696 | 6,832514 | 19,88705 | 8,772972 |
| C | -33,69137 | 6,793435 | -8,598535 | -3,988133 |
| D | 7,948387 | -2,53448 | 1,369784 | 0,788313 |
| E | -0,136638 | 0,082139 | 0,527601 | -0,741599 |

Siden temperaturen ikke kan leses eksplisitt fra ligning 5 må løsningen finnes iterativt. Dette gjøres ved å gjette på en flammtemperatur og løse for H_e . Deretter juster man anslaget etter avviket den beregnede H_e har fra den virkelige verdien. Prosessen gjentas til avviket er tilstrekkelig lite. Denne prosessen kan gjøres enkelt i et regneprogram.

2.3.4 Røykgass og aske

Forbrenningsproduktene er røykgass og aske. Røykgassen representerer den organiske delen av slammet og vil primært bestå av karbondioksid, nitrogenforbindelser og vann. Asken består av den uorganiske delen av slammet. Mulig avhending og myndighetskrav tilknyttet forbrenningsproduktene er viktig for vurdering av forbrenning som bruksområdet.

2.3.4.1 Røykgass

Røykgassen vil primært bestå av nitrogenforbindelser, vann, karbondioksid, oksygen og støv. Utslipp tilknyttet røykgass betraktes ikke iht. begrensninger.

2.3.4.2 Aske

Aske inneholder mange av næringsstoffene i slammet, men mangler nitrogen for å være et fullgjødsel. Nitrogenet forsvinner med røykgassen under forbrenningen [61]. Undersøkelser indikerer at fosfor vil bli i asken [34, 61]. Aske består av den uorganiske delen av slammet. Analyser gjort av slam ved tre forskjellige settefiskanlegg gir en askeandel mellom 11.6 til 19.2 % TS ved forbrenning [21]. Den vil også inneholde en del tungmetaller. Asken består av tre deler; bunnaske, grov flyveaske og fin flyveaske. Fordelingen av de tre komponentene vil variere med brennstoff og fyringsenhet (Tabell 12).

Tabell 12 Fordeling av aske under forbrenning av biomasse på ristovn eller undermatet stoker, med unntak av strå og korn som fyret i «cigar burner» [54]

| | Bark | Flis | Sagflis | Strå og korn |
|----------------|-------|-------|---------|--------------|
| Bunnaske | 65-85 | 60-90 | 20-30 | 80-90 |
| Grov flyveaske | 10-25 | 10-30 | 50-70 | 2-5 |
| Fin flyveaske | 2-10 | 2-10 | 10-20 | 5-15 |

- Bunnasken består av mineraler og det meste av fosforet vil være i bunnasken [61]. Eventuelle urenheter som sand og grus vil finnes her. Den er den askefraksjonen som inneholder minst tungmetaller [58, 61]. Bunn asken burde kunne gjenvinnes som gjødsel [54, 61]. Avhengig av innholdet i brenselet og temperaturen i fyringsenheten kan bunnasken «slagge» eller smelte og skape driftsproblemer [54, 58].
- Grov flyveaske er primært uorganiske partikler og burde kunne gjenvinnes for bruk som gjødsel [54, 58]. Noen tungmetaller som sink kan forventes følge med denne fraksjonen, i tillegg til jern, kobber, aluminium og krom [58]. Flyveaske kan fanges av en sykklon og separeres fra røykgassen [54].
- Fin flyveaske består av mindre partikler enn grov flyveaske og er den minste fraksjonen [54]. Denne askefraksjonen inneholder mest av de flyktige tungmetallene som kadmium, bly og sink [54, 58]. Konsentrasjoner av tungmetaller gjør at denne askeandelen burde separeres fra de andre og deponeres. Fin flyveaske kan fanges av et elektrofilter eller følge med røykgassen til friluft.

Fordeling av tungmetaller i de forskjellige askefraksjonene påvirkes av flere forhold som luftfordeling, kjemiske og fysiske egenskaper til biomassen, kvalitets på brensel, type forbrenningsanlegg og temperatur i fyringsenhet [58, 61]. En analyse gjort på de forskjellige askefraksjonene er vist i Tabell 13

Tabell 13 Utdrag fra tabell om fordeling av tungmetaller. Tallene er gjennomsnitt av 10 prøver forbrent i ristovn og undermatet stoker. Biomasse er flis og bark fra gran. Tabellen er hentet fra «The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing» [54].

| Stoff | Bunnaske | Grov flyveaske | Fin flyveaske | Enhet |
|-----------|----------|----------------|---------------|-------|
| Kobber | 164,4 | 143,1 | 389,2 | mg/kg |
| Sink | 432,5 | 1870,4 | 12 980,7 | mg/kg |
| Kobber | 21,0 | 19,0 | 17,5 | mg/kg |
| Molybden | 2,8 | 4,2 | 13,2 | mg/kg |
| Arsenikk | 4,1 | 6,7 | 37,4 | mg/kg |
| Nikkel | 66,0 | 59,6 | 63,4 | mg/kg |
| Krom | 325,5 | 158,4 | 231,4 | mg/kg |
| Bly | 13,6 | 57,6 | 1053,3 | mg/kg |
| Kadmium | 1,2 | 21,6 | 80,7 | mg/kg |
| Kvikksølv | 0,01 | 0,04 | 1,47 | mg/kg |

Det finnes lite informasjon om askefordeling ved forbrenning av fiskeslam, og det er mange variabler som kan påvirke tungmetallinnhold og fordeling av asken. Det kan antas at ved forbrenning av fiskeslam vil asken oppføre seg tilnærmet som beskrevet, der størstedelen av tungmetallene vil følge med flyveaske.

Det finnes tekniske løsninger som kan separer tungmetaller fra aske. Det er per i dag vanskelig å fjerne tungmetaller fra aske [31]. Slike teknologier er under utvikling, og vil bli mer tilgjengelig i fremtiden [31]. OiW Process, for eksempel, utvikler en prosess som baserer seg på mekanisk separasjon av tungmetallene fra restasken [62].

2.3.5 Forbrenningsteknologi

Et av målene i oppgaven er å undersøke teknologi som benyttes, eller kan benyttes, til lokal forbrenning av fiskeslam. Det er ikke funnet noen forsøk hvor fiskeslam er brukt som brensel i slike forbrenningsanlegg. Løsningene som omtales her er ment for bruk av flis, pellets eller briketter som brensel. I hvilken grad denne teknologien kan brukes for fiskeslam må undersøkes nærmere.

Utvikling innen bioenergi

I de siste årene har bioenergi blitt et satsningsområde innen energisektoren [37]. Energiomlegging til fornybar energi er sentralt i Regjeringens politikk for en mer bærekraftig energiforsyning. Hensikten med energiomlegging er å redusere bruken av energi og å legge om fra bruk av strøm og fossile energibærere til fornybar energi [63]. Med denne satsningen har det skjedd en stor utvikling av teknologier og løsninger for forbrenningsanlegg. Utviklingen har også ført til muligheten for mindre desentraliserte anlegg til bruk på bygårder, gårdsbruk og lignende

Designparametere

Fiskeslam kan ha store variasjoner i brennverdi og sammensetting. Dette kan føre til driftsproblemer i forbrenningsanlegget der man ønsker en jevn innmating av et homogent brensel for optimal ytelse [54]. Det kan derfor være ønskelig med homogenisering av fiskeslammet før det innføres til forbrenning.

Korrekt dimensjonering av fyringsanlegget er viktig. Ved brenselast som er over eller under det anlegget er designet for kan man oppleve problemer med ufullstendig forbrenning, lav virkningsgrad m.m. [54].

Det er normalt nødvendig å tilføre et luftoverskudd i forbrenningsanlegg for å forsikre fullstendig forbrenning. Dette er for å forsikre god tilgang på oksygen, slik at alt brenselet får muligheten til å forbrenne. Som en tommelfingerregel brukes rundt 1,5 ganger det støkiometriske forholdet [54]. Ved kontrollert lufttilførsel i flere brenn-soner oppnås den beste forbrenningen. Luften som tilføres pyrolysen kalles primærluft, mens luften til utbrenning av røykgassene kalles sekundærluft. Lufttilførselen kan forvarmes for å oppnå høyere temperatur i forbrenningskammeret [54]. Under forbrenning av de frigitte gassene ønsker en normalt å ha kontroll over lufttilførsel og forbrenningstemperatur. For forbrenningsprosesser er følgende faktorer avgjørende for å oppnå fullstendig forbrenning av brenselet og så godt energiutbytte/så høy virkningsgrad som mulig [64]:

God blanding av forbrenningsluft og brensel i forbrenningskammeret. Nok tilgjengelig oksygen. Høy nok forbrenningstemperatur. Lang nok oppholdstid for brenselet i forbrenningskammeret.

2.3.5.1 Fyringsenheter

Det er ikke kommersielt tilgjengelige fyringsenheter for forbrenning av slam i mindre skala (1MW>). Det finnes flere mindre fyringsenheter som benytter tre-pellets som brensel. Det antas at disse kan konverteres til å fungere med tørket fiskeslam.

Undermaterstoker

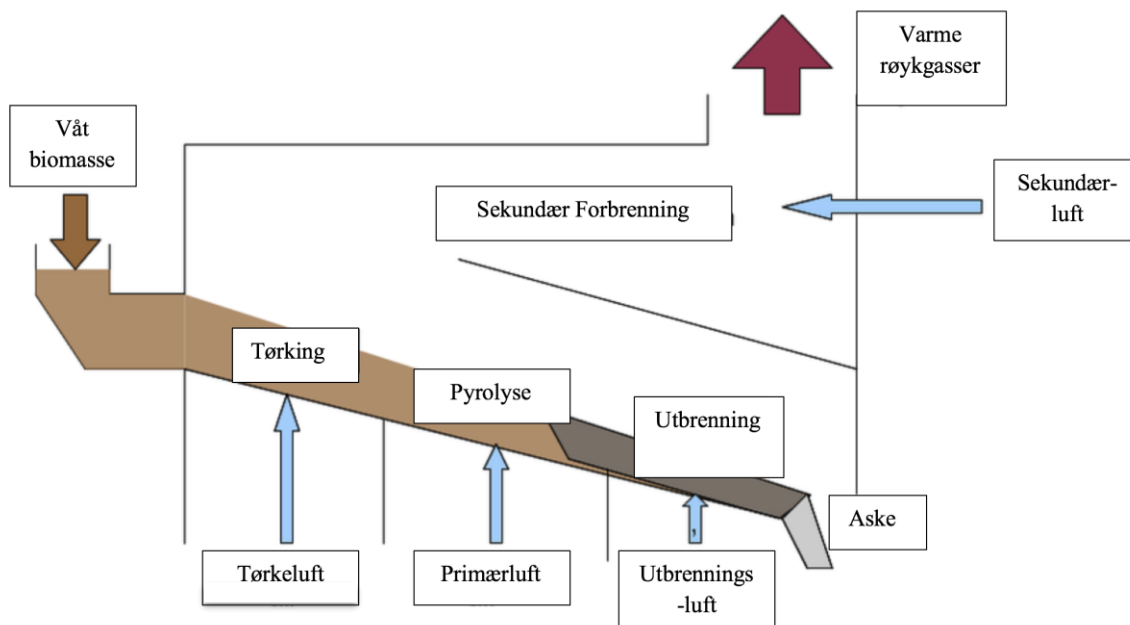
Brenselet blir matet inn nedenfra og opp i forbrenningskammeret med en skruemater. Derifra blir brenselet presset inn i forbrenningssonen, typisk utformet som en skål eller skrårist. Her tilføres primærluften gjennom risten, mens sekundærluft tilføres over brenselet. Slike anlegg har normalt manuell askefjerning.

Undermaterstoker passer bra til mindre anlegg og er en rimelig og driftssikker metode.

Det som gjør den mindre passende for forbrenning av fiskeslam er at brenselet bør være homogent med lavt askeinnhold og ha maksimal fuktighet på 30-35 % [37, 64].

Ristovner

I ristovner skjer forbrenningen av brenselet på en rist. Primærluft blir tilført gjennom denne risten og passerer gjennom brenselet, som ligger jevnt fordelt på risten. Det skiller på ovner med faste og bevegelige rister. I ovner med faste rister, har ristene helning slik at tyngdekraften sørger for å bevege brenselet nedover risten. Asken faller så ned i en askesjakt i ristens enda. I ovner med bevegelige rister er det mekaniske innretninger som transporterer brenselet over risten og ned i askesjakten (Figur 6).



Figur 6 Innmating i ristovn og luftfordeling [65]

Ovner med bevegelig rist gir en bedre blanding av forbrent og uforbrent brensel, og øker kontakten mellom brensel og luft [64]. Dermed oppnår ovnene bedre virkningsgrad og kan forbrenne brensel med høyere fuktighetsinnhold [37]. Bevegelige rister innebærer også større kostnader, og dermed brukes denne typen rist typisk bare for ovner med innfyrt effekt over 500 kW [64], men denne grensen flyttes stadig nedover [66]. I dag leveres ovner med bevegelige rister med effekter ned til 100 kW [67]. For mindre ovner brukes normalt fast rist i ovnene [64].

I ristovner tilføres gjerne sekundær luften i et separat brennkammer, der utbrenning av røygassen finner sted (bilde). Dette gir muligheten til å ha høy turbulens i sekundærkammeret uten å virvle opp brenselet i primærkammeret. Høy turbulens i sekundærkammeret sørger for god kontakt mellom forgasset brensel og oksygen, som øker virkningsgraden [64].

Ristovner vil trolig være velegnet til forbrenning av fiskeslam fordi den tolererer brensel med høyt fuktinnhold, varierende størrelse og høyt askeinnhold [64].

Røykgassrensing

Røykgassen fra forbrenning av biomasse inneholder typisk få skadelige stoffer, og småskala-anlegg er ikke underlagt utslippsrestriksjoner kilde. Røykgassen renses derfor typisk kun for partikler. De vanligste partikkelrensemetodene er elektrofilter, tekstilfilter og syklon. Sykloner er de mest brukte, da de er rimelige, effektive og krever lite vedlikehold [64]. Ulempene med sykloner til partikkelrensing er at små partikler kan være vanskelig å fjerne. Elektrofilter har en høyere kostnad, og brukes derfor på større anlegg [66].

Askebehandling

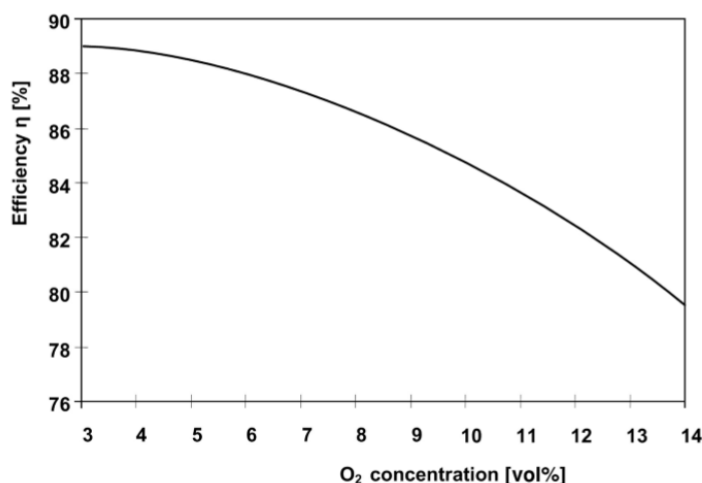
Etter utglødningen av brenselet er asken igjen. Denne asken må fjernes, enten automatisk eller manuelt, og lagres i beholder. De fleste leverandører av fyringsanlegg anbefaler automatisk askeutmatning [37].

2.3.5.2 Varmegjenvinning

I oppgaven skal det utredes mulighet for gjenvinning av varme fra fyringsenheten. Energien fra forbrenningen ligger i den varme røykgassen og er tilgjengelig for gjenvinning. Varmen i røykgassen kan deles i to; følbare varme og latent varme. Følbare varme er energien knyttet til temperaturen på røykgassen. Den latente varmen er knyttet til energien som ligger i kondensering av væske i røykgassen. Referanser i dette kapitlet er gjort ved forbrenning av annen biomasse enn fiskeslam og kan avvike fra forbrenningsprosessen i oppgaven.

Oksygenoverskudd og gjenvinning

Oksygeninnholdet i røykgassen påvirker til temperaturen og duggpunktet til røykgassen, og har innvirkning på potensiell energi som kan gjenvinnes [54]. Et lavt oksygenoverskudd under forbrenning er ønskelig om varme skal gjenvinnes (Figur 7) [54].



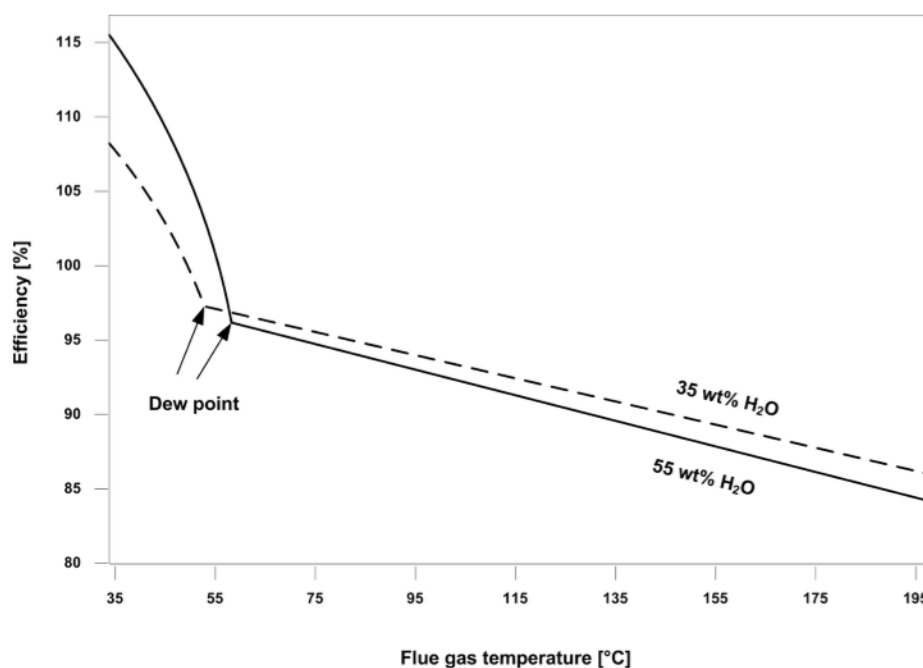
Figur 7 Termisk virkningsgrad som en funksjon av oksygeninnhold i røykgassen. Funksjonen er beregnet ved en røykgasstemperatur på 165 °C, O₂ innhold er på tørr basis, flis og bark med øvre brennverdi på 20,3 MJ/kg og TS innhold på 55 m% forbrennes. Virkningsgrad beregnet med effektiv brennverdi. Figuren er hentet fra «The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing» [54].

Gjenvinning av følbar varme

Den minst komplekse varmegjenvinningen er å kjøle ned røykgassen uten å kondensere ut vannet. Ved å ikke kondensere ut vannet kreves ikke noe system for behandling av kondensert vann. Det innebærer at all potensiell energi ikke gjenvinnes fra røykgassen. Det fører til en redusert termisk virkningsgrad i forhold til gjenvinning av latent varme (Figur 8). Væsken i røykgassen kondenserer ved et gitt duggpunkt, og røykgassen kan ikke kjøles mer enn dette punktet.

Gjenvinning av latent varme

Ved å kjøle ned røykgassen under duggpunktet kondenserer væsken i røykgassen. Det betyr at energi tas ut av temperatursenkningen og kondensasjonsenergien til vannet. Om røykgassen senkes til samme temperatur som gassene antennes ved vil energigjenvinningen nå et teoretisk maksimum. Gjenvinning av latent varme i røykgassen øker den termiske virkningsgraden til anlegget betraktelig (Figur 8) [54].



