



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Dimensjonering av oksygenerings anlegg for delvis lukkede laksemerder**

Dimensioning of oxygenation system for partially  
closed salmon sea cages

Ole Aas Skålnes  
Maskin, prosess- og produktutvikling



## Forord

Denne masteroppgaven er min avslutning på studiet maskin, prosess og produktutvikling med hovedvekt på prosess ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU).

Innholdet, beregninger, dimensjoneringer og konklusjon er blitt utført av undertegnende.

Ønsker å takke veilederen min førsteamanuensis Odd Ivar Lekang for god rådgivning, veiledning, hjelp med informasjon og diskusjonspartner under prosjektet. Videre vil jeg takke min sekundær veileder Børre Waagan for god veiledning og kontaktperson til prosjektet. Takker Ingar Kjustolfsen (Praxair) for informasjon om komponenter.

Undertegnede hadde ingen erfaring med teknologi og produksjon innenfor akvakultur før oppstart av oppgaven. Første tiden av arbeidet med masteroppgaven gikk derfor med til å tilegne seg kunnskap om akvakultur generelt og med oppdrett av laks. Dette gjenspeiles i første del av oppgaven. Jeg har noe erfaring fra dimensjonering av andre prosesssystemer fra min tidligere hovedoppgave (TMPP350) på NMBU som omhandlet produksjon av biodiesel. Oppgaven har gitt meg en innsikt i problemstillinger og oppgaver jeg kan møte i arbeidslivet som ingeniør – noe jeg setter pris på.

Prosjektet har gitt muligheten for å forbedre mine evner i formulering og oppsett av en hovedoppgave. Jeg håper arbeidet kan benyttes som bidrag i det videre arbeid med utvikling av systemer for oksygenering av laks i sjøanlegg.



## Sammendrag

Lakselus er en betydelig utfordring i dagens oppdrettsnæring. Løsninger på luseproblematikken inkluderer bruken av luseskjørt rundt oppdrettsmerden for å hindre lus i å komme til. En annen løsning er å bruke lukkede merder. Begge disse forhold krever at det tilføres ekstra oksygen til fisken i merden. En annen faktor som også kan kreve ekstra tilførsel av  $O_2$  er algeoppblomstring. Enkelte hevder at  $O_2$  metningsprosenten i vannet alltid bør være over 90 %, noe som ofte vil kreve en kontinuerlig tilførsel av oksyngengass til merden.

I denne oppgaven er det sett på utforming og dimensjonering av et system for lagring og tilførsel av oksygen gass til merdanlegg. Som utgangspunkt for dimensjonering er det satt følgende to forutsetninger, det regnes på 1 MTB, snitt vekt laks 1 kg og vanntemperatur 15 °C. Det foreslåtte systemet inkluderer tank for lagring av flytende  $O_2$  på land, transport av flytende  $O_2$  ut til merdanlegg på båt med påmontert konteiner rack. På merdanlegget ligger flåte/lekter med lagringskontainer for flytende  $O_2$ . videre er det foreslått en væskekjølt  $O_2$  fordamper for å gjøre LOX om til gass. Som innblander er det foreslått et mikroboble injeksjonssystem fra Pentair. Det totale oksygenforbruket under de gitte forutsetningene er beregnet til 184,74 kg/time. Litteratursøk viser store variasjoner i beregningen av oksygenforbruket hos laks i sjøvann. Mye av oppgaven har bestått i å utforme og dimensjonere et system for omdanning av flytende  $O_2$  til gass. Grunnet det store  $O_2$  behovet ville en tradisjonell luftfordamper bli veldig stor i omkrets/volum, den vil være upraktisk å plassere på en flåte og kostnadskrevende. Alternativ teknologi med bruk av væskefordamper ble derfor utredet. Her ble erfaring fra gassifiseringsanlegg for LNG tatt inn. Med basis i det lave kokepunkt for LOX (-183 °C) vil det være problematisk å kjøre direkte veksling mot sjøvann, Sjøvann fryser og en tinesyklus vil kreve dobbel kapasitet. Det ble derfor valgt å benytte et system med propan som mellom kjølemedium. Propan ble brukt til fordamping av LOX og sjøvann ble brukt til fordamping av propan. På denne måten reduseres faren for frost i fordampere. Dimensjonering av fordampere viste seg å være en betydelig utfordring, og det var vanskelig å finne data for faseovergang for oksygen ved ulike trykk. Ved dimensjonering av fordamper oppstod utfordringer ved faseforandring, dette medførte til økt trykk og hastighet, og redusert ledningsevne. Dette gjorde det vanskelig å beregne diameteren og lengden til rørene, og hastigheten til mediene. Noen overslagsberegninger er gjennomført samt sammenligning med lignende eksisterende anlegg.