Figur 8 Virkningsgraden til et forbrenningsanlegg vist som en funksjon av røykgasstemperaturen. Figuren er beregnet fra forbrenning av treflis og bark med en øvre brennverdi på 20 MJ/kg, med et oksygeninnhold på 9.5 volumprosent i røykgassen. Virkningsgraden beregnet med effektiv brennverdi. Figuren er hentet fra «The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing» [54].

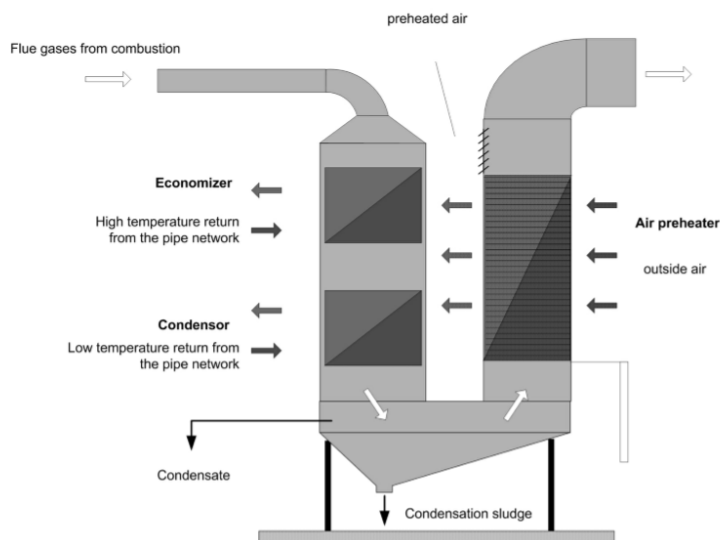
Med kondensering av væske i røykgassen øker virkningsgrad, men den kondenserte væsken må fjernes fra prosessen og behandles. En andel av partiklene vil bli tatt opp av den kondenserte væsken og gitt at anlegget renser røykgassen før kondensator, for å fjerne grov flyveaske, består partiklene i røykgassen primært av fin flyveaske. Fin flyveaske er forurenset av tungmetaller og dermed blir kondensatet forurenset, spesielt av kadmium, sink og bly [54]. Kondensatet og partiklene (slammet) kan ikke benyttes som gjødsel [54]. Slammet og kondensatet kan separeres ved avvanning. Mesteparten av tungmetallene finnes på slampartiklene og innhold av tungmetaller i kondensat vil derfor reduseres ved avvanning [54].

Beregninger gjort ved tre anlegg for forbrenning av biomasse i Østeriket, gir en slammengde på 0,01-0,3 kg tørt slam per innfyrt MWh [54]. Kondensatmengden er anslått til 150-500 liter per innfyrt MWh [54]. Dette er kun en et estimerer og mengder vil variere med blant annet type forbrenningsanlegg, kondenseringssystem, askefordeling, system for støvrensing og biomasse [54]. Gjenvinning av latent varme fra biomasseforbrenning er anbefalt om biomassen er fuktig, rundt 50 m% TS og om nominell effekt er større enn 2 MW [54, 64]. Andre aspekter, som lokale driftsforhold og energipriser, kan påvirke den økonomiske vurderingen.

System for gjenvinning av latent varme i røykgass

Systemer for gjenvinning av laten varme benyttes av de fleste biomassebaserte fjernvarmeanlegg i Danmark [54]. Antall kondenseringssystemer installert på anlegg i Europa øker [54]. Systemet består normalt av tre hoveddeler (Figur 9) [54]:

- Gjenvinning av følbare varme (economizer)
- Gjenvinning av følbare og latent varme (condensator)
- Forvarming av luft (air preheater)



Figur 9 System for gjenvinning for latent varme [54]

Vann med høy temperatur oppvarmes gjennom «economizer», og vann med lavere temperatur oppvarmes i kondensator. I kondensator er det viktig at temperaturen i røykgassen senkes under duggpunkt, noe som setter krav til temperaturen på vannet som sirkulerer gjennom kondensator. Jo lavere temperatur på vannet jo mer energi kan gjenvinnes, som øker termisk virkningsgrad [54]. Luft fra luftforvarmer benyttes som forbrenningsluft og til utblanding av røykgass. Utblandingsluft tilføres den mettede røykgassen etter gjenvinning av latent varme [54]. Det gjøres for å hindre kondensering i skorstein.

Kondensatet, og slammet i det, inneholder tungmetaller. Tungmetallene ligger primært på slammet, og for å redusere volum og separere tungmetaller bør kondensat avvannes [54]. I Figur 9 er det et sedimenteringsbasseng for å øke tørrstoffet på slammet. Behandlingsmetoden for slam og kondensat varierer i forhold til egenskapene til slammet. Noen vanlige metoder er [54]:

- Sedimentering
- Filter med sagflis (slam passerer gjennom sagflis som fanger partikler)
- Beltefilter

For lagring og transport kan slammet ytterligere avvannes i presser og/eller tørkes. Metoder for avvanning og tørking av slam forklares i kapittel om Slambehandling.

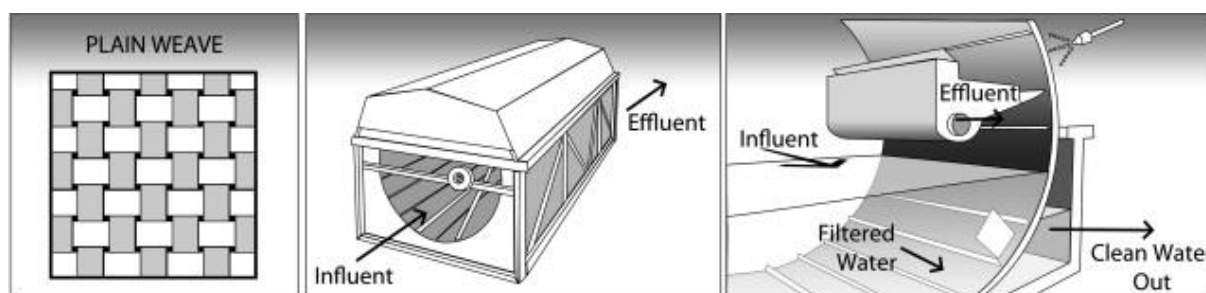
2.3.6 Slambehandling

I oppgaven skal metoder for håndtering av slam undersøkes. Slamavvanning og tørking er et viktig moment i settefiskindustrien på grunn av det lave tørrstoffet ubehandlet fiskeslammet har. Volum er kostnadsdrivende for både lagring og transport av slam, og volumreduksjon gjennom avvanning er derfor viktig [7]. Alle bruksområder for fiskeslam omtalt i denne oppgaven krever avvanning i forskjellig grad. Spesielt forbrenning er påvirket av tørrstoffinnhold i slam da det har en direkte korrelasjon til brennverdi og dermed flammetemperatur. Dette kapittelet gjennomgår de mest brukte metodene for avvanning og tørking.

Første steget i slambehandlingen er å separere slammet fra vannet. Det store mengder vann som må renses for slam. Vannrensing er mekanisk, og mikrosiler er den mest brukte. Dette trinnet er uavhengig av bruksområdet for slammet, og slammet herifra inneholder typisk mellom 0,1 og 2% TS [26, 27, 68, 69] [7].

Innen akvakultur har trommelfiltere og skivefiltere vært en foretrukket løsning på avløpsrensing og som komponent i RAS-anlegg fordi den kan håndtere store vannstrømmer og er driftssikker [7, 70-72].

Et roterende trommelfilter består av en roterende filtersylinder (Figur 10). Urent vann kommer inn i midten av sylindren og rent vann passerer igjennom perforeringene. Slam med partikkelstørrelse større enn perforeringer blir holdt igjen på filteret. Filteret roterer, og slamkaken spyles av (tilbakespyles) og ned i avløpsrennen (Figur 10). Størrelsen på de perforerte åpningene ligger normalt mellom 60 til 200 μm [7, 23, 72].



Figur 10 Virkemåte og skisse av et trommelfilter [72]

Avvanning

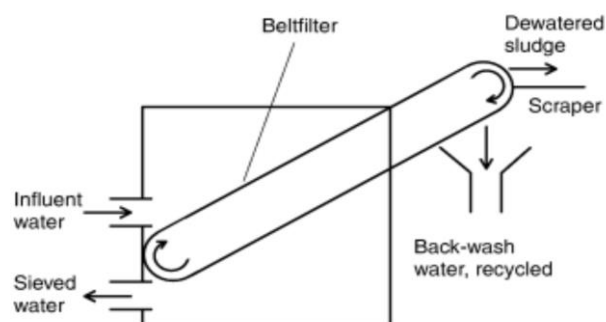
Tørrstoffet på slam fra vannrensing er omkring 1 % og volumet er for stort for avhending. Avvanning er en fellesbetegnelse for prosesser som skal redusere slammets volum ved oppkonsentrering av tørrstoffet. Det kan kjøres flere avvanningstrinn etter hverandre alt etter hvilket tørrstoff som ønskes på sluttprodukt. Hvilke metoder som benyttes varierer etter leverandør, ønske fra forbruker og bruksområde for slam. De vanligste metoder for avvanning omtales videre i avsnittet.

Sedimentering

I sedimentasjon brukes forskjellen i densitet mellom slam og vann for å skille vannet fra slammet. Denne forskjellen gjør at det tyngre slammet synker, med vannet liggende i en klarfase over. Slammet kan fjernes fra bunnen, mens rensset vann renner i overløp. Denne metoden er mye brukt i avløpsbransjen, og er også tatt i bruk som avvanningsmetode av settefiskanlegg.

Beltefilteret

Beltefilter består av en permeabel filterduk med en helning på omkring 10° - 30° (Figur 11). Rensset vann vil passere gjennom duken og slammet legger seg oppå. Etersom duken tetter vil den automatisk starte å bevege seg og slammet blir fraktet opp og skrapet av. Dyser med rens vann rens belteduken på vei tilbake. [7, 26, 27].



Figur 11 Beltefilter [9]

Slammet har lav oppholdstid i systemet som reduserer oppløsning av næringsstoffer fra partikler til væskefasen. Innstalleringskostnaden kan være dyr i forhold til andre alternativer. Det kan være nødvendig med bruk av koagulant og flokkulant, noe som øker driftskostnadene. Tørrstoffet på avvannet slam heves til omkring 10 % [26, 27].

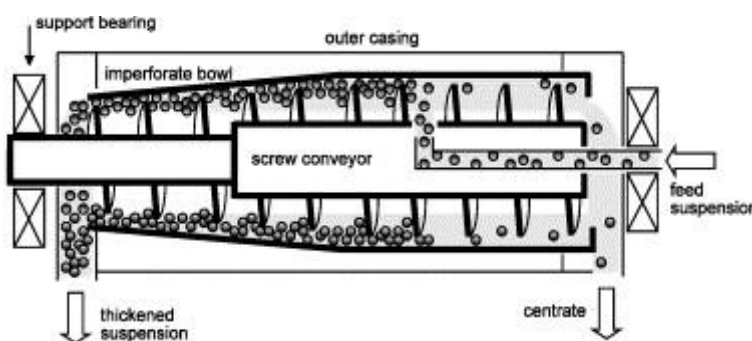
Posefilter

Dette filteret brukes til avvanning av slam fra kloakk, gruve- og meieridrift [26, 73]. Slam fra slamfangsten blir pumpet inn i en permeabel filterpose. Filtrat renner ut av posen og partikler holdes tilbake. Når posen er full kobles slammet til en ny pose. Den fulle posen lagres slik at filtrat fortsetter å renne ut fra posen og tørrstoffet øker. Det er nødvendig å bruke koagulant og flokkulant for å hindre at partikler forsvinner med filtratet.

Innstalleringskostnadene for posefilter er relativt lave sammenlignet med andre metoder, og fulle poser er lette å håndtere og transportere. Etersom posene blir lagret over lengre periode, hvor tørrstoffet øker under lagring, vil næringsinnholdet i slammet reduseres. Næringsinnholdet synker ved at næringsstoffene i partiklene lekker ut i filtratet. Driftskostnadene er relativt høye på grunn av kostandene for posene [26]. Tørrstoffet i slam heves fra omkring 1% til 20 % [26, 73].

Sentrifugering

En sentrifuge vil separere stoffer ved hjelp av sentrifugalkraften (Figur 12). Sentrifugen roterer med høy hastighet og slam og vann blir kastet ut i ytterkammeret via slisser i midten av aksling. Tetthetsforskjellen presser det tyngre slammet mot ytterveggene og det lettere vannet mot sentrum. Oppkonsentrert slam blir matet ut av enden med skruemater. Vannet blir presset i motsatt retning og slynget ut.

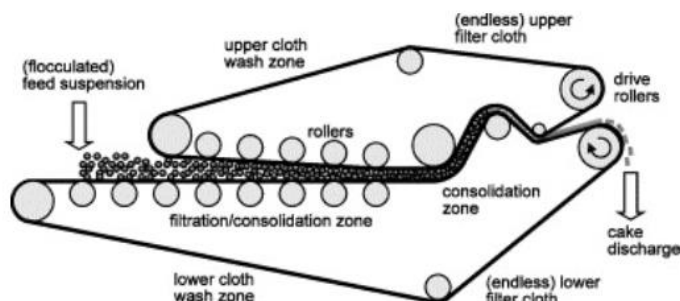


Figur 12 Dekantersentrifuge [23]

En dekantersentrifuge vil utsette partiklene for krefter 2000-4000 ganger større enn tyngdekraften. [7, 74]. Den vil kunne oppkonsentrere slammet fra omkring 10 % til 30 % tørrstoff [7, 74]. Bruk av koagulant/polymer før sentrifuge kan være nødvendig.

Silbåndspreser

Silbåndspreser presser slammet mellom et øvre og et nedre silbåndet med gradvis mindre avstand (Figur 13). Silbåndspreser kan mates kontinuerlig, og typisk tørrstoff etter pressen er 15-30% [74]. Presser av denne typen kan behøve tilsetning av koagulant/flokkulant for å fungere optimalt [74].



Figur 13 Silbåndpresse [74]

Kammerfilterpresser

Denne pressen fungerer ved at slammet presses mot en filterduk med en høytrykkspumpe. Det høye trykket presser vannet ut gjennom filteret, og en slamkake bygger seg opp på silduken. Når slamkaken er stor nok, det vil si mottrykket er høyt nok, stoppes syklusen ved å redusere trykket, og den avvannede slamkaken fjernes. Slike presser fungerer satsvis, og er har høyere kostnader enn de andre pressene [74]. Til gjengjeld produserer den lett håndterbare slamkaker som er tørrere enn fra alternative presser [74]. Typisk tørrstoff etter pressen er 40-50% [74].

Skruepressen

Slammet mates inn mellom en roterende skrue, og en silkurv som omringer skruen. Skruen er utformet på en måte som utsetter slammet for gradvis større trykk etterhvert som den transporteres gjennom pressen, og vannet presses igjennom silen. Fordeler med en slik presse er lavt vedlikeholdsbehov og driftskostnader [75, 76]. Tørrestoffinnholdet på slammet som forlater pressen vil typisk ligge på 15-20 % [75, 76].

Hjelpekjemikalier

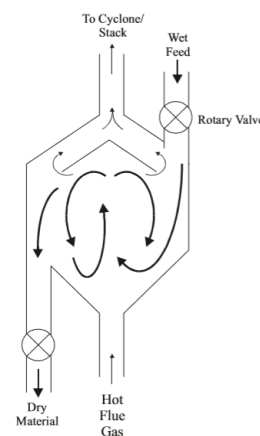
For å gjøre partiklene lettere å filtrere ut og å øke sedimentasjonshastigheten kan koagulant og flokkulant tilsettes. De tilsettes før slammet avvannes. Koagulanten gjør at fine partikler vil danne mikroflokker. Den gjør det ved å redusere den elektriske ladningen på partiklene slik at frastøtningen dem imellom blir mindre. Reduksjon av elektrisk ladning gjør at Van Der Waals krefter kan samle de små partiklene til mikroflokker. Flokkulanten vil videre binde mikroflokkene sammen til større partikler. En vanlig brukt koagulant er aluminium sulfat og flokkulanten er gjerne en type langkjedet polymer [26, 27].

Tørrking

Tørrking er en fellesbetegnelse for prosesser som hever slammets tørrestoffinnhold til mellom 40% og 100%. Disse prosessene fordamer slammets vanninnhold og er energikrevende i forhold til avvanning. For å heve tørrestoffet i slammet opp mot 90 % er det nødvendig med termisk tørrking fordi vannet foreligger på en slik måte i slammet at det kan ikke lengre fjernes mekanisk [7].

Kaskadetørker

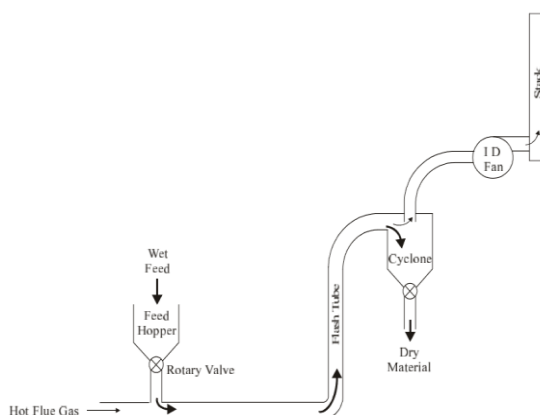
En kaskade-tørker består av en sylinder med en konisk åpning i bunn (Figur 14). Slammet blir ført inn i en lukket sylinder der varm luft, eller røykgass, strømmer igjennom fra bunn mot topp. Slammet blir holdt svevende av luftstrømmen som tørker slammet. Oppholdstiden i tørkeren reguleres av åpninger i siden på sylindere, der tørket slam blir matet ut. Den varme luften forlater sylindere på toppen. Typisk oppholdstid er rundt 2 minutter [77]. Kaskade-tørker er utsatt for korrosjon og erosjon og kan derfor trenge regelmessig vedlikehold [78].



Figur 14 Kaskade tørker [27]

Flashtørker

I en flash-tørker mates slam inn i en varm strøm av overhettet damp, røykgass eller luft med stor hastighet (Figur 15). Slammet fraktes og tørkes av varmemediet til det separeres med en syklon. Gasstrømmen vil enten forlate prosessen, eller varmes og sirkuleres tilbake i tørker. Partiklene til slammet må være små for holdes svevende gjennom tørker. Oppholdstiden i tørker ligger rundt 30 sekunder [77].



Figur 15 Flash tørker [27]

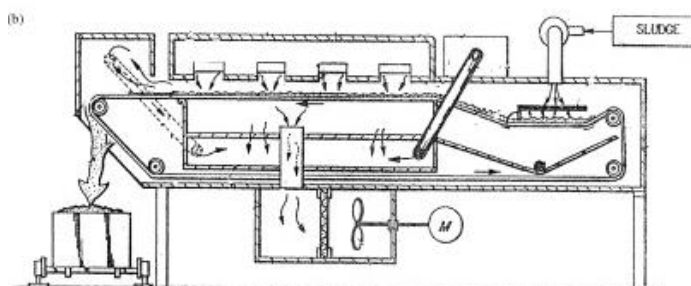
Roterende disktørker

En roterende disktørker er en indirekte tørker som fungerer ved at varmemediet pumpes igjennom en hul aksling som videre varmer slammet og fordamper vannet. Akslingen er utformet som en skrue og roterer for å sikre god kontakt mellom slam og den varme akslingen.

Båndtørker

En båndtørke benytter varm luft til å tørke slam. Slammet blir fraktet gjennom et lukket kammer på transportbånd. Varm luft pumpes inn i kammeret gjennom ventiler og fordamper vannet fra slammet (Figur 16).