## Abstract

Sea lice pose a considerable challenge to the existing salmon farming industry. Solutions to combat the sea lice problem include the use of protective skirts around the salmon cages to prevent lice from entering the cage. A different solution is to use closed cages. Both options require the supply of additional oxygen to the fish inside the cages. Another factor that may require extra supply of O<sub>2</sub> is algal bloom. Some contend that O<sub>2</sub> saturation in the water should always be above 90 percent but this would require a continuous supply of oxygen gas to the cage.

This thesis discusses the design and dimensioning of a system for the storage and supply of oxygen gas to cage facilities. The dimensioning rests on two assumptions and includes calculations based on 1 MAB (maximum allowed biomass), salmon of an average weight of 1 kg and a water temperature of 15 °C. The proposed system includes an onshore storage tank for liquid O<sub>2</sub> (LOX) and transport of LOX to the cage facility using a boat fitted with a container rack. A raft/barge with a LOX storage container onboard is located adjacent to the cage facility. Furthermore, it is proposed to install a liquid cooled O<sub>2</sub> vaporizer to convert LOX to gas. The proposed solution is to use a Pentair micro bubble injection system as mixer. The total oxygen consumption under the given assumptions is calculated at 184.74 kg/hour. Literature searches show major variations in the calculation of oxygen consumption for salmon in sea water. A considerable part of the thesis is devoted to designing and dimensioning a system for converting LOX to gas. Since large amounts of O<sub>2</sub> is required, a traditional air vaporizer would need to have a very big circumference/volume, and it would be impractical and costly to install such a device onboard a barge. Alternative technology using a liquid vaporizer was therefore studied. This included a review of experiences from using LNG gasification plants. Based on the low boiling point for LOX (-183 °C) it would be difficult to run a process with direct seawater exchange. Seawater freezes and a thaw cycle would require double capacity. Consequently, a system with propane as an intermediate cooling medium was chosen. Propane was used for LOX vaporization and seawater was used to vaporize propane. This reduces the vaporizer freeze risk. Dimensioning the vaporizers turned out to be a considerable challenge and it proved difficult to find data for oxygen phase conversion at various pressures. The process of dimensioning the vaporizer also posed challenges due two phase changes which resulted in increased pressure and flow rate as well as reduced conductivity. This made it difficult to calculate the diameter and length of the pipes and the

media flow rates. Some calculation estimates were carried out and comparative studies of similar existing facilities were also made.



## Innhold

Forord .....	I
Sammendrag .....	III
Abstract .....	V
Figur og tabell liste .....	XI
Forkortelser og symboler .....	XIV
1. Innledning.....	1
1.1 Historikk .....	1
1.2 Utvikling av laksenæringen .....	1
1.3 Problemstilling: .....	2
1.4 Mål og ramme.....	2
1.5 Innsatsfaktorer og forutsetninger .....	2
1.6 Forenklinger.....	3
2. Teori .....	5
2.1 Oppbygning og komponenter .....	5
2.2 Luseskjørt .....	6
3. Biologi.....	7
3.1 Miljøfaktorer.....	8
3.1.1 Vannkvalitet .....	8
3.1.2 Oksygen/temperatur .....	9
3.1.3 Karbondioksid .....	9
3.1.4 Ammoniakk/ammonium.....	10
3.1.5 Salinitet.....	10
3.1.6 Strømningsforhold.....	11
3.2 Fysiologi .....	12
3.2.1 Metabolisme, oksygenbehov og temperatur.....	12
3.2.2 Beregning av oksygennivå i vannet .....	14

3.2.3	Oksygenforbruk hos laks.....	15
3.2.4	Toleranseområde for oksygenmetning ved ulike temperaturer.....	18
3.2.5	CO <sub>2</sub> .....	19
3.2.6	Ammoniakk (NH <sub>3</sub> ).....	19
3.2.7	Salinitet.....	19
3.3	Lakselus.....	19
3.4	Alger.....	19
4.	Teori.....	21
4.1	Prosess.....	21
4.2	Landlagring.....	21
4.3	Offshore tanker.....	24
4.4	Prinsipper for energioverføring.....	25
4.4.1	Varmeveksler.....	25
4.4.2	Platevarmeveksler.....	25
4.4.3	Rørvarmeveksler.....	26
4.4.4	Design av fordampere.....	27
4.4.5	Open rack vaporizer (ORV):.....	28
4.4.6	«Submerged combustion vaporizer» (SCV):.....	30
4.4.7	Luft fordamper «ambient air vaporizer» (AAV):.....	31
4.4.8	Mellomprodukt væske fordamper «Intermediate fluid vaporizer» (IFV):.....	32
4.5	Prinsipp for beregning av dimensjonering.....	33
4.5.1	Energibehov:.....	33
4.5.2	Dimensjonering av varmeveksler:.....	34
4.5.3	Total energioverføringskoeffisient.....	35
4.5.4	Konduksjon.....	36
4.5.5	Tvungen konveksjon.....	37
4.5.6	Varmeoverføringskoeffisienten.....	37