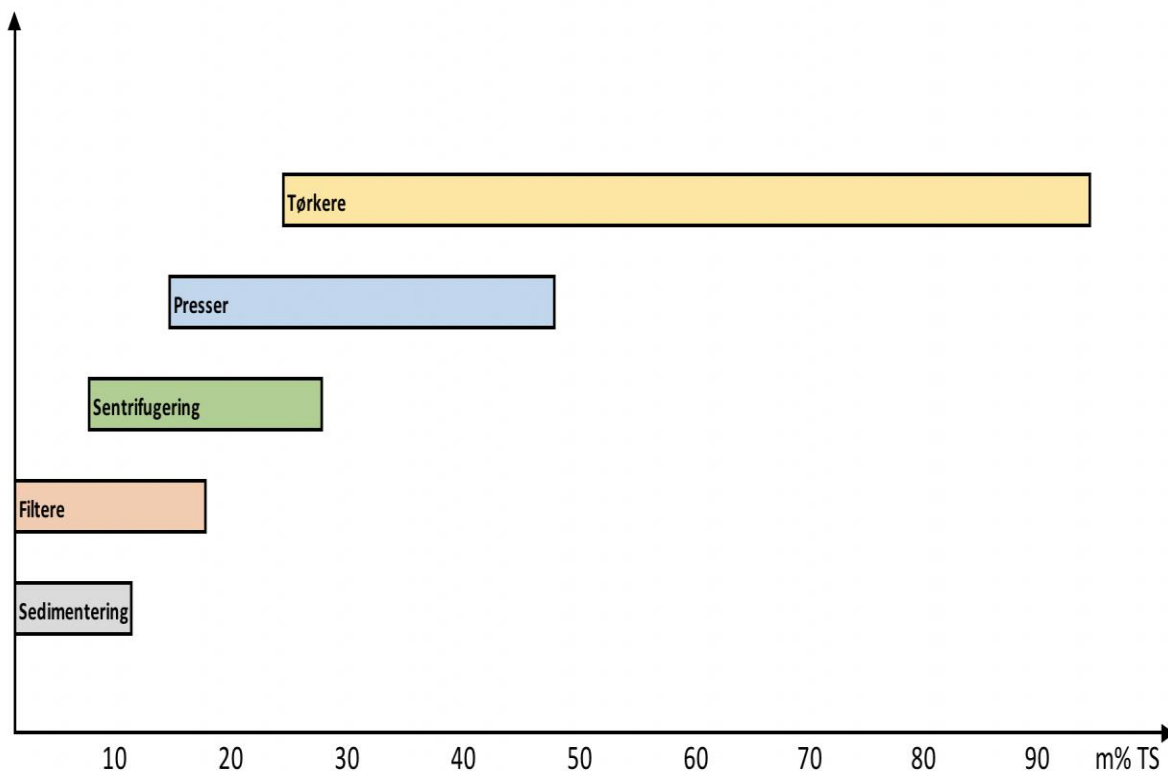
Slammet kan transporteres gjennom kammeret flere ganger før transporteres ut. Avhengig av driftsmetode kan deler av den varme luften resirkuleres eller slippes til friluft. Om båndtørkeren benyttes sammen med et forbrenningsanlegg kan avgasser derfra benyttes som varmemediet.



Figur 16 Beltetørke [29]

2.3.6.1 Oppsummering av avvanningsmetoder

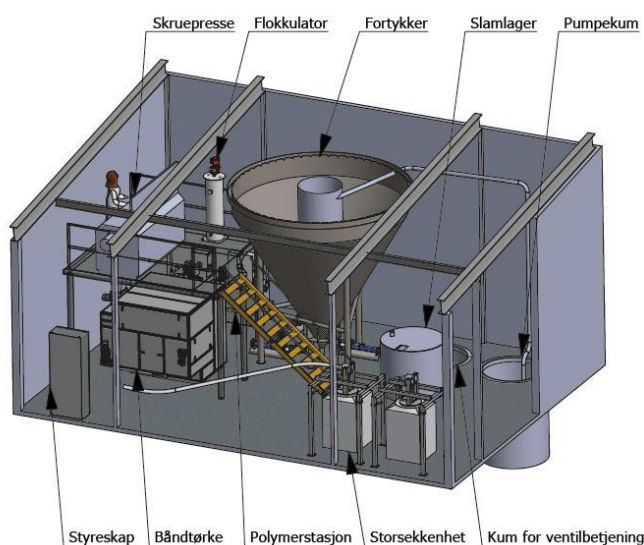
Slammet avvannes for å senke volumet, og dermed transport- og lagringskostnadene. Avvanning bør skje raskt og skånsomt for å minimere oppløsning av slammet. Dersom man vil heve tørrstoffinnholdet i slammet over 50 % må man bruke tørkere. Tørkere er energikrevende som følge av at vanninnholdet fordampes. De forskjellige metoder for avvanning er vist i Figur 17.



Figur 17 Oversikt avvanningsmetoder mht. tørrstoffinnhold

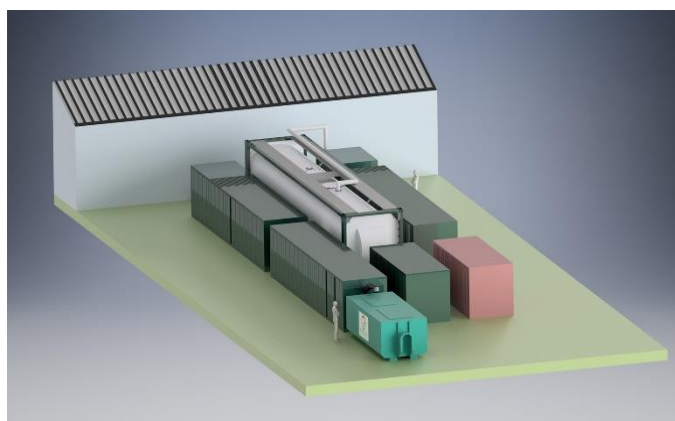
2.3.6.2 Kompaktanlegg

Kompaktanlegg er prefabrikkerte systemer som installeres ved oppdrettsanlegget. Systemene tar for seg hele slambehandlingen. De tar imot slam fra slamfangst, ca. 1% tørrstoff, og hever tørrstoff til omkring 90% [79-82]. Utformingen av systemene varierer. De består av flere integrerte prosesstrinn hvor tørrstoffet gradvis heves [79, 81, 82]. Typiske prosesstrinn i systemet kan være en kombinasjon av tilsetningstank for polymer/fiber, sedimentering, skru presse, sentrifugering og tørking (Figur 18). Systemene kan også bestå av et enkelt tørketrinn, men slammet krever da fortykket slam (ca. 10% tørrstoff) [80]. Produsenter som leverer kompaktanlegg er blant annet Scanship, Sterner, Bioretur og Multivector.



Figur 18 Sterner MAT - process, kompaktanlegg for tørking av fiskeslam [81]

Ferdig produkt er tørt pulver og lagres i storekker. Tørt slam på storekker er enkel å lagre og er lett å transportere. Kompaktanleggene kan tilpasses for å håndtere nødvendig volumstrøm og mengde fiskeslam.



Figur 19 Bioretur FRS-E, kompaktanlegg for produksjon av biogass [75]

Bioretur selger tørket fiskeslam. De hevder at tørket produkt fra deres anlegg havner i kvalitetsklasse 0, og selger det som gjødsel [79]. Slammet selges også som et tilsetningsprodukt for produksjon av biogass.

Kompaktanlegg for lokal biogassproduksjon er på markedet (Figur 19) [79, 81]. De er totalløsninger der slam fra trommelfilter behandles før det blir kjørt i bioreaktor. Et system utviklet av Bioretur, i samarbeid med Antec Biogas, vant Bioenergy Innovation Award og Innovasjonsprisen 2016 [79].

3 Praktisk del med analyser og beregninger

Dette kapitlet inneholder beregninger gjort på bakgrunn av litteraturstudie og egne analyser. Utgangspunktet for beregninger i kapittel 3 er et basisanlegg som produserer en gitt mengde slam. Forbrenningsprosess, biogass- og gjødselproduksjon skal alle behandle denne mengden slam, som danner et utgangspunkt for vurderingen av avhendingsmetodene.

I Kapittel 3.2.1 settes det opp et forslag til en forbrenningsprosess. Brennverdien og askefraksjon er bestemt ved forsøk gjort med bombekalorimeter. Det beregnes deretter effektiv brennverdi og flammetemperatur på fiskeslam. Resultater er presentert i Kapittel 3.2.6. På bakgrunn av disse resultatene utføres masse- og energibalanse. Resultatene fra masse- og energibalanse er presentert i Kapittel 3.2.9.

For å kunne vurdere forbrenning mot biogass- og gjødselproduksjon identifiseres og beregnes kritiske parametere for disse. En resultattabell for sammenligningsparametere er presenter Kapittel 3.6.

3.1 Basisanlegg

Et av målene for oppgaven er å sette opp et tenkt landbasert settefiskanlegg som levere slam til forbrenning, biogass- og gjødselproduksjon. Anlegget er resirkulerende (RAS) og produserer 10.000.000 laks i året. Laksen klekkes i anlegget og føres opp til den har en vekt på 100 gram, da den selges til havbruket som settefisk. Anlegget har slamfangst og avvanning av slam, og dette slammet skal behandles og disponeres. Beregninger av slammengde fra basisanlegg er vedlagt som Vedlegg B. Beregnede verdier ved 100% tørrstoff vises i Tabell 14.

Tabell 14 Beregnede verdier for årlig slamproduksjon i anlegget ved 100% TS

| Beregnet slam-mengde | |
|------------------------|----------|
| Slamproduksjon | 100 % TS |
| tonn/år | 177 |
| kg/døgn (Gjennomsnitt) | 485 |
| kg/h (Gjennomsnitt) | 20 |

Slamavvanning i basisanlegg

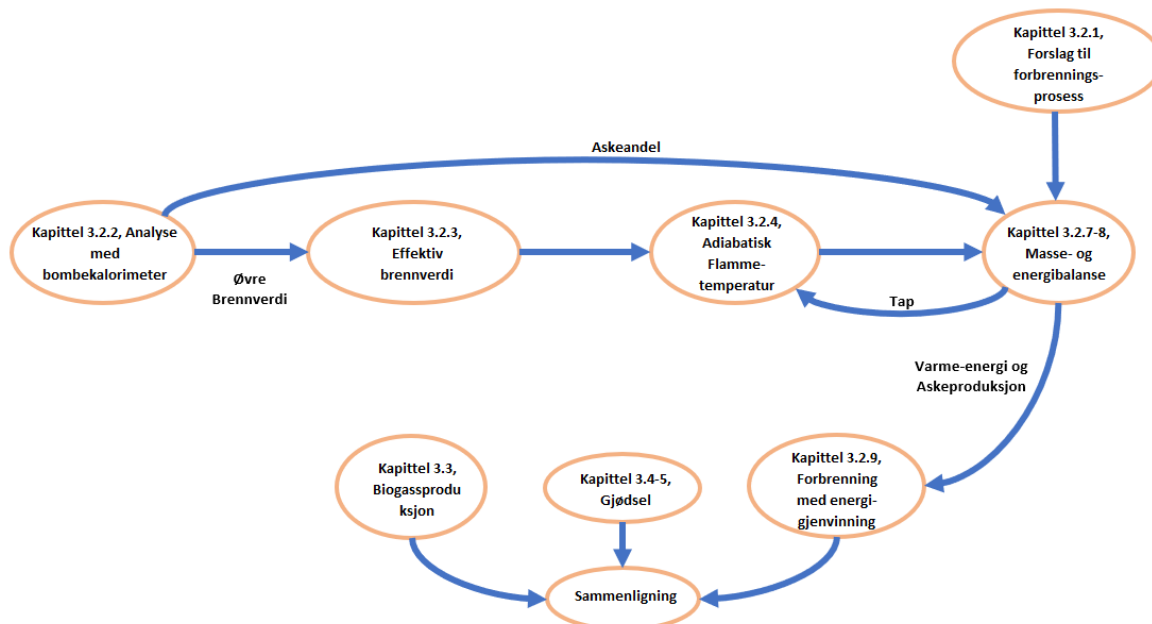
Fra fisketanken blir urent vann rensed. Slam fjernes fra vannstrømmen, og den rensede vannstrømmen vil sirkuleres tilbake til fisketank. Slammet som fjernes fra vannet har et tørrstoff på rundt 1 % og sendes til avvanning. Ved avvanning heves tørrstoff på slam gjennom et eller flere avvanningstrinn. Tørrstoff på slammet etter avvanning vil variere med avhendingsmetodene, men mengde tørrstoff vil være den samme. Det antas at renseseffekt på alle trinnene i slamavvanningen er 100 %. Det vil si at alt slammet som dannes i fisketanken sendes til avhending. Det velges ikke komponenter i basisanlegget da det ikke påvirker massebalanse. Utgangspunktet er oppsummert i Tabell 15.

Tabell 15 Data for RAS-anlegg

| Utgangspunkt | |
|------------------------------------|-------------------------|
| Anleggstype | Landbasert RAS |
| Produkt | Settefisk |
| Produksjonsvolum | 10.000.000 settefisk/år |
| Gjennomsnittlig fiskevekt ved salg | 100 g |
| Mengde slam | 177 tonn TS/år |

3.2 Forbrenning

I dette kapitlet utføres beregninger på forbrenningsprosessen. Metodikken for beregninger og etterfølgende sammenligning med alternative avhendingsmetoder, er vist i Figur 20. Figuren viser fremgangsmåten for beregninger i rapporten. Den viser også sammenhengen mellom beregnede verdier.



Figur 20 Metodikk for beregninger, analyser og sammenligninger i Kapittel 3

Det skal settes opp en tenkt forbrenningsprosess i oppgaven. Den tenkte prosessen danner grunnlaget for beregninger og analyser rundt forbrenning. Det velges ikke komponenter i anlegget, da det ikke påvirker masse og energibalansen.

Et delmål i oppgaven er å bestemme øvre brennverdi. Brennverdien er bestemt ved å utføre forsøk på fiskeslam i et bombekalorimeter. Resultatene fra bombekalorimeteret er så benyttet til å bestemme adiabatisk flammtemperatur. Adiabatisk flammtemperatur brukes videre for å bestemme hvilket tørrstoff slammet må ha for å forbrenne, og gir grunnlaget for masse- og energibalansen.

Et mål i oppgaven er å estimere dannet aske ved forbrenning av fiskeslam og innhold av tungmetaller i asken. Mengde dannet aske og tungmetallinnhold bestemmes ved bruk av bombekalorimeter og litteraturstudie. Basert på innhold av tungmetaller kan bruksområdet bestemmes.

I oppgaven er det utført av masse- og energibalanse. Disse balansene danner et sammenligningsgrunnlag som brukes til å vurdere forbrenningsprosessen. Fra energibalansen vil virkningsgraden til anlegget beregnes, og massebalansen vil bestemme mengden aske.

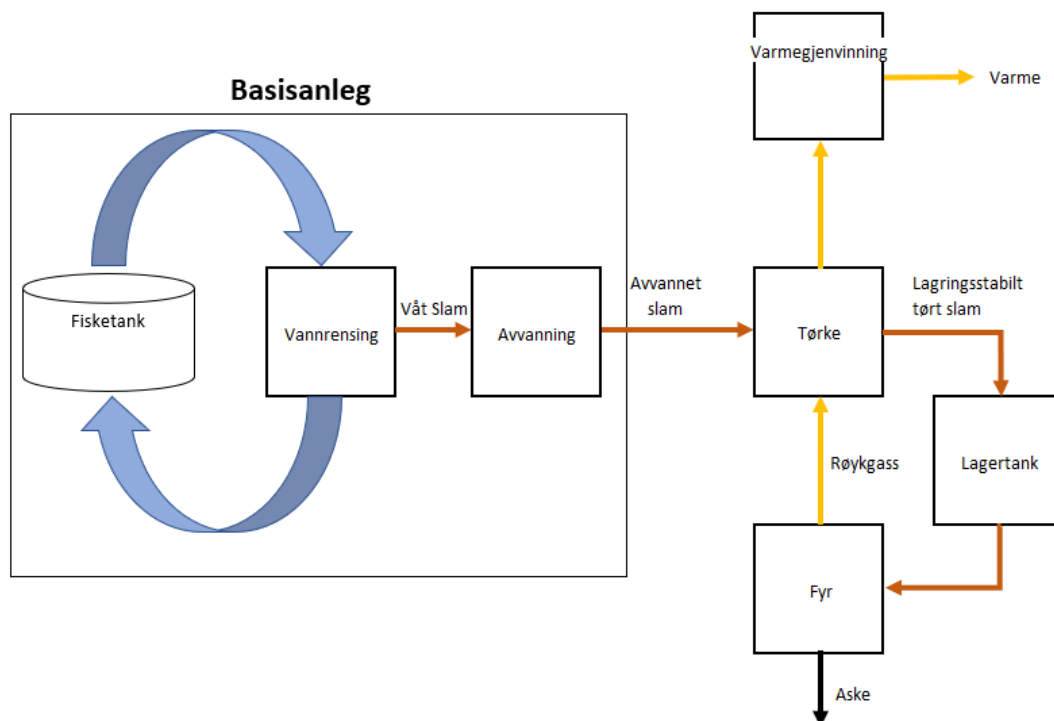
3.2.1 Forslag til forbrenningsprosess

I oppgaven skal det utarbeide et forslag for en egnet forbrenningsprosess til fiskeslam. Forbrenningsprosessen skal behandle fiskeslammengden fra basisanlegget beskrevet i foregående kapittel.

Forslaget til forbrenningsprosessen er utarbeidet for å oppfylle følgende krav:

- Prosessen bør ha muligheten for lagring av slam. Dette gir muligheten til å stoppe fyringsanlegget for vedlikehold eller lignende. Det gir også muligheten til å bare fyre ved behov, altså å stoppe forbrenningen når det ikke er noe behov for varme.
- Slammet som lagres bør være tørket. Ved lagring av vått slam vil det oppstå forråtnelse i lagringstanken som vil føre til ubehagelig lukt og forringelse av brennverdien.
- Tørkeenheten som tørker fiskeslammet bør kunne drives uavhengig av fyringsenheten. Dette gir blant annet muligheten for å gjenvinne latent varme fra tørkeenheten uten røykgasskondensering. Det gir også mulighet til å akkumulere tørket slam uten drift av fyringsenhet.

Med dette grunnlaget ble det utarbeidet et forslag til en forbrenningsprosess som oppfyller kravene over, med resultat presentert i Figur 21.



Figur 21 Blokkskjema over forbrenningsprosessen

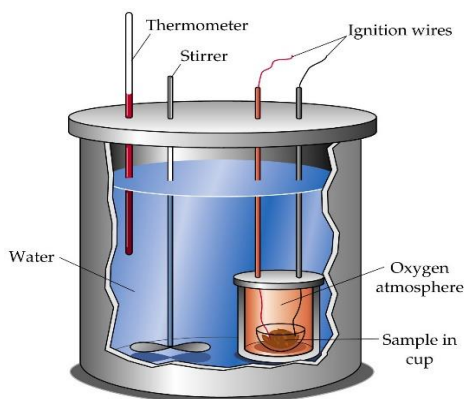
Slam fra basisanlegget fraktes til tørkeenheten hvor slammet tørkes. Tørket slam bringes til lagringstank. Fra lagertank fraktes slammet til prosessens brennkammer. I brennkammeret tilsettes forbrenningsluft med en vifte for å sikre fullstendig forbrenning. Den organiske delen av fiskeslammet forbrennes, tilsvarende 80 masse % av tørrstoffet. De resterende 20 % er uorganisk og fjernes fra brennkammer som aske. Røykgassene fra forbrenningen benyttes som varmemedium i tørke. Energien fra den varme røykgassen overføres til det fuktige slammet i tørka, som da damper av. Etter tørking kan varme fra røykgassen og avdampet vann fra tørkeenheten gjenvinnes.