4.5.7	Nusselts tall (Nu).....	38
4.5.8	Prandtls tall (Pr) .....	38
4.5.9	Reynolds tall (Re).....	38
4.6	Innløsnings metoder .....	39
4.6.1	Effektivitet.....	39
4.6.2	Prinsipp ved innløsning.....	40
4.6.3	Lavt trykk metoder .....	41
4.6.4	Høyt trykk metoder .....	44
5.	Beregninger .....	47
5.1	Beregning av oksygenforbruk hos laks .....	47
5.2	Fordamper system.....	49
5.3	Energibehov og massestrømning i varmekslere .....	51
5.3.1	LOX fordamper .....	51
5.3.2	Oksygen varmeveksler .....	55
5.3.3	Propan fordamper:.....	58
6.	Dimensjonering av komponenter .....	63
6.1	Landlagring.....	63
6.2	Lagring.....	64
6.3	Fordamper.....	64
6.3.1	Estimat ved å ekspandere væskene i beregningene.....	65
6.3.2	Estimering fra Chart Industries fordampere:.....	65
6.3.3	Estimering utfra luftfordampere .....	66
6.3.4	Størrelsen til fordamper.....	67
6.4	Innløser .....	67
7.	Diskusjon.....	69
8.	Konklusjon .....	73
	<b>Referanser</b> .....	<b>74</b>

9. Vedlegg ..... 78

## Figur og tabell liste

Figur 1: Komponenter til en merd (GGN, 2017) .....	5
Figur 2: Merder ved ett oppdrettsanlegg (Egersundgroup, 2017) .....	5
Figur 3: Calanus sin planktonduk (Calanus, 2013) .....	6
Figur 4: Laksens livssyklus (Statkraft, 2017).....	7
Figur 5: Forholdet mellom pH og uorganiske karbon forbindelser (Portz et al., 2006).....	10
Figur 6: Forholdet mellom standard og aktiv -metabolisme for gitt fiskestørrelse (Hoar et al., 1979).....	12
Figur 7: Energiomsetning til laks (s.174(Ruth et al., 1992)).....	14
Figur 8: Grafisk fremstilling av Bretts likning for oksygenforbruk ved aktiv og standard metabolisme (s.190(Ruth et al., 1992)). .....	15
Figur 9: Grafisk fremstilling av Liaos likning for oksygenforbruk (s.192(Ruth et al., 1992)).	16
Figur 10: Grafisk fremstilling av Christiansens likning for oksygenforbruk (s.196(Ruth et al., 1992)). .....	17
Figur 11: Kritiske oksygenforhold ved temperaturstigning. Rødt område er skadelig oksygenmetningsgrad for laks, gult er svekkende og grønt er gode (Frank and Lien, 2015) .	18
Figur 12: Prosessen til oksygeneringssystemet .....	21
Figur 13: Skisse av landlagring anlegg (Praxiar, 2016) .....	22
Figur 14: Plantegning av «Cryogenic standard tanks LITS 2» fra Linde (2012).....	23
Figur 15: Oksygenpakker (Krebs, 2010) .....	24
Figur 16: 10ft kryogen offshore tank (Ferguson).....	24
Figur 17:Medstrøms varmeveksler (Troøyen) .....	25
Figur 18: Plate varmeveksler (Laval).....	26
Figur 19: Rørvarmeveksler (ndla) .....	26
Figur 20: Trykk-entalpi-diagram for propan (Reynolds) .....	27
Figur 21: Open rack vaporizer (ORV) (R. Agarwal) .....	29
Figur 22: SCV (Ukjent).....	30
Figur 23: Omgivelse luft fordamper (Patel et al., 2013) .....	31
Figur 24: IFV fordamper (Patel et al., 2013).....	32
Figur 25: IFV, på figuren vil LNG ha funksjon som LOX (Osaka, ukjent) LOX sendes inn i «LOX fordamperen», her fordampes og varmes oksygenet opp. Det sendes videre til en varmeveksler som i dette tilfelle benytte sjøvann for oppvarming, i oppgaven benyttes propan.	

Propan kondensatet fra fordamping og oppvarming av oksygen sendes til en fordamper som benytter sjøvann som varmekilde.....	33
Figur 26: Motstrøms varmeveksler (Sørensen) .....	34
Figur 27: Varmeledning hastighet (Odesie) .....	35
Figur 28: Hvordan formel for varmeledning er satt sammen (Odesie) .....	36
Figur 29: Varmeledning i forskjellige faser (Odesie) .....	36
Figur 30: Packet kolonne (Chemical engineering).....	41
Figur 31: Fyll legemer bruk i en pakket kollonne (environmental) .....	41
Figur 32: Mikroboble generator (snigdha Khuntia, 2012) .....	42
Figur 33: Nanoboble kutter (BUVITAS; Ligaric Company Limited, Osaka, Japan) (Kosuke et al., 2013).....	43
Figur 34: Skisse tegning av en oksygen kjegle (s.114(Lekang, 2007)). .....	44
Figur 35: Skisse tegning av en oksygen brønner (s.114(Lekang, 2007)).....	45
Figur 36: Her symboliserer fargekodene temperaturen i °C, x-aksen vekten på fisken og y-aksen (mgO <sub>2</sub> )/(kg*time). .....	48
Figur 37: Temperatur og tilstand til mediene i LOX fordamperen og oksygen varmeveksleren .....	49
Figur 38: Fasetilstand og temperatur til mediene i Propan fordamperen .....	50
Figur 39: IF-systemet for fordampning og oppvarming av LOX til O <sub>2</sub> gass .....	50
Figur 40: Linde Cryogenic standard tanks (Linde, 2012) .....	63
Figur 41: Offshore tank fra Praxair (2016a).....	64
Figur 42: Sammensatt system for en IFV for LNG (Kobelco).....	65
Figur 43: Plassering av doseringsskap (Pentair) .....	67
Figur 44: Lufting plattform (Pentair) .....	67
Figur 45: PID regulator(Mathisen, 2013).....	68
Figur 46: Produksjonsmengde akvakultur (sentralbyrå, 2016). .....	78
Figur 47: Solgt mengde og førstehåndsverdi av laks (sentralbyrå, 2016).....	78
Figur 48: Utvikling i produksjonskostnader fra 2001-2014 (Iversen et al., 2015).....	79
Figur 49: Utviklingen av produksjonskostnader fra 2001-2014 (s.8 (Iversen et al., 2015))....	79
Tabell 1: Grenseverdier i vannparametere for laks utviklet av mattilsynet (2004).....	8
Tabell 2: Oksygenløslighet (mg/l) i sjøvann (Praxair, 2012).....	9
Tabell 3: Verdiene for LOX og propangass som benytte for utregningene i kap. 5.3.1. ....	51

Tabell 4: Verdiene for oksyngengass og propangass som benytte for utregningene i kap. 5.3.2. .....	55
Tabell 5: Verdiene for propanvæske og sjøvann som benytte for utregningene i kap. 5.3.3... 58	58
Tabell 6:.....	80

## Forkortelser og symboler

**A** = Areal [ $\text{m}^2$ ]

**AAV** = Ambient air vaporizer (luft fordamper)

**Al** = Aluminium

**atm** = Atmosfærisk trykk [ $1 \text{ atm} = 1 \text{ bar}$ ]

**C** = Energi i føde

**CO<sub>2</sub>** = Karbondioksid

**C<sub>p</sub>** = spesifikk varmekapasitet [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]

**C<sub>p,k</sub>** = spesifikk varmekapasitet kaldt medium [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]

**C<sub>p,v</sub>** = spesifikk varmekapasitet varmt medium [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]

**C<sub>in</sub>** = Konsentrasjon av O<sub>2</sub> i vann inn [ $\text{mg}/\text{l}$ ]

**C<sub>ut</sub>** = Konsentrasjon av O<sub>2</sub> i vann ut [ $\text{mg}/\text{l}$ ]

**D** = Diameter [ $\text{m}$ ]

**d** = karakteristisk lengde [ $\text{m}$ ]

**Døgngrader** = antall døgn \* gjennomsnittlig temperatur per døgn

**F** = Tapt energi fra avføring

**FG** = Drivstoff gass forbrenner

**H** = Henrys konstant [ $\text{atm}/\text{mol}$ ]

**h** = Varmeoverføringskoeffisienten [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

**H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** = Bikarbonat

**IF** = Mellom medium

**IFV** = intermediate fluid vaporizer (mellomprodukt væske fordamper)

**K** = Kelvin

**k** = Varmeledningskoeffisienten for materialet eller mediet [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]

**k-verdi** = Varmeledningskoeffisienten for et materialet eller medium [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]

**LMTD** = logaritmisk midlere temperaturforskjell [ $^{\circ}\text{C}$ ]

**LNG** = Naturgass i væskefase

**LOX** = Oksygen i væskeform



$\dot{m}$  = Massestrøm [kg/s]

$\dot{m}_k$  = Massestrøm til kaldt medium [kg/s]

$\dot{m}_v$  = Massestrøm til varmt medium [kg/s]