3.2.2 Analyse med bombekalorimeter

Det er utført forsøk for å bestemme brennverdien til tørt fiskeslam. Forsøket ble utført med et bombekalorimeter på energilaboratoriet ved NMBU på Ås.

Teori

Mange stoffer består av fraksjoner med individuelle komponenter. For å finne brennverdien til et stoff kan en analysere det for å finne komposisjon, og deretter beregne brennverdien basert på dannelsesentalpi. Det kan i mange tilfeller være tungvint og komplisert. Uten å ta hensyn til komposisjon kan brennverdi beregnes ved hjelp av fuktighetsinnholdet og et bombekalorimeter (Figur 22).



Figur 22 Skisse av bombekalorimeter og instrumenter for å bestemme brennverdi til fiskeslam

For å kunne beregne brennverdien til et stoff med ukjent brennverdi i et bombekalorimeter trengs et referansestoff med kjent brennverdi. Det for å kalibrere bombekalorimeteret. Når referansestoffet antennes øker temperaturen i bombekalorimeter og i tilhørende vannkappe. Ved å måle temperatur i vannkappe før og etter antenningen kan temperaturøkningen beregnes. Denne temperaturøkningen brukes sammen med kjent brennverdi i referansestoff for å beregne varmekapasiteten til bombekalorimeter. Det vil si hvor mye energi som trengs for å heve temperaturen i bombekalorimeter 1 K, vist i Formel 7.

$$C_b = \frac{Q}{(T_2 - T_1)} \quad (7)$$

- C_b er varmekapasitet til bombekalorimeter i J/K
- Q er avgitt energi fra referansestoff i J
- T_2 er sluttemperatur i vannkappe etter antenning i K
- T_1 er starttemperatur i vannkappe før antenning i K

Ettersom bombekalorimeteret består av en oksygenfylt metallbeholder og en vannkappe vil apparatets totale varmekapasitet beregnes. Komponentenes varmekapasitet beregnes ikke separat i forsøket da det ikke er relevant for resultatet.

Når et stoff med ukjent brennverdi og kjent vekt antennes i samme bombekalorimeter måles igjen temperaturøkningen. Brennverdien kan da beregnes slik det er vist i Formel 8.

$$Q = C_b(T_2 - T_1) \quad (8)$$

- Q er avgitt energi fra antent stoff i J
- C_b er varmekapasitet til bombekalorimeter beregnet i Formel 1 i J/K
- T_2 er sluttemperatur i vannkappe etter antenning i K
- T_1 er starttemperatur i vannkappe før antenning i K

Brennverdien som beregnes i et bombekalorimeter er øvre brennverdi. Det vil si at produsert vann i reaksjonen er i væskefase, i motsetning til nedre brennverdi der produsert vann er i gassfase. I bombekalorimeteret er forbrenningskammeret forseglet ved en temperatur under kokepunkt. Dampen som produseres i reaksjonen kondenserer i bomben, og energien fra kondensasjonen bidrar til den målte temperaturøkningen.

Når den frigitte energimengden er målt, kan øvre brennverdi beregnes med Formel 9.

$$H_\phi = \frac{Q}{m} \quad (9)$$

- Q er avgitt energi fra antent stoff i J
- m er masse til det forbrente stoffet
- H_ϕ er stoffets øvre brennverdi

Fiskeslam i forsøket

Det ble hentet fiskeslam fra «Senter for fiskeforsøk» ved NMBU på Ås. Senter for fiskeforsøk er et ferskvanns RAS-settefiskanlegg der det oppfostres laks. Slammet ble satt i tørkeskap innen 1 time fra den ble oppsamlet, for å forhindre nedbrytning av slammet. Slammet var i tørkeskap i 24 timer på 110 °C for å sikre at slammet var tørt før analysen ble gjort.

Metode

Det første som ble gjort var å bestemme varmekapasiteten til bombekalorimeteret. Det ble bestemt ved å brenne et referansestoff med kjent brennverdi. I forsøket benyttes benzosyre i pilleform som referansestoff. Øvre brennverdi til benzosyre er oppgitt til 26,454 MJ/kg. Massen til referansestoffet veies nøyaktig på vekt. Prøven håndteres med pinsett slik at massen til prøven endres så lite som mulig. Prøven med benzosyre ble lagt ned i skålen som var festet i lokket til bombesylindren. Tenntråden som skal antenne prøven ble festet i kontakt med prøven for å sikre at stoffet ble antent. Massen til tenntråden var veid for å avgjøre brennverdien til tenntråden, som i beregningene ble trukket fra brennverdien. Lokket førtes forsiktig over bombesylindren og ble skrudd igjen.

2000 g vann ble veid ut i et metallbeger, vannkappen. Vannet har stått i rommet sammen med bombekalorimeteret, slik at det ikke er temperaturforskjeller mellom utstyret og vannet. Begeret med vann ble plassert i bombekalorimeteret. Bomben fylles med rent oksygen til trykket i bombe er på 2,0 MPa før den føres ned i vannkappe. Når bomben er plassert i begeret ble lokket over vannkappe lagt på.

I lokket er det et hull der temperaturføler monteres. Denne føleren senkes ned i vannkappen som bomben plassert i. Videre ble omrøring startet. Omrøring er montert på lokket med en rørepinn som går ned i vannkappen. Denne drives av en motor og sørger for sirkulasjon i vannbadet, slik at vi får en uniform temperatur. Før prøven kan antennes må temperaturen i bombekalorimeteret stabilisere seg. Det tok omkring 5 minutter før temperaturen var stabil. Når temperaturen var stabil ble prøven antent. Temperaturøkningen ble loggført når temperaturen var stabil.

Med kjent brennverdi og temperaturøkning kan varmekapasiteten til bombekalorimeteret beregnes. Prosedyren ble så gjentatt med en innveid prøve for fiskeslam, og med kjent varmekapasitet for bombekalorimeter ble brennverdi beregnet.

Det ble kjørt 1 referanseprøve og 6 paralleller med prøver av fiskeslam for å bestemme varmekapasitet og brennverdi. Varmekapasitet var i utgangspunktet kjent fra tidligere, og kalibrering ble gjort for å bekrefte tidligere resultater.

Resultater - Kalibrering

Kalibreringen ble kjørt og varmekapasiteten C_B ble beregnet i henhold til Formel 7. Resultatet er vist i Tabell 16.

Tabell 16 Målte og beregnede verdier ved antenning av referansestoff

| Størrelse | Verdi | Enhet |
|-----------------------|--------|-------|
| Vekt referansebrensel | 1030,7 | mg |
| Spesifikk brennverdi | 26,454 | MJ/g |
| Avgitt energi | 27,27 | kJ |
| Temp før | 17,8 | °C |
| Temp etter | 20,4 | °C |
| Varmekapasitet | 10,44 | kJ/K |

Resultater - Beregning av brennverdien og askeandel i fiskeslam

Øvre brennverdi er beregnet med Formel 9. Askeandel er beregnet ved veiing av beholder for fiskeslam før og etter antenning. En oppsummering av resultatene er vist i Tabell 17. Fullstendig data fra forsøket er Vedlegg C i oppgaven.

Tabell 17 Beregnede verdier for fiskeslammets øvre brennverdi og askeandel

| Prøve nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Gjennomsnitt | Enhet |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|
| Vekt fiskeslam TS | 1027,7 | 1062,5 | 1084,9 | 1090,7 | 1238,4 | 1020,6 | | mg |
| Øvre Brennverdi | 24314 | 19564 | 19175 | 15242 | 15113 | 17345 | 18459 | kJ/kg |
| Aske | 119,4 | 170,4 | 122,6 | 261,48 | 246,3 | 220,8 | | mg |
| Askeandel | 0,12 | 0,16 | 0,11 | 0,24 | 0,2 | 0,22 | 0,175 | Fraksj |

Diskusjon

Øvrebrennverdi ble beregnet for seks prøver med tørt fiskeslam. Det oppstod noen feilkilder under bestemmelse av brennverdi. Termometer som var tilgjengelig hadde lav oppløsning noe som påvirker nøyaktigheten av resultatene. Ønsket termometer hadde 1/1000 °C oppløsning, brukt termometer hadde 1/10 °C oppløsning. På grunn av lav oppløsning påvirket ble varmekapasitet og dermed brennverdi påvirket. Fra tidligere øvelser med bombekalorimeter var forventet varmekapasitet på bombekalorimeter rundt 10,2 kJ/K.

Det var en mindre lekkasje av O₂ fra bombebeholder. Det antas ikke at denne hadde stor påvirkning på resultatet, da samtlige prøver og kalibrering ble kjørt under samme forhold.

På bakgrunn av feilkildene er beregnede brennverdier uten stor grad av nøyaktighet. Ved oppsamling av tørket slam ble det forsøkt å få en representativ homogen prøve. Det var noen ansamlinger i tørket prøve, hvilket kan forklare de sprikende resultatene. Det er usikkert hvor mye, hvis noe, uspist fôr var i prøve. Uspist fiskefôr har en brennverdi på omkring 25 MJ/kg [28], hvilket kan forklare den relativt høye verdien på prøve 1.

Estimering av uorganisk stoff i prøve ble gjort. Resultatene lå mellom 11 og 24 % av prøvevekten. Ved estimering av aske ble vekten av prøvebeholder veid før og etter antenning, og det antas at all aske lå i beholder. Det så ut som det var spor av aske i bombebeholder, utenfor prøvebeholder, men ved øyemål så denne mengden ut til å være liten. Det antas at mengde aske antagelig er noe større enn beregnet verdi, endog ikke mye.

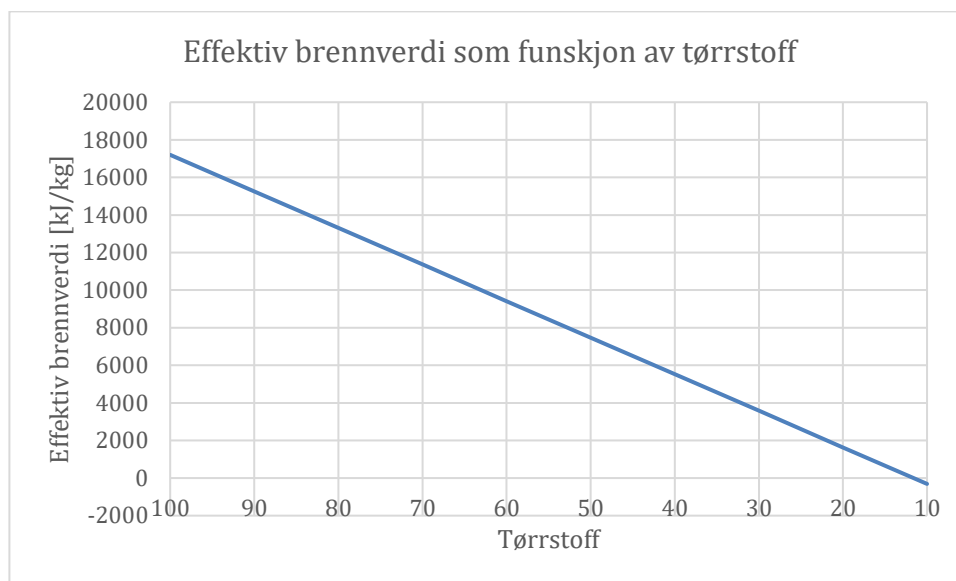
Konklusjon

Ett gjennomsnitt av resultatene for øvre brennverdi ga 18,5 MJ/kg. De sprikende resultatene kan tyde på at ansamlinger av spillfôr preget noen av prøvene. Litteratur hevder en brennverdi rundt 20 MJ/kg TS [21, 28, 43], noe som sammenfaller bra med resultatene fra analysen. Andel aske fra analysen ble beregnet til gjennomsnittlig 17,5 masse prosent av tørrstoff. Dette er kun et estimat, da presis måling ikke ble utført. Litteraturen hevder askeandel mellom 11,6 til 19,2 % tørrstoff ved forbrenning [21], noe som sammenfaller relativt godt med resultatene i analysen.

3.2.3 Effektiv brennverdi

Effektiv brennverdi skal beregnes i oppgaven. For å beregne effektiv brennverdi benyttes øvre brennverdi fra forsøk med bombekalorimeter, og støkiometri av fiskeslam fra litteratur. Effektiv brennverdi beregnes for å bestemme avgitt energi fra forbrenningen. Fra avgitt energi kan flammtemperatur beregnes og dermed nødvendig tørrstoff på fiskeslam ved forbrenning.

Effektiv brennverdi beregnes med Formel 2, og vises som funksjon av tørrstoffinnhold i Figur 23. Forbrenningen vil kun fungere om effektiv brennverdi er positiv.



Figur 23 Effektiv brennverdi som funksjon av tørrstoff for fiskeslam

Ved beregning av effektiv brennverdi kommer det frem at fiskeslam må ha et tørrstoffinnhold på over 11,6 % for å forbrenne. Effektiv brennverdi ved 100 % tørrstoff og er beregnet til 17 200 kJ/kg. Ved 100 % tørrstoff er effektiv brennverdi den samme som nedre brennverdi.

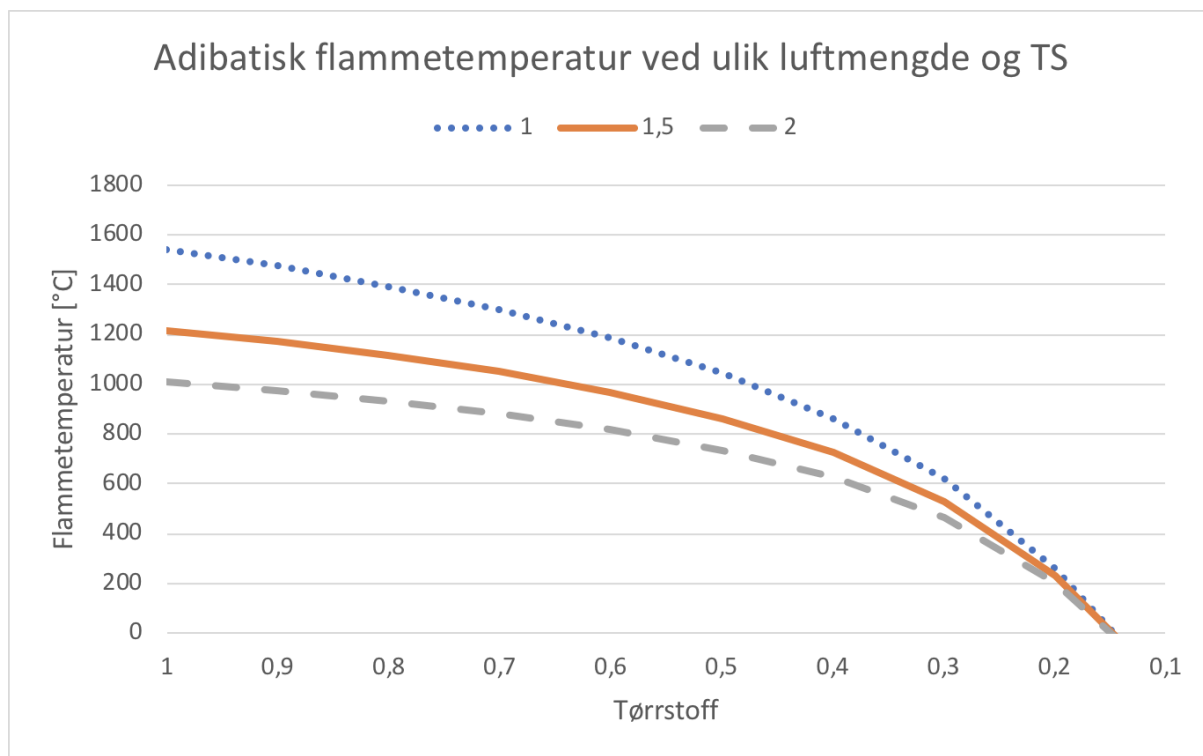
Ved å sammenligne brennverdien med andre brensler kommer det frem at fiskeslam har høyere brennverdi enn tørt ved, og omkring samme verdi som brunkull (Tabell 18).

Tabell 18 Nedre brennverdi for fiskeslam sammenlignet med ulike brensler [83]

| Brennstoff | Nedre brennverdi [MJ/kg] |
|------------------|--------------------------|
| Hydrogen | 122 000 |
| Tørr torv | 13 000 |
| Tørr ved | 14 500 |
| Brunkull | 17 000 |
| Metan | 23 200 |
| Koks | 30 000 |
| Antrasitt | 33 000 |
| Lett fyringsolje | 44 000 |

3.2.4 Adiabatisk Flammentemperatur

Fra resultater av effektiv brennverdi beregnes adiabatisk flammentemperatur. Den adiabatiske flammentemperaturen bestemmer temperaturen i brennkammer og vil legge føringer for hvilket tørrstoff slammet må ha for å forbrenne. Flammentemperaturen må være høy nok til at slammet antennes. Flammentemperaturen beregnes ved å løse Formel 5 for temperatur. Dette er gjort iterativt med bruk av Microsoft Excel, med resultater presentert i Figur 24.



Figur 24 Grafisk fremstilling av adiabatisk flammentemperatur som funksjon av tørrstoffinnhold og vist med tre forskjellige støkiometriske overskudd av luft.

Fra Figur 24 kommer det frem at temperaturen er sterkt avhengig av tørrstoffet til slammet. Fra litteraturen er det hevdet at temperaturen i brennkammer bør være over 800 °C for å oppnå forbrenning. Ved et oksygenoverskudd på 1,5 over støkiometrisk mengde må tørrstoffet være minimum 45 % for å oppnå dette.

3.2.5 Estimering av tungmetallinnhold i aske

Innhold av tungmetaller avgjør hvilken kvalitetsklasse asken havner i og dermed i hvilken grad det kan benyttes som gjødsel. Er tungmetallinnholdet over kvalitetsklasse III må asken deponeres. Disse verdiene beregnes og presenteres i dette kapitlet.

Fra forsøk gjort med bombekalorimeter, resultater vist i Tabell 17, ble det målt en askeandel på 17,5%. Det antas under forsøk med bombekalorimeter at mengde aske kan være noe større. Ved å sammenligne dette med tilgjengelig litteratur, ble det bestemt at 20% er et konservativt anslag for askeinnholdet i fiskeslam.

Fra litteraturen kommer det frem at tungmetallene vil bli gjenværende i asken. Tungmetallinnholdet i asken bestemmes ved formel 10.

$$X_{Aske} = \frac{X_{slam}}{A_{slam}} \quad (10)$$

- X_{aske} er konsentrasjonen av tungmetallet i asken
- X_{slam} er konsentrasjonen av tungmetallet i slammet bestemt i forsøk av kystlab, Eurofins og nibio (Tabell 4)
- A_{slam} er askeandel i slammet

Tabell 19 Beregnet tungmetallkonsentrasjon i asken etter forbrenning av fiskeslam. Konsentrasjonene er estimert på bakgrunn av en tørrstoffreduksjon på 80 % ved forbrenning. Konsentrasjonene er beregnet med utgangspunkt i Tabell 4.

| Stoff | Aske kystlab (Beregnet) | | Aske Eurofins (Beregnet) | | Aske NIBIO (Beregnet) | |
|-----------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse |
| Krom | 19,55 | 0 | 34,50 | 0 | 24,00 | 0 |
| Sink | 1790 | III< | - | - | 2050 | III< |
| Kobber | 80,00 | I | - | - | 110,0 | I |
| Nikkel | 4,85 | 0 | <2,50 | 0 | 6,00 | 0 |
| Kvikksølv | <5,00 | III | 0,30 | I | 0,19 | 0 |
| Kadmium | 3,15 | III | 4,45 | III | 3,85 | III |
| Bly | <5,00 | 0 | <2,50 | 0 | 2,95 | 0 |

Tabell 19 viser beregnet tungmetall i asken, basert på tre ulike analyser av fiskeslam. Det kommer frem at asken ikke vil kunne brukes på jordbruksarealer i noen av tilfellene. Med grunnlag i analysene fra NIBIO og kystlab må asken deponeres, mens med Eurofins analyse som utgangspunkt kan asken brukes på grøntarealer. Sink og Kadmium er problemet i alle tilfeller. I tillegg er det høyt kvikksølvinnhold i analysen fra kystlab.

Det som ikke fremkommer av beregningene er at asken vil skille seg i fraksjoner, hvorav fin flyveaske vil inneholde det meste av tungmetallene. Dersom denne fraksjonen kan skilles fra de resterende kan trolig bunnasken og deler av flyveasken kunne brukes som gjødsel under gjeldende forskrift. Forsøk må gjøres på fiskeslammets aske for å bestemme fordeling av aske og tungmetaller.

3.2.6 Oppsummering av resultater fra analysen

Det er vist at både brennverdien og den adiabatisk flammemetemperaturen for fiskeslam tilsier at fiskeslam er anvendbart som eneste brensel i et desentralisert forbrenningsanlegg. Askeandelen er bestemt til 20 masse % og har et tungmetallinnhold over krav til kvalitetsklasse III. Ubehandlet må asken deponeres.

Basert på beregninger av effektiv brennverdi og adiabatisk flammemetemperatur er det valgt 25 % tørrstoff på avvannet slam og 90 % tørrstoff på tørket slam.

- Avvannet slam på 25 % tørrstoff er valgt da det har en positiv brennverdi (>11.6 % TS, Figur 23) og kun krever to avvanningstrinn (Figur 17). Færre trinn ved avvanning reduserer investerings- og driftskostnader.
- Tørket slam på 90 % tørrstoff er valgt da det er ikke brytes ned under lagring. Flammemetemperaturen blir da også høy nok til å oppnå forbrenning (>45 % TS, Figur 24). Ved 90 % tørrstoff er det beregnet adiabatisk flammemetemperatur på ca. 1560 °C. Denne temperaturen beregnes på nytt senere i oppgaven inklusive varmetap fra fyringsenhet (kapittel 3.2.8.3). Det vil redusere flammemetemperaturen.

Resultatene er presentert i Tabell 20.

Tabell 20 Resultater fra forbrenning av fiskeslam

| Parameter | Verdi |
|---|---|
| Øvre Brennverdi | 18,5 MJ/kg |
| Nedre Brennverdi | 17,2 MJ/kg |
| Effektiv brennverdi ved 90 % TS | 15,2 MJ/kg |
| Adiabatisk flammemetemperatur ($F=1,5$) | 1560 °C ($y = -2,9097 \cdot X_{TS}^3 + 27,271 \cdot X_{TS}^2 - 135,77 \cdot X_{TS} + 1343$) |
| Askeandel | 20 m% |
| Kvalitetsklasse aske | III< |

F er støkiometrisk O₂ overskudd

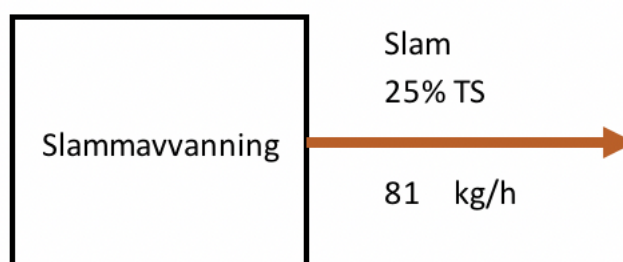
X_{TS} massefraksjonen tørrstoff i slammet

III< over kvalitetsklasse III

3.2.7 Massebalanse

En av delmålene i oppgaven er å beregne massebalanse for forbrenningsprosessen. Massebalansen for anlegget er beregnet for å bestemme mengden reaktanter og produkter under forbrenning, i tillegg til askemengde og avdampnet vann under tørking. Slammengdene er beregnet med utgangspunkt i antall settefisk og gjennomsnittsverken til disse (Tabell 15). Slammengden i et virkelig anlegg vil variere i løpet av døgnet og året. Disse variasjonene fremkommer ikke av denne beregningen.

Fra Tabell 14 fremkommer at fyringsanlegget skal forbrenne 20 kg tørt slam per time, som tilsvarer 81 kg slam med 25% TS (Figur 25).



Figur 25 Slam til tørke

3.2.7.1 Tørking

Tørrestoffet på slammet etter avvanning er 25 % og mengde tørrestoff er 20,2 kg/h. Mengde slam til tørking er beregnet i Formel 11

$$m_{slam,25\% TS} = \frac{m_{slam,tørt}}{X_{TS}} \quad (11)$$

- $m_{slam,25\% TS}$ er mengde slam ved 25 % tørrestoff
- $m_{slam,tørt}$ er mengde tørt slam
- X_{TS} er massefraksjon tørrestoff.

Over tørking heves tørrestoff til 90 %. Mengde slam er beregnet i Formel 12

$$m_{slam,90\% TS} = \frac{m_{slam,tørt}}{X_{TS}} \quad (12)$$

- $m_{slam,90\% TS}$ er mengde slam ved 90 % tørrestoff
- $m_{slam,tørt}$ er mengde tørt slam
- X_{TS} er massefraksjon tørrestoff

Energien i røykgassen brukes til å tørke inngående slam. Tørrstoffet heves fra 25 til 90 %. Det innebærer at avdampet vann følger med røykgassen etter tørking. Mengde avdampet vann beregnes i Formel 13

$$m_{\text{avdampet}} = m_{\text{slam},25\% \text{ TS}} - m_{\text{slam},90\% \text{ TS}} \quad (13)$$

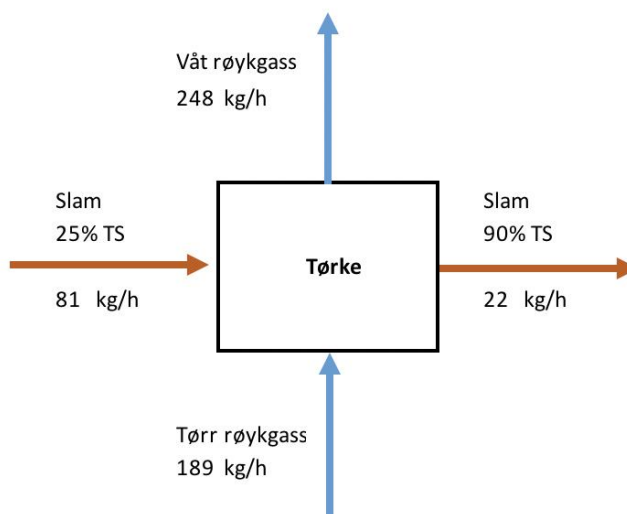
- m_{avdampet} er mengde avdampet vann per time,
- $m_{\text{slam},25\% \text{ TS}}$ er mengde slam ved 25% tørrstoff beregnet i formel 11
- $m_{\text{slam},90\% \text{ TS}}$ er mengde slam ved 90 % tørrstoff beregnet i formel 12

Alle resultater fra massebalanse over tørke er presentert i Tabell 21.

Tabell 21 Beregnede verdiene for massebalansen gjennom tørke

| | Til tørke | Avdampet | Fra Tørke |
|---------------|-----------|----------|-----------|
| Mengde [kg/h] | 81 | 58 | 22 |
| TS [m%] | 25% | - | 90% |

Ved direkte tørking vil den fordampede vannmengden forlate tørka sammen med røykgassen som damp. Røykgassen som forlater tørka beskrives derfor som «våt røykgass». Et blokkskjema over tørke vises i Figur 26.



Figur 26 Massebalanse over tørke

3.2.7.2 Forbrenning

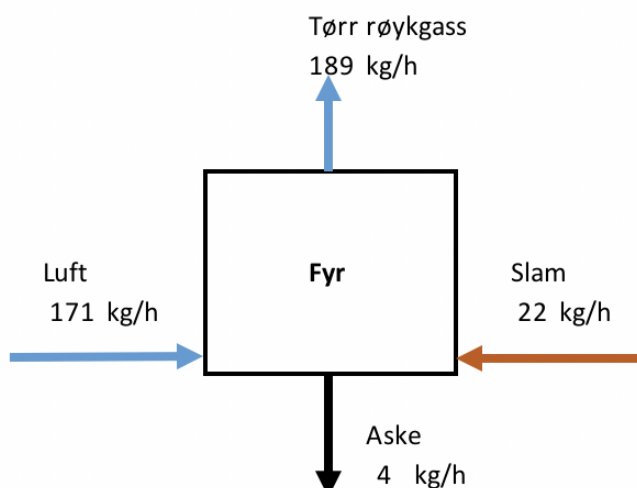
Ved bruk av de støkiometriske beregningene i Kapittel 2.3.2 kan molar massestrøm beregnes for forbrenningen i fyren. Det antas at det kun er den organiske delen som brenner, hvilket utgjør 80 % av tørrstoffet, den resterende delen danner aske. Resultatene fra forbrenningen er vist i Tabell 22 og Tabell 23. De viser henholdsvis reaktanter og produkter over fyringsenheten. Figur 27 illustrerer massebalanse til fyringsenheten.

Tabell 22 Beregnede verdier for mengder inn i fyringsenheten

| Reaktanter inn i fyringsenhet | Mengde | Enhet |
|--------------------------------|--------|-------|
| Slam (TS) | 20,2 | kg/h |
| O ₂ (50% overskudd) | 39,9 | kg/h |
| N ₂ | 131 | kg/h |
| H ₂ O | 2,25 | kg/h |

Tabell 23 Beregnede verdier for mengde ut av fyringsenhet

| Produkt ut av fyringsenhet | Mengde | Enhet |
|----------------------------|--------|-------|
| CO ₂ | 29,7 | kg/h |
| H ₂ O | 13,9 | kg/h |
| N ₂ | 133 | kg/h |
| O ₂ | 13,3 | kg/h |
| Sum røykgasser | 189 | kg/h |
| Aske | 4,04 | kg/h |



Figur 27 Massebalansen i fyrens enhet

3.2.8 Energibalanse

Energibalansen er beregnet i dette kapitlet. Innfyrt effekt er beregnet fra brennverdi og massebalanse, og er utgangspunktet for forbrenningen. Varme til tørking og tap fra fyringsenhet beregnes. Resterende effekt kan gjenvinnes, med eller uten kondensering. Begge disse verdiene er beregnet. Alle resultatene summeres opp i Kapittel 3.2.9.

3.2.8.1 Forbrenning

I fyringsenheten frigjøres en energimengde tilsvarende slammets brennverdi. Effekten fra forbrenningen er beregnet med Formel 14. Det antas fullstendig forbrenning.

$$P_{fyr} = H_{e,90\%TS} * \dot{m}_{slam} \quad (14)$$

- P_{fyr} er innfyrt effekt
- $H_{e,90\%TS}$ er effektiv brennverdi for slammets ved 90 % tørrstoff
- \dot{m}_{slam} er massestrøm til forbrenning per tidsenhet, i.h.t. massebalansen

Verdier og resultat fra beregning av innfyrt effekt er vist i Tabell 24.

Tabell 24 Verdier og resultat for beregninger av innfyrt effekt

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|-------------------------|-----------|-------|--------------|
| H_e | 15 200 | kJ/kg | Målt |
| $\dot{m}_{slam,90\%TS}$ | 22,4 | kg/h | Massebalanse |
| P_{fyr} | 95,0 | kW | Beregnet |

3.2.8.2 Tørking

Frigjort energi fra forbrenning benyttes til å tørke slam før forbrenning. Tørking av slam kan skje direkte ved bruk røykgassene, eller ved indirekte ved bruk av varmeveksler. Det antas i beregningene ingen tap ved tørking. I tørke heves tørrstoff fra 25 til 90 %. Nødvendig effekt for få til dette beregnes i Formel 15.

$$P_{tørking} = \dot{m}_{avdampet} * H_{vap} \quad (15)$$

- $P_{tørking}$ er nødvendig effekt for å tørke slam
- $\dot{m}_{avdampet}$ er mengde vann avdampet per tidsenhet, i.h.t. massebalansen
- H_{vap} er fordampingsentalpi for vann

Verdier og resultat fra beregning av effektbehov til tørking er vist i Tabell 25

Tabell 25 Verdier og resultat for beregning av effektbehovet i tørke

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|-----------------------|-----------|-------|--------------|
| m_{avdampet} | 58,4 | kg/h | Massebalanse |
| H_{vap} | 2257 | kJ/kg | [84] |
| $P_{\text{tørking}}$ | 36,6 | kW | Beregnet |

3.2.8.3 Tap

Fyringsenheten er ikke adiabatisk og varmetap fra forbrenningsenheten er beregnet. Ettersom det er en tenkt prosess er beregnede verdier estimerer. Tapene som er beregnet strålingstap, konveksjonstap, asketap og slamtap. Varmetap under forbrenning vil påvirke flammtemperatur og termisk virkningsgrad. Arealet på ovnen er estimert til 8 m² basert på små-skala pelletsovn i energilaboratoriet ved NMBU på Ås. Omgivelsestemperatur er valgt til 25 °C.

Strålingstap

Stråletap fra ovnen vil forekomme som beskrevet av Steffan-Boltzmann lov vist i Formel 16.

$$P_{\text{tap, stråling}} = A * \varepsilon * \sigma * (T_{\text{ovn}}^4 - T_{\text{omgivelser}}^4) \quad (16)$$

- $P_{\text{tap, stråling}}$ er strålingstapet i W
- A er den strålende overflatens areal i meter
- ε er den strålende overflatens emissivitet
- σ er Steffan-Boltzmanns konstant
- T_{ovn}^4 er absolutt temperatur på ovnens overflate i fjerde potens
- $T_{\text{omgivelser}}^4$ er absolutt temperatur på omgivelsene i fjerde potens

Verdier og resultat fra beregning av strålingstap er vist i Tabell 26.

Tabell 26 Verdier og resultat for beregning av strålingstap

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|----------------------------|------------------------|------------------------------------|----------|
| ε | 0,83 | | [85] |
| σ | $5,6703 \cdot 10^{-8}$ | W/(m ² K ⁴) | [86] |
| $T_{\text{omgivelser}}^4$ | 7886150416 | K ⁴ | Valgt |
| T_{ovn}^4 | 19356878641 | K ⁴ | Valgt |
| A | 8 | m ² | Valgt |
| $P_{\text{tap, stråling}}$ | 4,32 | kW | Beregnet |

Konveksjonstap

Konveksjonstapet oppstår som følge av temperaturforskjellen mellom ovnen og luften rundt. Dette tapet kan minimaliseres ved hjelp av isolering. Konveksjonstapet uttrykkes som vist i Formel 17.

$$P_{tap,konveksjon} = h * A * \Delta T \quad (17)$$

- A er den overflatens areal i meter
- ΔT er temperaturforskjellen på den overflaten og omgivelsene
- h er overflatens varmeovergangstall ($W/(m^2 \cdot K)$)

Verdier og resultat fra beregning av konveksjonstap er vist i Tabell 27.

Tabell 27 Verdier og resultat for beregning av konveksjonstap

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|----------------------|-----------|-------------------|----------|
| h | 34 | $W/(m^2 \cdot K)$ | [87] |
| ΔT | 75 | K | Valgt |
| A | 8 | m^2 | Valgt |
| $P_{tap,konveksjon}$ | 20,4 | kW | Beregnet |

Aske-tap

En del av den frigjorte energien vil forlate systemet som varme i asken. Denne varmen vil ikke kunne utnyttes eller gjenvinnes. Dette varmetapet, $P_{tap,aske}$, beregnes ved bruk av Formel 18

$$P_{tap,aske} = \dot{m}_{aske} * C_{p_{aske}} * \Delta T \quad (18)$$

- \dot{m}_{aske} er massestrømmen av aske
- $C_{p_{aske}}$ er askens varmekapasitet
- ΔT er temperaturforskjell på asken og omgivelsene

Verdier og resultat fra beregning av asketap er vist i Tabell 28.

Tabell 28 Verdier og resultat for beregning av asketap

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|------------------|-----------|-------------------|-------------------------|
| \dot{m}_{aske} | 4,0 | kg/h | Massebalanse |
| ΔT | 1300 | K | Adiabatisk flammentemp. |
| $C_{p_{aske}}$ | 0,84 | $kJ/(kg \cdot K)$ | [88] |
| $P_{tap,aske}$ | 1,23 | kW | Beregnet |

Slam-tap

Dersom man lagrer det varme slammet fra tørkingen i en lagertank over lengere tid, vil det oppstå et tap i form av varme. Dette tapet beregnes ved bruk av Formel 19.

$$P_{tap,slam} = \dot{m}_{slam} * C_{p_{slam}} * \Delta T \quad (19)$$

- \dot{m}_{slam} er massestrømmen av slam,
- $C_{p_{slam}}$ er slammets varmekapasitet
- ΔT er temperaturforskjell på slammet inn og ut av lagertanken. Temperatur inn til lagertank er 100 °C og temperatur ut er 25 °C.

Verdier og resultat fra beregning av slamtap er vist i Tabell 29.

Tabell 29 Verdier og resultat for beregning av slamtap

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|------------------|-----------|-----------|--------------|
| \dot{m}_{slam} | 22,5 | kg/h | Massebalanse |
| ΔT | 75 | K | Valgt |
| $C_{p_{slam}}$ | 1,4 | kJ/(kg*K) | [89] |
| $P_{tap,slam}$ | 0,5 | kW | Beregnet |

3.2.8.4 Totalt tap

Tapene kan nå summeres for å finne det totale tapet fra fyringsenheten. Det er beregnet i formel 20 og resultatene er vist i Tabell 30.

$$P_{tap} = P_{tap,stråling} + P_{tap,konveksjon} + P_{tap,aske} + P_{tap,slam} \quad (20)$$

Tabell 30 Resultatene fra beregning av tapene i fyringsanlegget

| Verdi | Størrelse | Enhet |
|----------------------|-----------|-------|
| $P_{tap,stråling}$ | 4,32 | kW |
| $P_{tap,konveksjon}$ | 20,4 | kW |
| $P_{tap,aske}$ | 1,23 | kW |
| $P_{tap,slam}$ | 0,5 | kW |
| P_{tap} | 26,4 | kW |

3.2.8.5 Varmegjenvinning

Energi fra forbrenningsprosessen kan gjenvinnes. Varmegjenvinning kan gjøres ved å utnytte følbare og latent energi i røykgassen. Varmegjenvinning vil påvirke den termiske virkningsgraden til anlegget og gjenvinning av følbare og latent varme er beregnet i dette kapittelet. Beregninger for å bestemme gjenvunnet varme er utført i et idealisert tilfelle uten tap ved varmeoverføring.

Gjenvinning uten kondensering av våt røykgass

Gjenvunnet varme ved nedkjøling, uten kondensering, av våt røykgass uttrykkes som vist i Formel 21. Røykgassen kjøles ned fra 397 °C til 100 °C ved gjenvinning av følbare varme. Røykgasstemperatur før kjøling er beregnet med Formel 5.

$$P_{VVX} = m_{røykgass} * C_{p_{røykgass}} * \Delta T_{røykgass} \quad (21)$$

- P_{VVX} er effekten som hentes ut av varmeveksleren
- $m_{røykgass}$ er røykgassens massestrøm
- $C_{p_{røykgass}}$ er røykgassens varmekapasitet (Denne antas konstant over temperaturintervallet)
- $\Delta T_{røykgass}$ er røykgassens temperaturendring over varmeveksleren

Verdier og resultat fra beregning av gjenvunnet effekt uten kondensering av våt røykgass er vist i Tabell 31.