**MAB** = maximum allowed biomass [780 tonn]

**Metabolisme/stoffskifte** = samlebetegnelse for livsnødvendige kjemiske reaksjoner i en celle

**MTB** = Maksimal total biomasse [780 tonn]

**NH<sub>3</sub>** = Ammoniakk

**NG** = Naturgass

**N<sub>t</sub>** = Antall rør

**Nu** = Nusselts tall

**O<sub>2</sub>** = Oksyngengass

**ORV** = Open rack vaporizer

***P<sub>faseovergang</sub>*** = Energien som må tilføres/hentes ved faseovergang [kJ/kg]

**P<sub>g</sub>** = partiastrykket til gass [atm]

**P<sub>i</sub>** = Partiastrykket av gassen [atm]

**P<sub>t</sub>** = Summen av trykket i en gassblanding [atom]

**PH-diagram** = Trykk-entalpi-diagram

**Q** = varmeraten [W]

**Q<sub>k</sub>** = Energi varm side [W]

**Q<sub>v</sub>** = Energi kald side [W]

**R** = Vedlikehold av livsfunksjoner

**R<sub>s</sub>** = Hvilemetabolisme

**R<sub>A</sub>** = Energi som går med til arbeid

**R<sub>D</sub>** = Energi for fordøyelse

**Salinitet** = Saltinnhold [‰]

**SCV** = Submerged combustion vaporizer (undervanns forbrennings fordamper)

**T** = Temperatur [°C, °F, K]

**T<sub>k,i</sub>** = Inngangstemperatur av kaldt medium [°C]

**T<sub>k,u</sub>** = Utgangstemperatur av kaldt medium [°C]

**T<sub>v,i</sub>** = Inngangstemperatur av varmt medium [°C]

**T<sub>v,u</sub>** = Utgangstemperatur av varmt medium [°C]

**ΔT<sub>LM</sub>** = Logaritmisk temperatur differansen [°C]

**TAN** = Total ammonium nitrogen

**U** = Energioverførings koeffisienten [W/(m<sup>2</sup>\*°C)]

**U** = tapt energi fra urin (Formel 3.4 og 3.5)

**v** = Hastigheten [m/s]

**V** = Energi omsatt tilvekst

**V<sub>s</sub>** = Somatisk vekst (fysisk vekst)

**V<sub>G</sub>** = Gonadevekst (dannelse av kjønnsceller)

**X** = Fiskevekt [g]

**X<sub>g</sub>** = konsentrasjonen av gass i vann [mol gass / (mol gass+mol vann)]

**Δx** = Tykkelsen på røret i varmeveksleren [m]

**Y** = Oksygenbehov for en fisk [mgO<sub>2</sub>]

**y** = Andelen av gass i [mol gas i / mol totalt gass i blandingen]

### **Dimensjonsløse forholdstall**

**Nu** = Nusselts tall

**Pr** = Prandlts tall

**Re** = Reynolds tall

### **Gresk symbolbruk**

**ρ** = Massetetthet [kg/m<sup>3</sup>]

**μ** = Viskositeten [kg/(m\*s)] = [10<sup>3</sup>cP]

# 1. Innledning

## 1.1 Historikk

Forskningen på avlingsprogrammet for laks og regnbueørret begynte i slutten av 1960-årene av professor Harald Skjervold ved Norges landbrukshøgskole (Syrstad, 2009). Han får tillatelse til å fange stamlaks fra 41 forskjellige elver. Dette blir starten på avlsprogrammet til norsk laks. I 1970 begynte brødrene Ove og Sivert Grøntvedt verdens første lakseoppdrett på Hitra. Brødrene hadde vært fiskeskippere og jobbet med nøter og merder for sei. De utnyttet kunnskapen og utviklet åttekantede flytemerder, dette for å gi fisken mulighet til å svømme i ring (Berge, 2014). Anlegget til brødrene blir starten på utviklingen av lakseoppdretter langs norskekysten. I 1973 vedtar stortinget en konsesjonslov for oppdrettsnæringen (NORGE, 2016). Formålet med loven var å regulere utviklingen av næringen slik at den styrker norske kyst- og fjordsamfunn. Loven forhindret industrigigantene og ga myndighetene mulighet til å stille krav om kvalitet og sunnhet ved anleggene. I 1978 blir det en stopp på konsesjoner, dette skyldes en voldsom interesse for næringen. I 1985 vedtatts en ny lov hvor konsesjon for produksjon av fisk og skalldyr blir opphevet, kun registrering er krav (Lovdata).

Lakseoppdrett næringen har vært i konstant vekst og utvikling. Dette har ført til at det i dag er en av Norges største næringer (NORGE, 2016).

## 1.2 Utvikling av laksenæringen

Laksenæringen er en av Norges største eksportnæringer. Norge produserte i 2015, 1 303 346 tonn laks (sentralbyrå, 2016). Dette tilsvarer 94,4 prosent av Norges totale akvakultur produksjon (Figur 46). De siste to tiårene har det vært en jevn stigning av solgt mengde laks (Figur 47). Produksjonskostnaden for laks har vokst, dette skyldes økte fôrkostnader (Figur 48). Som andre produksjonsnæringer er laksenæringen preget av priskonkurranse. Dette medfører en økt interesse for bedre utnyttelse av innsatsfaktorer.