Tabell 31 Verdier og resultat ved beregning av gjenvunnet varmet uten kondensering av våt røykgass

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|-----------------------|-----------|------------|----------------------|
| $m_{røykgass}$ | 248 | Kg/h | Massebalanse |
| $C_{p_{røykgass}}$ | 1,27 | kJ/(kg*°K) | Formel 6 |
| $\Delta T_{røykgass}$ | 297 | K | Beregnet (Tabell 36) |
| P_{VVX} | 26,0 | kW | Beregnet |

Virkningsgrad uten kondensering av våt røykgass

Termisk virkningsgrad er beregnet ved gjenvinning av følbare varme. Utregning er gjort med Formel 22. Det er benyttet innfyrt effekt ved 90 % tørrstoff på slammet i beregning.

$$\eta = \frac{P_{VVX}}{P_{fyr}} \quad (22)$$

- η er termisk virkningsgrad ved gjenvinning av følbare varme uten kondensering
- P_{VVX} er effekten som hentes ut av varmeveksleren
- P_{fyr} er innfyrt effekt basert på effektiv brennverdi ved 90 % TS

Verdier og resultat fra beregning av termisk virkningsgrad ved gjenvinning av følbare varme er vist i Tabell 32.

Tabell 32 Verdier og resultat ved beregning av termisk virkningsgrad av følbare varme

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|-----------|-----------|-------|-----------|
| P_{VVX} | 26,0 | kW | Tabell 31 |
| P_{fyr} | 95,0 | kW | Tabell 24 |
| η | 27,3 | % | Beregnet |

Gjenvinning ved kondensering av våt røykgass

Gjenvunnet varme ved kondensering av den nedkjølte våte røykgassen kan beregnes med Formel 23. Røykgassen har 100 °C og kjøles til 25 °C ved gjenvinning av latent og følbare varme.

$$P_{kondens} = (h_{vap} + \Delta T_{vann} * C_{p_{vann}}) * m_{vann} \quad (23)$$

- $P_{kondens}$ er utvunnet varme fra kondensator
- h_{vap} er vannets spesifikke fordampningsentalpi
- m_{vann} er massestrømmen av vanndamp i røykgassen
- $C_{p_{vann}}$ er vannets varmekapasitet
- ΔT er temperaturen vannet kjøles ned i kondenseren

Verdier og resultat fra beregning av gjenvunnet varme ved kondensering av våt røykgass er vist Tabell 33.

Tabell 33 Verdier og resultat ved beregning av gjenvunnet varme ved kondensering av våt røykgass.

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|----------------|-----------|---------|--------------|
| h_{vap} | 2257 | kJ/kg | [90] |
| m_{vann} | 72,3 | kg/h | Massebalanse |
| $C_{p_{vann}}$ | 4,18 | kJ/kg*K | [84] |
| ΔT | 75 | K | Valgt |
| $P_{kondens}$ | 51,6 | kW | beregnet |

Virkningsgrad med kondensering av våt røykgass

Termisk virkningsgrad er beregnet ved gjenvinning av latent og følbar varme. Utregning er gjort med Formel 24. Det benyttes innfyrt effekt ved 90 % tørrstoff ved beregning.

$$\eta = \frac{P_{VVX} + P_{kondens}}{P_{fyr}} \quad (24)$$

- η er termisk virkningsgrad ved gjenvinning av latent og følbar varme uten kondensering
- P_{VVX} er effekten som hentes ut av varmeveksleren ved gjenvinning av følbar varme
- $P_{kondens}$ er effekten som hentes ut av varmeveksleren ved gjenvinning av latent og følbar varme
- P_{fyr} er innfyrt effekt basert på effektiv brennverdi ved 90 % TS

Verdier og resultat fra beregning av termisk virkningsgrad ved gjenvinning av følbar og latent varme er vist i Tabell 34.

Tabell 34 Verdier og resultat ved beregning av termisk virkningsgrad av følbar varme

| Verdi | Størrelse | Enhet | Kilde |
|---------------|-----------|-------|-----------|
| P_{VVX} | 26,0 | kW | Tabell 31 |
| $P_{kondens}$ | 51,6 | kW | Tabell 33 |
| P_{fyr} | 95,0 | kW | Tabell 24 |
| η | 82 | % | Beregnet |

3.2.9 Oppsummering av resultater fra masse- og energibalanse

Resultatene fra masse- og energibalanser presenteres her. De viktigste tallene for energibalansen er vist i Tabell 35. Figur 28 illustrerer massebalansen og temperatuene i anlegget som energibalansen er basert på.

Tabell 35 Oppsummering av resultater fra energibalansen

| Forklaring | Symbol | kW | | GJ/år |
|---------------------------|---------------|------|---------------|-------|
| Innfyrt effekt | P_{fyr} | 95,0 | | 2997 |
| Effektbehov for tørking | $P_{tørke}$ | 36,6 | | 1154 |
| Summert tapene i anlegget | P_{tap} | 26,4 | | 679 |
| | | kW | Virkningsgrad | |
| Gjenvinnbar følbar | P_{vwx} | 26,0 | 82,0 % | 1376 |
| Gjenvinnbar latent varme | $P_{kondens}$ | 51,6 | 27,3 % | 1429 |

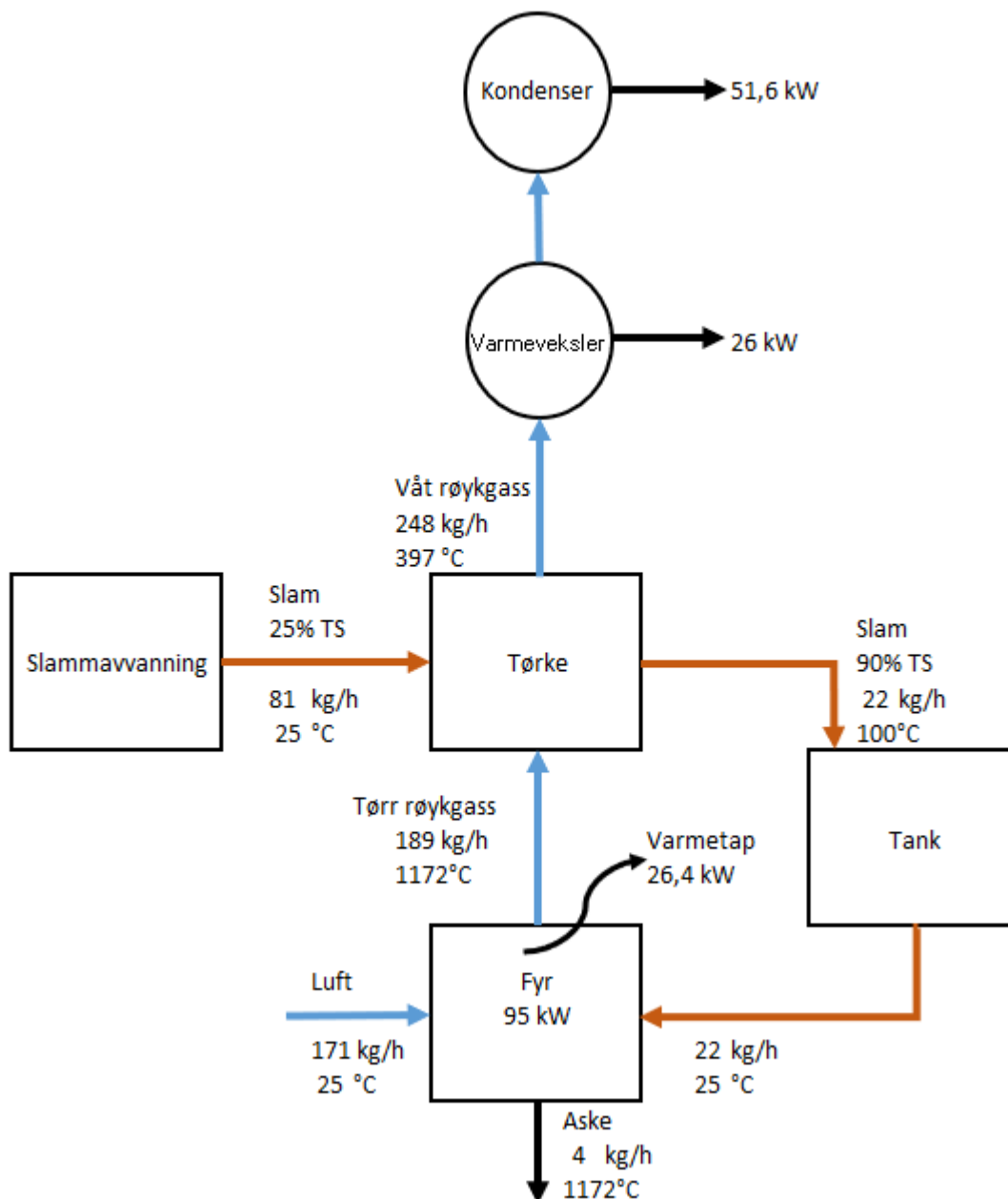
Fra Tabell 35 fremkommer det at omkring to tredeler av varmen tilgjengelig for gjenvinning foreligger som fordampingsvarme.

Flammetemperatur

Basert på tap fra fyringsenhet er det beregnet ny temperatur i brennkammer og røykgasstemperatur etter tørke (Tabell 36). I henhold til litteratur burde temperatur i brennkammer være tilstrekkelig til å sikre fullstendig forbrenning. Temperatur på røykgass etter tørke benyttes til å beregne gjenvinning av energi uten kondensering i Formel 21.

Tabell 36 Temperatur i brennsone og etter tørke med tap

| Forklaring | Temperatur | Kilde |
|--------------------------------|------------|----------|
| Temperatur i brennkammer | 1172°C | Formel 5 |
| Røykgasstemperatur etter tørke | 397°C | Formel 5 |



Figur 28 Oppsummering masse- og energibalanse med tilhørende temperaturer

3.3 Biogass

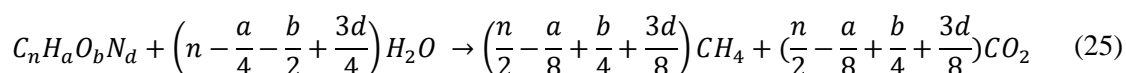
Det er tidligere vist at biogass- og gjødselproduksjon er de mest aktuelle alternativene til forbrenning. For å danne et sammenligningsgrunnlag for oppgavens foreslåtte forbrenningsprosess, skal disse alternativene nå undersøkes, som er en av oppgavens delmål. Beregningene tar ikke hensyn til utfordringene med ammoniakkinhibering (Kapittel 2.2.3) og det som presenteres er et idealisert tilfelle. Biogassprosessen skal behandlet fiskeslammet fra Basisanlegget.

Parameterne som vektlegges for biogassproduksjon er:

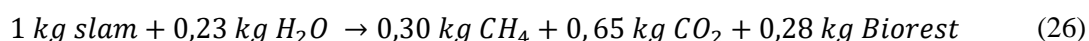
- Mengde produsert metangass (idealisert)
- Mengde produsert biorest
- Energiforbruk til tørking av biorest
- Kvalitetsklasse for biorest

Mengde produsert metangass og biorest

Buswell-ligningen, vist i Formel 25, kan benyttes for å beregne mengde metangass og biorest som dannes [91].



Ligningen balanseres med støkiometrisk formel for fiskeslam for å beregne mengden produsert metangass og biorest. Innsatt og balansert ligning gir resultat som vist i Formel 26.



Energiforbruk til tørking av biorest

Bioresten vil bestå av den uorganiske og uforbrukte delen av fiskeslammet. Denne bioresten vil ha et lavt tørrstoffinnhold, og bør derfor avvannes for å lette transport og oppbevaring. Energiforbruket for å tørke bioresten estimeres her, ved bruk av formel 27

$$Q_{tørking} = m_{avdampet} * H_{vap} \quad (27)$$

- $Q_{tørking}$ er nødvendig energiforbruk for å tørke bioresten
- $m_{avdampet}$ er mengde vann avdampet
- H_{vap} er fordampingsentalpi for vann

Kvalitetsklasse for biorest

Beregning av mengden og tungmetallinnholdet i bioresten er viktig for å bestemme biorestens kvalitetsklasse, og dermed bruksområdet til bioresten. Dersom bioresten havner i kvalitetsklasse III kan den ikke brukes på jordbruksarealer, og havner den over klasse 0 settes det noen begrensninger på bruk. Det er vist at variasjonene i tungmetallinnhold er store mellom ulike oppdrettsanlegg. Av den grunn beregnes tungmetallinnhold på bakgrunn av tre ulike analyser. Tungmetallinnhold beregnes med Formel 28, og resultatene presenteres i Tabell 37.

$$X_{biorest} = \frac{X_{slam}}{B_{slam}} \quad (28)$$

- $X_{biorest}$ er konsentrasjonen av tungmetallet i asken
- X_{slam} er konsentrasjonen av tungmetallet i slammet bestemt i 3 ulike forsøk (Tabell 4)
- B_{slam} er andelen biorest i slammet

Tabell 37 Estimerte verdier for tungmetaller i biorest

| Stoff | Biorest kystlab (Beregnet) | | Biorest Eurofins (Beregnet) | | Biorest NIBIO (Beregnet) | |
|-----------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse | Verdi [mg/kg TS] | Kvalitetsklasse |
| Krom | 13,96 | 0 | 24,64 | 0 | 17,14 | 0 |
| Sink | 1278,57 | III | - | - | 1464,29 | III |
| Kobber | 57,14 | I | - | - | 78,57 | I |
| Nikkel | 3,46 | 0 | 1,79 | 0 | 4,29 | 0 |
| Kvikksølv | 3,57 | III | 0,21 | I | 0,14 | 0 |
| Kadmium | 2,25 | III | 3,18 | III | 2,75 | III |
| Bly | 3,57 | 0 | 1,79 | 0 | 2,11 | 0 |

Det fremkommer av resultatene presentert i Tabell 37 at alle de tre analysene plasserer bioresten fra biogassproduksjon i kvalitetsklasse III.

Oppsummerte resultater for Biogassproduksjon

Beregnete verdier for produksjon av biogass fra fiskeslam er vist i Tabell 38.

Tabell 38 Verdier og resultater fra beregninger om biogassproduksjon

| | Størrelse | Enhet |
|--|-----------|-------------------|
| Slam fra Basisanlegg | 177 000 | kg/år |
| Produsert metangass | 53 100 | kg/år |
| Energi-innhold i produsert CH ₄ | 2655 | GJ/år |
| Produsert biorest | 49,8 | Tonn/år (100% TS) |
| Energibruk for å tørke Biorest | 337 | GJ/år |
| Gjødselklasse Biorest | III | |

3.4 Ubehandlet slam til gjødselbruk

Ubehandlet fiskeslam fra settefiskanlegg brukes i dag i noen grad som gjødsel. Oppdrettsanlegget har da avtaler med det lokale landbruket som blader fiskeslammet ut med husdyrgjødsel. Dersom slammengden fra basisanlegget disponeres på denne måten, krever det ikke noen behandling utover noe avvanning.

Parameterne som vektlegges for gjødselbruk av ubehandlet slam er:

- Mengde produsert
- Kvalitetsklassen til gjødslet

Mengde produsert fiskeslam

Mengden produsert fiskeslam beregnes her ved bruk av Formel 29. Produsert mengde er viktig fordi de direkte påvirker lagrings- og transportkostnadene.

$$m_{slam,10\% TS} = \frac{m_{slam,tørt}}{X_{TS}} \quad (29)$$

- $m_{slam,10\% TS}$ er mengde slam ved 10 % tørrstoff
- $m_{slam,tørt}$ er mengde tørt slam
- X_{TS} er massefraksjon tørrstoff.

Kvalitetsklasse

Kvalitetsklasse for ubehandlet slam er allerede presentert i Tabell 4. Fiskeslammet plasseres da i kvalitetsklasse I-II. Det velges her å bruke kvalitetsklasse I.

Oppsummering resultater Ubehandlet slam

De beregnede resultatene for ubehandlet slam er presentert i Tabell 39.

Tabell 39 Verdier og resultater fra beregninger om ubehandlet slam

| | Størrelse | Enhet |
|---------------------------------|-----------|-------|
| Slam fra Basisanlegg (10%TS) | 1 770 000 | kg/år |
| Kvalitetsklasse ubehandlet slam | I | |

3.5 Tørket slam

Tørt slam innebærer en tørrstoffprosent på over 90%. Ved tørking av fiskeslammet er det lettere og billigere og transportere. Det tørre slammet er stabilisert og hygienisert ved tørking, slik at lagringen blir mindre problematisk å behandle. Det tørre slammet kan brukes til sentralisert gjødsel- eller biogassproduksjon, eller brukes som brensel. Dersom basisanlegget skal produsere tørket slam må det installeres flere avvanningstrinn og en tørke.

Parameterne som vektlegges for tørket slam er:

- Mengde produsert
- Kvalitetsklasse
- Energibehov til tørking

Mengde produsert tørket slam

Mengde produsert fiskeslam fra basisanlegget er 177 tonn i året. Dersom dette tørkes til 90% tørrstoff, kan mengden som må disponeres beregnes med Formel 30.

$$m_{slam,90\%TS} = \frac{m_{slam,tørt}}{X_{TS}} \quad (30)$$

- $m_{slam,90\%TS}$ er mengde slam ved 90 % tørrstoff
- $m_{slam,tørt}$ er mengde tørt slam
- X_{TS} er massefraksjon tørrstoff.

Kvalitetsklasse

Kvalitetsklasse for ubehandlet slam er allerede presentert i Tabell 4. Fiskeslammet plasseres da i kvalitetsklasse I-II.

Energibehov til tørking

Som tidligere nevnt må man bruke termisk tørking for å oppnå 90% tørrstoff, noe som krever energi. Energimengden beregnes med Formel 31, med resultater presentert i Tabell 40. Denne energimengden kan reduseres ved varmegjenvinning.

$$Q_{Tørke,90\%TS} = h_{vap} * m_{vann} \quad (31)$$

- $Q_{Tørke,90\%TS}$ er energimengden som kreves for tørking pr. år
- h_{vap} er vannets spesifikke fordampningsvarme
- m_{vann} er masse på vannet som skal tørkes per år

Oppsummering av resultater for Tørket slam

De beregnede resultatene for Tørket slam er presentert i Tabell 40

Tabell 40 Verdier og resultater fra beregninger for tørking av slam fra 25 % til 90 % tørrstoff

| Ting | Størrelse | Enhet | Kilde |
|------------------------------|-----------|---------|-------|
| Mengde produsert Tørket slam | 197 | Tonn/år | |
| Kvalitetsklasse tørket slam | II | | |
| $Q_{Tørke, 90\%TS}$ | 1154 | GJ | |

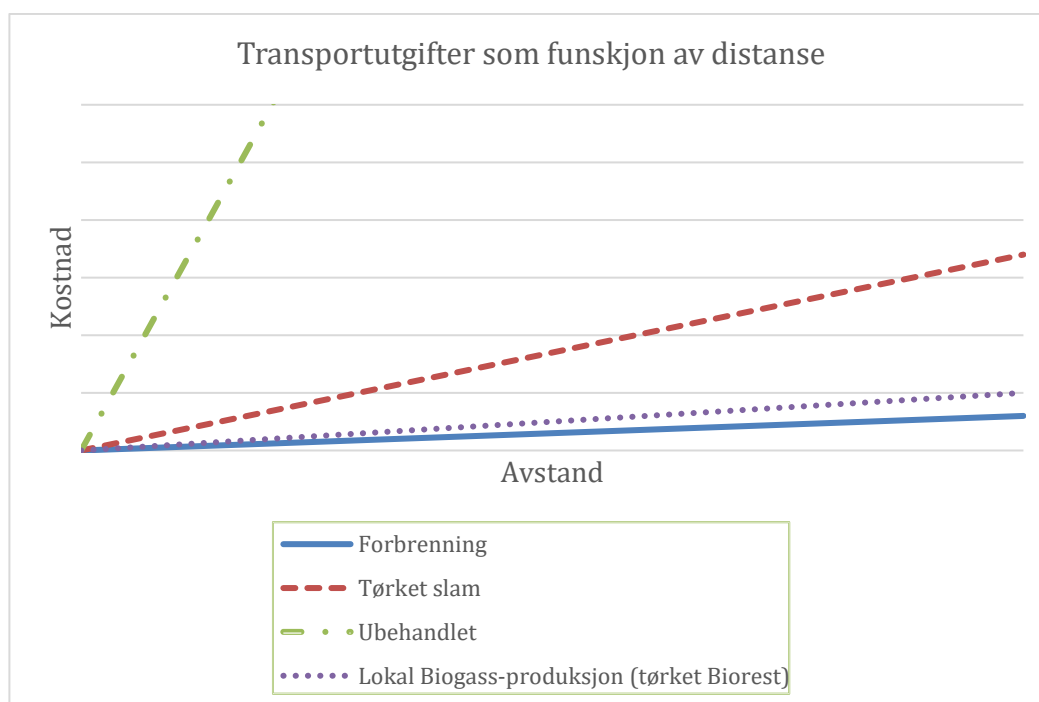
3.6 Sammenligning

I dette kapitlet vil forbrenningsmetoden bli sammenlignet med de mest aktuelle alternativene. Sammenligningsgrunnlag mellom bruksområder for fiskeslam er listet i Tabell 41 og blir diskutert i dette kapitlet. Parameterne i tabellen anses som de mest kritiske for avhending av fiskeslam.

Tabell 41 Nøkkelparametere med beregnede og estimerte verdier for behandlingsmetodene vurdert i oppgaven

| | Forbrenning | Tørket slam (90% TS) | Ubehandlet slam (10% TS) | Lokal Biogassproduksjon med tørket biorest | Benevning |
|---------------------------------|----------------|----------------------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Biprodukt | Aske | Tørket slam | Våt gjødsel | Biorest | - |
| Produsert mengde biprodukt | 35,4 | 197 | 1770 | 49,6 | Tonn/år |
| Transportbehov | 3 | 17 | 148 | 5 | Antall tunge lastebiler per år |
| Kvalitetsklasse biprodukt | Deponeres | II | I | III | - |
| Energiforbruk tørking | 0 | 1154 | 0 | 337 | GJ/år |
| Gjenvinnings-potensialet energi | 2447 | 0 | 0 | 2267 | GJ/år |
| Stabilisering | Ja | Ja | Nei | Ja | - |
| Hygienisering | Ja | Ja | Nei | Nei, kan hygieniseres ved tørking | - |
| Investeringer [92] | Ikke vurdert | Middels | Små | Store | - |
| Gjenvinning | Energi, fosfor | Nitrogen, fosfor | Nitrogen, fosfor | Energi, nitrogen, fosfor | - |

Volumet av produkt, eller biprodukt, fra slambehandlingen kan være avgjørende for hvilket bruksområde som velges, fordi det direkte påvirker transportkostnadene. Mengden produkt/biprodukt som må håndteres varierer mye mellom bruksområdene, noe som kommer tydelig frem ved parameteren «transportbehov» i Tabell 41. Transportbehovet er presentert i tabellen som antall tunge lastebiler, som hver har en transportkapasitet på 12 tonn. Dersom man antar et proporsjonalt forhold mellom transportkostnad og avstand blir resultatet vist i Figur 29.



Figur 29 Forhold mellom avstand og transportkostnad

Fra Figur 29 kommer det frem at forbrenning har de laveste transportkostnadene per kilometer. Det gjør forbrenning minst avhengig av lokal disponering av restprodukt sammenlignet med alternativene.

Det fremkommer at tungmetallinnhold er viktig for alle behandlingsmetodene. Alle behandlingsmetoder leverer et produkt eller biprodukt som er ønskelig å benytte som gjødsel. Kvalitetsklasser kan påvirke hvor attraktivt gjødslet fremstår for forbruker. Det setter også begrensninger på mengden slam som kan avhendes til lokalt jordbruk. Om tungmetallinnholdet er for høyt må det deponeres.

Det estimerte tungmetallinnholdet i asken gjør at den må deponeres. Det gir ikke mulighet for fosforgjenvinning. Separasjon av askefraksjoner kan forandre dette, og vil trolig være avgjørende for forbrenningsprosessens egnethet som bruksområde. Biproduktet fra biogass, bioresten, er estimert til kvalitetsklasse III. Det hindrer bruk på matjord og kan vanskeliggjøre avhendingen. Tørr og våtgjødsel kan benyttes på matjord med restriksjoner.

Energibehovet er størst i avhendingsmetoden der slammet tørkes. I den foreslåtte forbrenningsprosessen vil energien som behøves til tørking kunne tas fra den varme røykgassen. Av behandlingsmetodene som gjenvinner energi fra fiskeslammet, kommer forbrenningsprosessen ut med høyest utbytte. Biogassprosessen kan raffineres for å produsere høyverdig energi, i form av metangass. Den foreslåtte forbrenningsprosessen i denne oppgaven produserer bare lavverdig energi i form av varme.

Noen avhendingsmetoder stabiliserer og hygieniserer slammet. Det benyttes i dag noe ubehandlet fiskeslam som gjødsel, men dette vil trolig ikke være mulig med den reviderte gjødselvereforskriften. Det vil påvirke settefiskanlegg som i dag omsetter ubehandlet fiskeslam.

4 Diskusjon

I litteraturstudie ble det ikke funnet kommersielle løsninger for forbrenning av fiskeslam. Det er allikevel grunn til å tro at eksisterende teknologi kan konverteres til å forbrenne fiskeslam. Små-skala forbrenning av biomasse tilbyr mange slike løsninger. Løsningene er designet for pellets og trevirke, og innmating må antagelig modifiseres. Det er også mulig tilsetning av forbrenningsluft ikke vil fungere optimalt for fiskeslam. Hvor omfattende modifikasjonene blir er vanskelig å forutse uten forsøk.

Beregningene viser at slammets fuktinnhold gjør at en stor del av den gjenvinnbare varmen vil være latent. Direkte tørking og kondensering av røykgass er trolig ikke aktuelt for et anlegg på denne skalaen, på grunn av omkostningene ved røykgasskondensering. Indirekte tørking burde være en bedre løsning. Ved å benytte indirekte tørking blandes ikke avdampet vann med røykgass, og kan gjenvinnes separat.

Sammenlignet med andre avhendingsmetoder har forbrenning noen fordeler. Volumreduksjonen ved forbrenning vil redusere kostnadene for påfølgende lagring og transport. Energi fra forbrenning kan gjenvinnes og erstatte annet energiforbruk til oppvarming.

Brennverdien har blitt bestemt til 18,5 MJ/kg med bombekalorimeter. Det stemmer relativt godt med analyser fra andre oppdrettsanlegg der brennverdien oppgis til rundt 20 MJ/kg [21, 28, 43]. Under bestemmelse av brennverdi er usikkerheter knyttet til utstyret som ble benyttet. Temperaturføler hadde ikke ønsket oppløsning noe som påvirker nøyaktigheten til resultatet. Ved sammenligning med tilgjengelig litteratur [21, 28, 43] antas likevel brennverdien å være nøyaktig nok til å gi et godt estimat. Brennverdien vil varere noe ved forskjellige anlegg, og brennverdi bør analyseres ved det aktuelle anlegget om forbrenning av slam vurderes.

Ved estimering av askeandel med bombekalorimeter ble gjennomsnittet 17,5 % masseprosent. Det stemmer godt med litteratur [21]. Det er noe usikkerhet ved denne analysen da det forutsettes at all aske ligger igjen i beholder i bombekalorimeter. For å kompensere for denne usikkerheten ble beregninger utført med at 20 % masseprosent utgjør askeandelen til slamm.

Det estimerte innholdet av tungmetaller i asken er høyt nok til at den må deponeres. Ved forbrenning av biomasse vil asken fordeles i fraksjoner med varierende tungmetallinnhold, der bunnasken burde kunne benyttes ubehandlet som gjødsel. Fordeling av aske mellom de forskjellige fraksjonene, og tungmetallinnholdet i dem, er derfor noe som påvirker egnetheten av forbrenning som avhendingsmetode. Tungmetallinnholdet og fordeling av askefraksjoner bør analyseres nærmere. Tungmetallproblematikken kan kanskje bedres ved å endre fôr-sammensetning i settefiskanleggene. Det er ikke gjort noen analyse for tungmetallinnholdet i fiskefôr i denne oppgaven, og det er derfor heller ikke foreslått noen løsninger for å minke problemet.

Forbrenning av fiskeslam kan føre til uønskede utslipp til luft. Utslipp av fra røykgass er ikke omfattet av oppgaven. Det bør undersøkes nærmere om rensetiltak må installeres ved forbrenning. Det kan påvirke vurderingen av forbrenning som bruksområde.

Beregningen av tap i den foreslåtte forbrenningsprosessen er beregnet på grunnlag av estimer. Nøyaktigheten til disse tilnærming er usikker, men tapene vil antageligvis avvike noe. Beregninger av varmegjenvinning er gjort ved en ideell prosess hvor all energi overføres umiddelbart. I en reel prosess vil det være tap og varmeledningsevner som påvirker virkningsgraden. Modellering av prosessen med dataverktøy vil gi et bedre bilde på varmflyten i prosessen.

Mye av beregningene og estimeringer er bygget på tilgjengelig litteratur, og dette setter krav til at kildene som er brukt er pålitelig og gjeldende. Dette gjelder spesielt for analysene og forsøkene av tungmetallinnhold og gjødslingseffekt. Dersom nyere og bredere analyser avdekker et annet tungmetall- eller næringsinnhold, kaster dette tvil over denne oppgavens beregninger og slutninger.

Forbrenning er en behandlingsmetode som er i bruk for avløpsslam. At løsninger her kunne være overførbare til et desentralisert forbrenningsanlegg for fiskeslam ble utelukket tidlig i prosessen. Det fordi størrelsesordenen er langt større enn ved lokal forbrenning. Antagelsen var at løsninger brukt ved en slik skala ikke vil være overførbart til et mindre anlegg.

Gjødselvereforskriften legger grunnlaget for flere av de kritiske vurderingspunktene for sammenligning av behandlingsmetodene i oppgave. Gjødselvereforskriften gjennomgår nå en revidering som vil påvirke disponeringen av slam fra fiskeoppdrett. Trolig vil forbrenning med energigjenvinning, samt biogassproduksjon, påvirkes positivt av revideringen. En ny vurdering av disse behandlingsmetodene må derfor gjennomføres når den nye gjødselvereforskriften er vedtatt.

5 Konklusjon

I oppgaven er det gjort rede for de mest brukte avhendingsmetodene for fiskeslam. Det fremkommer at tungmetallinnhold, spesielt sink og kadmium, er en utfordring for restproduktet fra alle behandlingsmetodene. Fiskeslammets fosforinnhold gjør at gjenvinning til landbruket er ønskelig for alle de diskuterte metodene. Under gjeldende forskrift for gjødsel pålegges det restriksjoner på bruk som gjødsel på bakgrunn av tungmetallinnholdet, som vanskeliggjør avhending.

Det er kommersielt tilgjengelige forbrenningsenheter som burde kunne tilpasses til lokal forbrenning av fiskeslam med energigjenvinning. Brennverdien til fiskeslam er analysert i et bombekalorimeter og beregnet til 18,5 MJ/kg. Effektiv brennverdi er beregnet til 17,2 MJ/kg. Adiabatisk flammetemperatur ved 90 % tørrstoff er beregnet til 1560 °C. Virkningsgraden til forbrenningsprosessen er beregnet til 27,3 % ved gjenvinning av følbare varme. Ved gjenvinning av latent varme i tillegg til følbare varme er virkningsgraden beregnet til 82 %. Det er satt opp et forslag til en forbrenningsprosess som skal forbrenne fiskeslammet fra et tenkt settefiskanlegg. Eksempelet demonstrerer at fiskeslam har potensiale som biobrensel for lokal varmeproduksjon.

Restproduktet fra forbrenningen, asken, ser ut til å være det største problemet knyttet til forbrenning av fiskeslam. Askemengde er estimert til utgjøre 20 % av masse til det forbrente slammet, og den kan trolig ikke brukes ubehandlet som gjødsel på grunn av tungmetallinnhold. Videre analyser på asken fra forbrenning av fiskeslam er foreslått for å bestemme fosforinnhold og tungmetallinnhold i ulike askefraksjoner. Dette vil kunne vise om fosforinnholdet i asken kan gjenvinnes ved separering av flygeasken.

Lokal forbrenning av fiskeslam med energigjenvinning vurderes som en behandlingsmetode som er verdt å undersøke nærmere. Energigjenvinningen vil kunne redusere oppdrettsanleggets energiforbruk for oppvarming. Volumet på produktstrømmer fra forbrenning små, som begrenser kostnadene ved etterfølgende lagring og transport, på bekostning av fiskeslammets nitrogeninnhold. Forbrenning med energigjenvinning kan derfor være aktuelt dersom det ikke finnes andre lokale disponeringsmuligheter.

6 Videre arbeid

Under arbeidet med oppgaven har det kommet frem temaer som bør undersøkes nærmere ved forbrenning av fiskeslam. Disse er:

- Det bør utføres forsøk med biomasseovner for å undersøke i hvilken grad en slik ovn er egnet for forbrenning av fiskeslam.
- Investerings og driftskostnader tilknyttet et forbrenningsanlegg bør kartlegges og sammenlignes med alternative avhendingsmetoder.
- Analyse av aske bør utføres for å bestemme gjenvinningspotensialet ved separering av askefraksjonene
- Gjødelseeffekten til dannet aske bør undersøkes
- Analyser av røykgass fra forbrenning av fiskeslam bør utføres. Det for å avgjøre sammensetning av røykgass og eventuelle restriksjoner ved forbrenning.
- Varmebehovet i et settefiskanlegg bør undersøkes for å vurdere behovet for energigjenvinning
- Om den reviderte gjødselsvareforskriften blir vedtatt bør konsekvensene for avhendingsmetodene undersøkes

Referanser

1. Lekang, O.I., *Aquaculture Engineering*. 2013: Wiley.
2. Berge, A., *Satser på rømningsikker merd*. iLaks.no, 2014.
3. Miljødirektoratet, *Forurensningsmyndighetenes forventninger til oppdrettsanlegg i sjø*, in <http://www.miljodirektoratet.no>, Miljødirektoratet, Editor. 2017.
4. Statistisk sentralbyrå. *Eksport av fisk, etter varegruppe, land, statistikkvariabel og år*. 2018 [cited 2018 04.04]; Available from: <https://www.ssb.no/statbank/table/09283/tableViewLayout1/?rxid=579bca7d-6dae-4452-91cb-4a347c69bd30>.
5. Statistisk sentralbyrå. *Utenrikshandel med varer*. 2018 [cited 2018 01.04]; Available from: <https://www.ssb.no/utenriksokonomi/statistikker/muh/aar>.
6. Statistisk sentralbyrå. *Akvakultur*. 2018 [cited 2018 03.04]; Available from: <https://www.ssb.no/fiskeoppdrett>.
7. Rosten, T.W., K. Azrague, and B. Toldnes, *Primærrensing og aktuelle løsninger for slambehandling i norske settefiskanlegg*. 2013, SINTEF.
8. Lunestad, B.T. and E. Rimstad, *Uttalelse vedrørende hygieniske sider ved å bruke slam fra klekkeri og settefiskanlegg, og slam fra oppdrettsanlegg som gjødsel og jordforbedringsmiddel*. Vitenskapskomiteen for mattrygghet (VKM) 2011.
9. Jensen, P.M., *Slam kan koste settefisknæringen én milliard i året*. Kyst.no, 2016.
10. Fiskeridirektoratet. *Tildelingsprosessen*. 2017 [cited 2018 17.03]; Available from: <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tildeling-og-tillatelser/Tildelingsprosessen>.
11. Nærings- og fiskeridepartementet. *Nye regler for landbasert oppdrett*. 2016 [cited 2018 03.04]; Available from: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/nye-regler-for-landbasert-oppdrett/id2502424/>.
12. Bergheim, A., et al., *Production of Atlantic salmon smolts in Europe—Current characteristics and future trends*. *Aquacultural Engineering*, 2009. **41**(2): p. 46-52.
13. Hallenstvedt, A. *Fiskeoppdrett*. Store norske leksikon 2015 [cited 2018 15.03]; Available from: <https://snl.no/fiskeoppdrett>.
14. Blytt, L., et al., *Håndtering av slam fra rensing av avløp i settefiskanlegg: Forprosjektrapport*. SINTEF rapport SBF2011F0081. SINTEF Byggforsk, Trondheim, 2011: p. 37.
15. Kolarevic, J., et al., *Effekter av resirkulering av vann eller gjennomstrømming under settefiskfasen hos Atlantisk laks*. 2012, Nofima.
16. Laks.no. *Lakseproduksjon*. [cited 2018 19.02]; Available from: <https://laks.no/lakseproduksjon/>.
17. Nærings og fiskeridepartementet. *Fiskehelse/lakselus*. 2014 [cited 2018 19.02]; Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/fiskeri-og-havbruk/oppdrettslaksen/sykdom/id607091/>.

18. Miljødirektoratet. *Rømt oppdrettsfisk*. 2012 [cited 2018 02.05]; Available from: <http://www.miljostatus.no/tema/hav-og-kyst/fiskeoppdrett/romt-oppdrettsfisk/>.
19. Fiskeridirektoratet. *Rømmingsstatistikk*. 2018 [cited 2018 02.05]; Available from: <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Statistikk-akvakultur/Roemningsstatistikk>.
20. Simonsen, G.S. and A.M. Urdahl, *Usage of Antimicrobial Agents and Occurrence of Antimicrobial Resistance in Norway*. 2015.
21. Ytrestøyl, T., et al., *Karakterisering av slam fra tre kommersielle settefiskanlegg gjennom ett produksjonsår. Hovednæringsstoff, mineraler og tungmetaller*. 2016.
22. Miljødirektoratet, *Utslipp av næringsstoffer fra fiskeoppdrett*. 2016.
23. Ali, S.A., *Design and evaluate a drum screen filter driven by undershot waterwheel for aquaculture recirculating systems*. *Aquacultural Engineering*, 2013. **54**: p. 38-44.
24. Pfeiffer Timothy J, Osborn Andrew, and Davis Megan, *Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system*. *Aquacultural Engineering*, 2008. **39**(1): p. 24-29.
25. Fernandes Paulo, Pedersen Lars-Flemming, and Pedersen Per Bovbjerg, *Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems*. *Aquacultural Engineering*, 2015. **65**: p. 17-26.
26. Sharrer, M., et al., *The cost and effectiveness of solids thickening technologies for treating backwash and recovering nutrients from intensive aquaculture systems*. *Bioresource Technology*, 2010. **101**(17): p. 6630-6641.
27. Ebeling James M, Welsh Carla F, and Rishel Kata L, *Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent*. *Aquacultural Engineering*, 2006. **35**(1): p. 61-77.
28. Aas, T.S. and T.E. Åsgård, *Estimert innhold av næringsstoff og energi i fôrspill og faeces fra norsk lakseoppdrett*. Nofima rapportserie, 2017.
29. Aspaas, S., *TEKSET–Innovasjon for settefisk 2016-Divisjonsopptrykk–Gå for gull! Sammendrag fra TEKSET 2016*. 2016.
30. Statens forureningstilsyn, *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav*. 2003.
31. Landbruksdirektoratet, Mattilsynet, and Miljødirektoratet. *Oversendelsesbrev gjødselvareregelverket*. 2016 [cited 2018 20.04]; Available from: <http://nobio.no/forslag-til-ny-gjodselvareforskrift-overlevert-til-departementet/>.
32. Hind Liv Jorunn *Gjenbruk av fosfor*. Nibio.no, 2015.
33. Lewis, L., *Scientists warn of lack of vital phosphorus as biofuels raise demand*. *The Times*, 2008. **23**.
34. Blytt L.D, et al., *Bedre utnyttelse av fosfor*. 2017, Miljødirektoratet.