Laksenæringen er en prissensitiv næring. Næringen har ikke mye rom for økte kostnader. Kontali Analyse AS (2015) beskriver utviklingen av produksjonskostnadene for 1 kg laks i en tabell (Figur 48). Her utgjør fôrkostnadene ca. 40 % av salgsværdien til laks, dette er omtrent 11 kr. Laks behøver gjennomsnittlig 1,15 kg fôr for å oppnå en vekst på én kilo (laks.no). I 2014 var smoltprisen på laks 2 kr per kg laks (Figur 49). Dette utgjorde ca 6 % av salgssummen. Figur 49 tar for seg de viktigste driftskostnadene for ett oppdrett.

Denne oppgaven setter fokus på mulighet for å optimere vekstforhold, redusere laksedød og lusepåslag i merder. Virkemidlene som analyseres er bruk av presenningskjørt og oksygenering. Oppgaven omhandler beregning og dimensjonerings av anlegget. Det legges ekstra vekt på fordamperen.

### 1.3 Problemstilling:

Målet med oppgaven er å prosjektere et oksygeneringsystem. Systemet skal dimensjoneres for å dekke oksygenforbruket til 780 tonn laks (1 MTB) med gjennomsnittsvekt 1 kg ved 15 °C.

### 1.4 Mål og ramme

#### **Hovedmål:**

1. Estimering av oksygenforbruket til 1 MTB laks med vekt på 1 kg ved sjøtemperatur 15 °C.
2. Dimensjonering av et kompakt oksygeneringsanlegg som skal levere tilstrekkelig oksygen til merdanlegg og unngå nedfrysing.

#### **Delmål:**

1. Anleggsplan: Beskrivelse av forutsetningene.
2. Anleggsbeskrivelse: beskrivelse av betingelser, teori rundt valg av utstyr, lager, fordamper, innsprøytningssystem, oksygenforhold og oksygenforbruk.
3. Komponent beskrivelse: Detaljert beskrivelse av hver komponent som er valgt i anleggsbeskrivelsen.
4. Sette sammen komponentene i anlegget, valg av lager, fordamper og innløser, indikere temperaturer og væskestrømmer.
5. Dimensjonering av de enkelte komponentene: Størrelse på lagre, kapasitet og størrelse til fordamper og kapasitet til innløser.

#### **Begrensninger:**

- Oppgaven ser ikke på økonomiske aspekter ved produksjon eller dimensjonering av anlegget.
- Det er ikke dimensjonert pumper for anlegget.

### 1.5 Innsatsfaktorer og forutsetninger

I oppgaven er det gjort flere antagelser og kvalifiserte gjetning på flere av dataene som benyttes i beregningene.

Forutsetninger:

Temperatur for oksygenforbruket hos fisk = 15°C

Temperatur for beregning av fordampner = 5 °C

Strømning = 0 m<sup>3</sup>/s

Hovedkomponenten til anlegget er LOX fra Yara Praxair. LOX er lagret på -183°C ved atm. trykk. Væsken vil ha en ekspansjonsrate på 854 liter oksyngengass ved 15°C og atm trykk.

## 1.6 Forenklinger

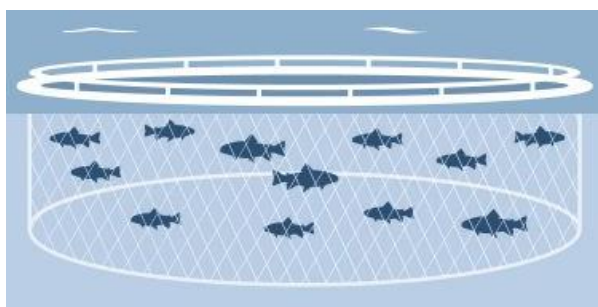
- Antar at strømning er null.
- Ser bort fra trykkforandringer i rør
- Det ses bort fra beregninger ved tofasesituasjoner i varmeveksleren



## 2. Teori

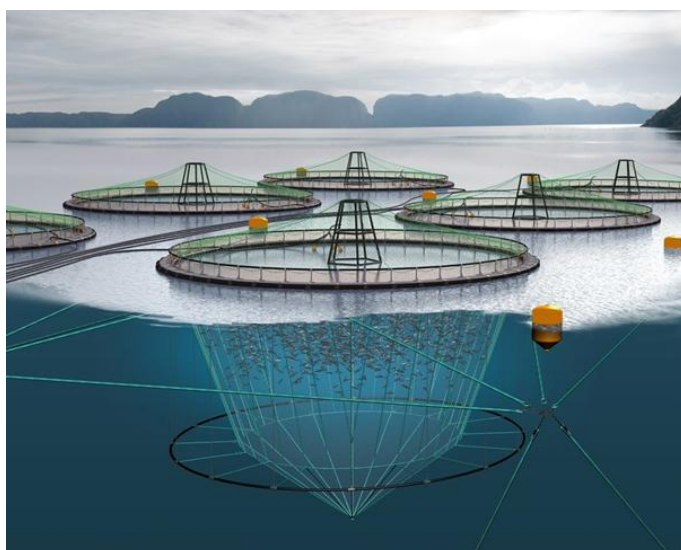
### 2.1 Oppbygning og komponenter

En tradisjonell merd er sammensatt av flere komponenter (Figur 1). Hovedkomponentene er et flytende rammeverk bestående av plast eller stål. Rammeverket holder oppe en notpose slik at fisken ikke slipper ut i omgivelsene, og hoppenett for å hindre at fisken hopper ut (Figur 2). For å hindre fugl i ta fisk benyttes det ofte fuglenett over merden. Gode forankringssystemer og sikkerhetstiltak er viktig for å hindre rømming. Miljøfaktorer som is, vind, strøm og bølger er lagt inn som ytre faktorer ved dimensjonering av et anlegg.



*Figur 1: Komponenter til en merd (GGN, 2017)*

Notdybden varierer fra 13 m - 64 m og omkretsen 40 m-200 m (AKVAGROUP, 2016). Polyetylen (PE) er et mye benyttet materiale i flytekragen. Dette skyldes PE sine gode materialegenskaper, blant annet bøyelighet.

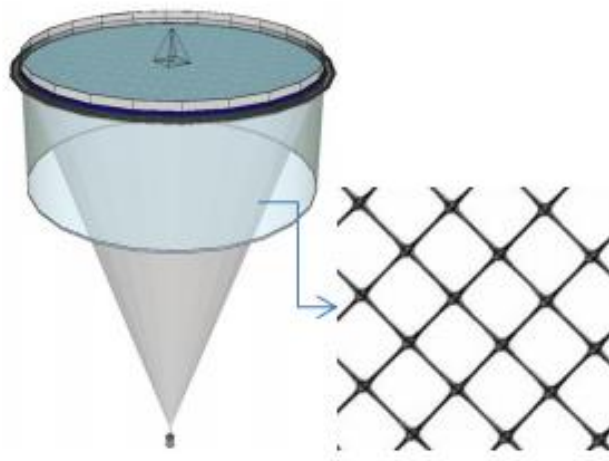


*Figur 2: Merder ved ett oppdrettsanlegg (Egersundgroup, 2017)*

## 2.2 Luseskjørt

Luseskjørt kan benyttes for å redusere lusepåslaget. Det finnes to typer skjørt planktonduk (Figur 3) og presenningskjørt. Planktonduken har en tynneste maskevidde på 350  $\mu\text{m}$  dette reduserer lysåpningen med 50 % (Calanus, 2013). Disse åpningene bevarer noe av vanngjennomstrømmingen, mens Presenningskjørt derimot er tett og gir ingen vanngjennomstrømning. Planktonduk vil imidlertid være utsatt for begroing, dette medfører dårligere vannsirkulasjon gjennom planktonduken. Begge typer skjørt krever regelmessig rengjøring og vedlikehold.

Hvor effektivt et luseskjørt hindrer at lus kommer inn i noten og slår seg på fisken, avhenger av dybden på skjørtet. Størst effekt vil oppnås ved bruk av 10 m dype skjørt. Dette forhindrer infeksjose stadier av lakselus og andre uønskede organismer. Det er gjennomført flere forsøk med forskjellig dybde på skjørt. I 2011 (Fornes) ble det gjennomført et forsøk med bruk av 10 m dype skjørt (Calanus, 2013). Merder med skjørt fikk da en reduksjon av lusepåslag på 70-75 % i forhold til merder uten skjørt. I 2012-2013 ble det gjennomført flere forsøk ved bruk av 10 m dype skjørt på Dragnes (Hadsel). Dette ga like resultater som Fornes. Det ble også benyttet 6 m skjørt, lusepåslaget ble da redusert med 40-45 %.

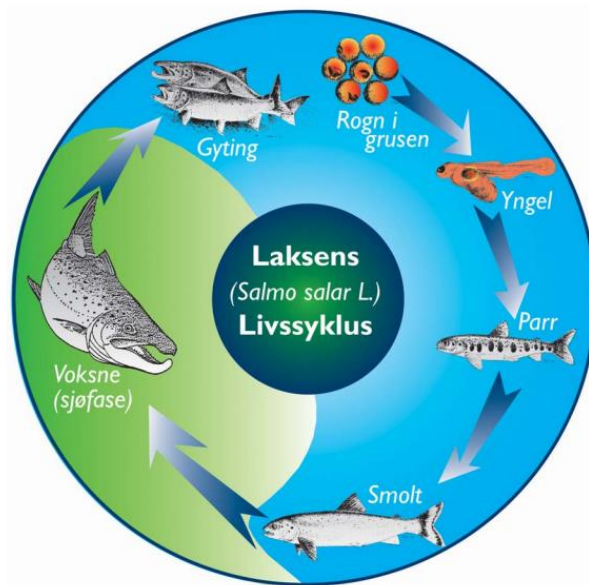


Figur 3: Calanus sin planktonduk (Calanus, 2013)



### 3. Biologi

Produksjon av slakteklar laks tar i størrelsesorden tre år. Laksen går i denne perioden gjennom fem faser: plommeseekkyngel, yngel, laks par, smolt og vekstfase i sjøanlegg (Seafood, 2017) se Figur 4. Prosessen starter ved å blande rogn og melke fra kjønnsmoden stamlaks for å befrukte egg. Rognen blir holdt i mørket i spesielle beholdere, mens ferskvann hele tiden renner over rognkornene. Etter 220 døgngader vil to små svarte prikker observeres på rognen. Dette er øynene til fiskelarven. Ved 500 døgngader klekker rognen og lakselarver kommer ut. Disse kalles plommeseekkyngelen. Yngelen har en sekk på magen som den trekker næring fra, derav navnet. Etter 300 døgngader vil yngelen være 2-4 cm lang og den vil begynne å ta til seg næring. I løpet av et halvt til et år vokser yngelen i størrelsesorden fra 1 g til 100 g smolt. Nå er fisken klar til å settes i sjøen. Fra laksen settes i saltvann og til den veier 1 kg kalles den ofte for postsmolt. Fisken føres så i 1-2 år, avhengig av temperatur. Da veier fisken 4-6 kg og er klar for slakting (Seafood, 2017).



Figur 4: Laksens livssyklus (Statkraft, 2017)

### 3.1 Miljøfaktorer

Merdmiljøer er kompliserte systemer hvor fisken påvirkes av ulike faktorer. De parameterne som påvirker fisken i merdene er oksygen nivå, salinitet, ammoniakk, CO<sub>2</sub>, strømningshastighet og temperatur. Siden merdene er åpne er det liten til ingen kontroll av disse verdiene.

#### 3.1.1 Vannkvalitet

Målet med oppdrett er å maksimere den biologiske produksjonen, der ønsket er å produsere en sunn og sterk fisk. Laks har gode forutsetninger for å trives i oppdrett (Ervik, 2008), men den stiller krav til vannkvalitet. Optimalisering av de ulike parameterne fra kap 3.1 gir fisken de beste vekstmulighetene. Det er ikke ønskelig at homeostasen blir vesentlig forstyrret slik at fisken får sekundære fysiologiske skader (følgeskader). Forandring eller avvik utenfor toleranseområdet vil kunne føre til stress og i verste tilfelle død. Raske forandringer innenfor optimalt område vil oppfattes som stressende. Ett oppdrettsanlegg kan ses på som et basseng hvor man ønsker å opprettholde de beste betingelsene for trivsel og vekst.

Tabell 1 viser mattilsynet (Rosten) sine grenseverdiene for vannparameterne i en rapport fra (2004).

*Tabell 1: Grenseverdier i vannparametere for laks utviklet av mattilsynet (2004)*

Parameter	Optimalt	Tålbart	Betinget	Uakseptabelt
Oksygen (O <sub>2</sub> )	100%	60%	50%	40%
Karbondioksid (CO <sub>2</sub> )	1-10 mg/l	10-40 mg/l	60 mg/l	100 mg/l
Ammoniakk (NH <sub>3</sub> )	0	15 – 20 µg		
pH	7-8,5			
Temperatur	6-18 °C			

### 3.1.2 Oksygen/temperatur

Løseligheten av oksygen i vann påvirkes av temperatur, salinitet og trykk. Ved økt temperatur og salinitet vil oksygenkonsentrasjonen i vannet reduseres (Tabell 2).

Tabell 2: Oksygenløselighet (mg/l) i sjøvann (Praxair, 2012).

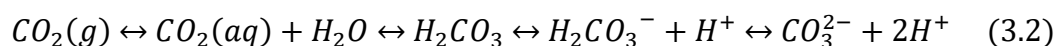
°C	28 ‰	30 ‰	31 ‰	32 ‰	33 ‰	34 ‰
1	11,78	11,62	11,54	11,46	11,38	11,30
2	11,48	11,32	11,25	11,17	11,09	11,02
3	11,20	11,04	10,97	10,89	10,82	10,75
4	10,90	10,76	10,69	10,62	10,55	10,48
5	10,64	10,50	10,43	10,36	10,29	10,22
6	10,39	10,26	10,19	10,13	10,06	10,00
7	10,14	10,01	9,94	9,88	9,81	9,75
8	9,91	9,78	9,71	9,65	9,58	9,52
9	9,67	9,55	9,49	9,43	9,37	9,31
10	9,46	9,34	9,28	9,23	9,18	9,12
11	9,26	9,14	9,08	9,03	8,97	8,91
12	9,06	9,00	8,94	8,88	8,83	8,78
13	8,87	8,75	8,69	8,64	8,58	8,52
14	8,67	8,57	8,52	8,47	8,42	8,37
15	8,49	8,39	8,34	8,29	8,24	8,19
16	8,33	8,23	8,18	8,13	8,08	8,03
17	8,16	8,06	8,01	7,