35. Kratz Sylvia, Schick Judith, and Schnug Ewald, *Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany*. Science of The Total Environment, 2016. **542**: p. 1013-1019.
36. UiO Institutt for biovitenskap, *Nitrogen*, in *Botanisk- og plantefysiologisk leksikon*. 2011.
37. Cato Kjølstad, *Veien til biovarme*, Norsk Bioenergiforening, Editor. 2011.
38. Ole Kristian, et al., *Utnyttelse av oppløst og partikulært avfall fra smoltproduksjon i et resirkulasjonssystem (AQP Vest)*. 2013, NIVA.
39. Ytrestøyl, T., et al., *Utnyttelse av slam fra akvakultur i blandingsanlegg for biogassproduksjon: teknologi og muligheter*. 2013.
40. Eva Brod, Trond Knapp Haraldsen, and T. Krogstad, *Fiskeslam som nitrogen gjødsel. Effekt av ulike behandlingsteknologier*. NIBIO RAPPORT 2016. **2**(118).
41. Eivind Vangdal, et al., *Fiskeslam frå oppdrettsanlegg*, in *Bioforsk Rapport*. 2014, Bioforsk.
42. Sterner AS. «Slambehandling i settefiskindustrien». 2016 [cited 2018 25.03]; Available from: <http://tekset.no/tekset-2016-e/>.
43. Gebauer Ruth, Cabell Joshua F, and Ween Ola, *Biogassproduksjon fra settefiskslam i sentraliserte og desentraliserte biogassanlegg*. 2016.
44. Mao, C., et al., *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 540-555.
45. Zhang, C., et al., *Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **38**: p. 383-392.
46. Mirzoyan, N. and A. Gross, *Use of UASB reactors for brackish aquaculture sludge digestion under different conditions*. Water Research, 2013. **47**(8): p. 2843-2850.
47. Mirzoyan, N., et al., *Quality of brackish aquaculture sludge and its suitability for anaerobic digestion and methane production in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor*. Aquaculture, 2008. **279**(1): p. 35-41.
48. Gebauer, R., *Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production*. Bioresource Technology, 2004. **93**(2): p. 155-167.
49. EcoGas, *Matavfall og slam blir drivstoff*, EcoGas, Editor. 2016, EcoGas: <http://www.ecogas.no/fileshare/filarkivroot/Galleri/Ecogas%2015.1.2018.pdf>.
50. iLaks.no. *Smøla produserer 300.000 kWh per år med biogass fra fiskeslam*. iLaks.no 2016 [cited 2018 17.02]; Available from: <https://ilaks.no/smola-produserer-300-000-kwh-per-ar-med-biogass-fra-fiskeslam/>.
51. AgriMare Bio. *FORRETNINGSKONSEPT*. 2017 [cited 2018 27.02]; Available from: <http://www.agrimarebio.com/forretningskonsept-2/forretningskonsept/>.
52. NHO. *Norges beste studentbedrift vil bidra til bærekraftig sjømatnæring*. 2017 [cited 2018 27.02]; Available from: <https://www.nho.no/Politikk-og-analyse/Kompetanse-og-utdanning/norges-beste-studentbedrift-vil-bidra-til-barekraftig-sjomatnaring/>.

53. Klima- og miljødepartementet, *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften)*. 2016.
54. Koppejan J and van Loo S, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. 2012: Taylor & Francis.
55. Klas Sivan, Mozes Noam, and Lahav Ori, *A conceptual, stoichiometry-based model for single-sludge denitrification in recirculating aquaculture systems*. *Aquaculture*, 2006. **259**(1): p. 328-341.
56. Asbjørn Vøllestad. *Dorade*. 2012 [cited 2018 05.05]; Available from: <https://snl.no/dorade>.
57. Gil, M.V., et al., *Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion*. *Bioresource Technology*, 2010. **101**(14): p. 5601-5608.
58. Khan, A.A., et al., *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*. *Fuel Processing Technology*, 2009. **90**(1): p. 21-50.
59. Yao Hong and Naruse Ichiro, *Combustion Characteristics of Dried Sewage Sludge and Control of Trace-Metal Emission*. *Energy & Fuels*, 2005. **19**(6): p. 2298-2303.
60. National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*. 2017 [cited 2018 10.02]; Available from: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7782447&Units=SI&Mask=1>.
61. Horn, H., *Innovativ utnyttelse av aske fra trevirke for økt verdiskapning og bærekraftig skogbruk*. 2016, Norges forskningsråd.
62. Lie, Ø., *Vil bruke oljeteknologi til å rense flygeaske*. *Teknisk Ukeblad*, 2016.
63. *Strategi for økt utbygging av bioenergi*. 2008, Olje- og Energidepartementet.
64. Even Bjørnstad and Arnstein Norheim, *Småskala varmeproduksjon fra skogsbrensel*. 2007, Trøndelag Forskning og Utvikling.
65. Rafal Strzalka, Tobias Gabriel, and E.U. Eicker, *Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion*. *Applied Thermal Engineering*, 2013. **50**(2): p. 1418-1426.
66. NVE, E., Norges forskningsråd, and Innovasjon Norge. www.fornybar.no. 2016 [cited 2018 05.05.18].
67. HDG. *Varmesystemer til flis, trøpiller og spåner*. [cited 2018 09.04]; Available from: <http://www.nordiske.no/hdg-bavaria-biobrensel/flisfyring>.
68. Tucker C S and Hargreaves J A, *Environmental Best Management Practices for Aquaculture*. 2009: Wiley.
69. Sharrer Mark J, Rishel Kata, and Summerfelt Steven T, *Evaluation of a membrane biological reactor for reclaiming water, alkalinity, salts, phosphorus, and protein contained in a high-strength aquacultural wastewater*. *Bioresource Technology*, 2010. **101**(12): p. 4322-4330.
70. Solbakken, J., *Beste tilgjengelige teknikker for fiskeoppdrett i Norden*. 2005: Nordisk Ministerråd.

71. Sterner. *Skivefilter*. 2014 [cited 2018 06.03]; Available from: <http://sterneras.no/produkt/skivefilter/>.
72. Dolan Eoin, Murphy Niall, and O'Hehir Michael, *Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems*. *Aquacultural Engineering*, 2013. **56**: p. 42-50.
73. Sharrer Mark J, Rishel Kata, and Summerfelt Steven, *Evaluation of geotextile filtration applying coagulant and flocculant amendments for aquaculture biosolids dewatering and phosphorus removal*. *Aquacultural Engineering*, 2009. **40**(1): p. 1-10.
74. Wakeman, R.J., *Separation technologies for sludge dewatering*. *Journal of Hazardous Materials*, 2007. **144**(3): p. 614-619.
75. Mivalt. *Dewatering screw press for sludge water*. Available from: https://www.augustnorge.no/images/produkter/dewatering_screw_press.pdf.
76. Moss Lynne H. *Trends in Dewatering*. 2012 [cited 2018 14.02]; Available from: <http://www.weat.org/events/2012MossWEATDewateringTrends.pdf>.
77. Amos, W.A., *Report on Biomass Drying Technology*. 1998.
78. Roos, C.J., *Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power*. 2008.
79. Bioretur. *FRSTTM – FREMTIDENS LØSNING FOR HÅNDTERING AV FISKESLAM*. [cited 2018 28.02]; Available from: <https://bioretur.no/fiskeoppdrett/>.
80. Multivector. *Aquaculture*. [cited 2018 28.02]; Available from: <http://www.multivector.no/waste-drying/aquaculture/>.
81. Sterner AS. *Slambehandling*. [cited 2018 28.02]; Available from: <http://sterneras.no/produktkategori/slambehandling/>.
82. Scanship. *AQUACULTURE*. 2018; Available from: <https://www.scanship.no/marine/aquaculture/>.
83. Johnson, D.G. *brennverdi*. 2018 [cited 2018 10.05]; Available from: <https://snl.no/brennverdi>.
84. Engineering ToolBox. *Water - Thermophysical Properties*. 2003 [cited 2018 04.04]; Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html.
85. Švantner Michal, Honnerová Petra, and Veselý Zdeněk, *The influence of furnace wall emissivity on steel charge heating*. *Infrared Physics & Technology*, 2016. **74**: p. 63-71.
86. Grøn, Ø., *Stefan Boltzmanns Lov*, in *Store norske leksikon*. 2009.
87. Engineering ToolBox. *Convective Heat Transfer*. 2003 [cited 2018 20.04]; Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html.
88. Engineering ToolBox. *Specific Heat of Solids* 2003 [cited 2018 21.04]; Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html.
89. Deng Wenyi, Su Yaxin, and Yu Weichao, *Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Paddle Dryer Using Different Heat Carriers*. *Procedia Environmental Sciences*, 2013. **18**: p. 709-715.

-
90. Engineering ToolBox. *Water - Heat of Vaporization*. 2010 [cited 2018 21.04]; Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html.
 91. Jensen, M.W., *Evaluering av en kombinert produksjon av bioplast og biogass fra slam sammenlignet med tradisjonell biogassproduksjon*, in *Institutt for matematiske realfag og teknologi*. 2016, NMBU.
 92. Johan Oppen and Oddmund Oterhals, *Logistikk og forretningsmodeller for behandling av fiskeslam*. 2016, Møreforskning Molde AS.

Vedlegg A – Data for beregning av varmekapasitet som funksjon av temperatur ved beregning av flammtemperatur.

Temperaturintervall og verdier benyttet ved beregning av varmekapasitet brukt ved beregning av flammtemperatur er vist i Tabell 1 til 4. Tabellene gir verdier for komponentene i røykgassen. Alle verdier er hentet fra «National Institute of Standards and Technology» [1]

Tabell 1 Verdier for karbondioksid

| CO2 | | |
|-----------------|--------------|---------------|
| Temperature (K) | 298. - 1200. | 1200. - 6000. |
| A | 24,99735 | 58,16639 |
| B | 55,18696 | 2,720074 |
| C | -33,69137 | -0,492289 |
| D | 7,948387 | 0,038844 |
| E | -0,136638 | -6,447293 |
| F | -403,6075 | -425,9186 |
| G | 228,2431 | 263,6125 |
| H | -393,5224 | -393,5224 |

Tabell 2 Verdier for vanndamp

| H2O | | |
|-----------------|--------------|---------------|
| Temperature (K) | 500. - 1700. | 1700. - 6000. |
| A | 30,092 | 41,96426 |
| B | 6,832514 | 8,622053 |
| C | 6,793435 | -1,49978 |
| D | -2,53448 | 0,098119 |
| E | 0,082139 | -11,15764 |
| F | -250,881 | -272,1797 |
| G | 223,3967 | 219,7809 |
| H | -241,8264 | -241,8264 |

Tabell 3 Verdier for oksygen

| O2 | | | |
|-----------------|-------------|--------------|---------------|
| Temperature (K) | 100. - 700. | 700. - 2000. | 2000. - 6000. |
| A | 31,32234 | 30,03235 | 20,91111 |
| B | -20,23531 | 8,772972 | 10,72071 |
| C | 57,86644 | -3,988133 | -2,020498 |
| D | -36,50624 | 0,788313 | 0,146449 |
| E | -0,007374 | -0,741599 | 9,245722 |
| F | -8,903471 | -11,32468 | 5,337651 |
| G | 246,7945 | 236,1663 | 237,6185 |
| H | 0 | 0 | 0 |

Tabell 4 Verdier for nitrogen

| N2 | | | |
|-----------------|-------------|--------------|---------------|
| Temperature (K) | 100. - 500. | 500. - 2000. | 2000. - 6000. |
| A | 28,98641 | 19,50583 | 35,51872 |
| B | 1,853978 | 19,88705 | 1,128728 |
| C | -9,647459 | -8,598535 | -0,196103 |
| D | 16,63537 | 1,369784 | 0,014662 |
| E | 0,000117 | 0,527601 | -4,55376 |
| F | -8,671914 | -4,935202 | -18,97091 |
| G | 226,4168 | 212,39 | 224,981 |
| H | 0 | 0 | 0 |

Referanser

1. National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*. 2017 [cited 2018 10.02]; Available from: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7782447&Units=SI&Mask=1>.

Vedlegg B – Beregning av slammengde

Mengden slam som produseres, m_{slam} , relateres til mengden fôr som brukes, $m_{fôr}$, ved å bruke fôrets fordøyelighet. Fordøyelighetsfaktoren f beskriver gjennomsnittlig andel av fôret som fordøyes av fisken. Resten vil forbli ufordøyd i form av spillfôr og fekalier, som utgjør slamm. Mengden slam kan da beregnes som vist i Formel 1.

$$m_{slam} = m_{fôr} * (1 - f) \quad (1)$$

- m_{slam} er vekten av tørt slam
- $m_{fôr}$ er vekten av tilført fôr
- f er fordøyelighetsfaktoren

De anslåtte størrelsene på fordøyelighetsfaktoren f varierer noe i litteraturen, som vist i Tabell 1.

Tabell 1 viser anslåtte mengder av fordøyelighetsfaktoren

| Kg slam TS per kg fôr (1 - f) | Kilde |
|---------------------------------|------------------------|
| 0,20 | Cripps og Bergheim [1] |
| 0,20 (Høyt anslag) | Blytt et al [2] |
| 0,35 | Vinci et al. [3] |
| 0,08 | Marine Harvest [4] |
| 0,06 | Rosten [5] |

For å relatere produsert mengde settefisk til mengden fôr brukes fôrfaktoren FCR (Feed Conversion Ratio) som beskriver kg fôr brukt per kg fiskevekst (Formel 2).

$$m_{fôr} = FCR(m_{fisk}) * \Delta m_{fisk} * n_{fisk} \quad (2)$$

- Hvor $m_{fôr}$ er mengden fôr
- $FRC(m_{fisk})$ er fôrfaktoren som funksjon av fiskens vekt
- Δm_{fisk} er fiskens vekst
- n_{fisk} er antall fisk.

Fôrfaktoren FCR forandrer seg gjennom fiskens vekstforløp. For å beregne mengden fôr har denne oppgaven tatt utgangspunkt i EWOS anbefalte fôringsregime [6] slik vist i Tabell 2.

Tabell 2 Fôrfaktoren FCR (kg fôr/kg fisk) som funksjon av fiskens vekt i gram. Basert på generelle fôringsråd fra EWOS [6]

| Fiskevekt, m_{fisk} (g) | FCR |
|---------------------------|------|
| 0,1 - 1,0 | 0,70 |
| 1,0 - 5,0 | 0,70 |
| 5,0 - 15,0 | 0,75 |
| 15,0 - 30,0 | 0,80 |

| | |
|--------------|------|
| 30,0 - 50,0 | 0,90 |
| 50,0 - 100,0 | 0,95 |

Mengden slam kan da beskrives som vist i Formel 3.

$$m_{slam} = FCR(m_{fisk}) * \Delta m_{fisk} * n_{fisk} * (1 - f) \quad (3)$$

På bakgrunn av formlene og verdiene funnet over, kan vi nå beregne den årlige produksjonen av slam i anlegget. Verdien brukt i beregningene er vist i Tabell 2 og Tabell 3.

Tabell 3 Verdier brukt i beregningene

| Utgangspunkt/gitte verdier | | |
|----------------------------|------------|---------|
| antall fisk | 10.000.000 | Fisk/år |
| Startvekt | 0 | g |
| Sluttvekt | 100 | g |
| 1 - f | 0,2 | |

Formel 3 brukes til å beregne den årlige slammengden med 100% TS. Slammengden som tørkeenheten må håndtere vil ha et tørrstoffinnhold på 25% etter dekanterentrifugen da slammet enda inneholder mye vann. Beregnede verdier for 100% TS vises i Tabell 4.

Tabell 4 Beregnede verdier for årlig slamproduksjon i anlegget ved 100% TS

| Beregnet slam-mengde | |
|------------------------|----------|
| Slamproduksjon | 100 % TS |
| tonn/år | 177 |
| kg/døgn (Gjennomsnitt) | 485 |
| kg/h (Gjennomsnitt) | 20 |

Referanser

1. Cripps, S.J. and A. Bergheim, *Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems*. Aquacultural Engineering, 2000. **22**(1): p. 33-56.
2. Blytt, L., et al., *Håndtering av slam fra rensing av avløp i settefiskanlegg: Forprosjektrapport*. SINTEF rapport SBF2011F0081. SINTEF Byggforsk, Trondheim, 2011: p. 37.
3. Vinci, B.J., et al., *Design of partial water reuse systems at White River NFH for the production of Atlantic salmon smolt for restoration stocking*. Aquacultural Engineering, 2004. **32**(1): p. 225-243.
4. Marineharvest, *Praktiske erfaringar med handtering av slam frå settefiskproduksjon*, Marineharvest, Editor. 2013.
5. Rosten, T.W., *Slam - felles utfordring – alternative løsninger*, SINTEF, Editor. 2013.
6. del Campo, L.M., et al., *Utilization of sludge from recirculation aquaculture*. Nofima Marin AS report, Innovation Norway, 2010.

Vedlegg C - Fullstendig datasett fra bombekalorimeter

Kalibreringen ble kjørt og varmekapasiteten C_B . Verdier og resultatet er vist i Tabell 1.

Tabell 1 Viser målte og beregnede verdier ved antenning av benzosyre.

| Størrelse | Verdi | Enhet |
|----------------------|--------|-------|
| Vekt | 1030,7 | mg |
| Spesifikk brennverdi | 26,454 | MJ/g |
| Avgitt energi | 27,27 | kJ |
| Temp før | 17,8 | °C |
| Temp etter | 20,4 | °C |
| Varmekapasitet | 10,44 | kJ/K |

Beregning av brennverdien i fiskeslam

Data og beregninger ved forbrenning av fiskeslam er presentert i Tabell 2. Askeandel er beregnet ved veiing av beholder for fiskeslam før og etter antenning.

Tabell 2 Viser målte og beregnede verdier for brenningen av fiskeslam.

| Prøve nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Enhet |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Vekt fiskeslam TS | 1027,65 | 1062,5 | 1084,9 | 1090,67 | 1238,4 | 1020,6 | mg |
| Vekt tenntråd før antenning | 16,83 | 17,32 | 16,04 | 16,19 | 16,8 | 14,15 | mg |
| Vekt tenntråd etter antenning | 3,2 | 0 | 1,45 | 1,46 | 2,5 | 5,2 | mg |
| Vannmengde | 2,7879 | 2,7878 | 2,7878 | 2,7878 | 2,7878 | 2,7878 | kg |
| T1 | 19 | 20 | 21,15 | 21,7 | 22,9 | 13,9 | |
| T2 | 21,4 | 22 | 23,15 | 23,3 | 24,7 | 15,6 | |
| Energi tenntråd | 0,080 | 0,101 | 0,085 | 0,086 | 0,084 | 0,052 | kJ |
| Øvre Brennverdi | 24314 | 19564 | 19175 | 15242 | 15113 | 17345 | kJ/kg |
| Vekt beholder før | - | 13525 | 13530,7 | 13527,32 | 13528,9 | 13534 | mg |
| Vekt beholder etter | - | 13695,4 | 13653,3 | 13788,8 | 13775,2 | 13754,8 | mg |
| Aske | 119,4 | 170,4 | 122,6 | 261,48 | 246,3 | 220,8 | mg |
| Askeandel | 0,12 | 0,16 | 0,11 | 0,24 | 0,20 | 0,22 | mfrak |



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway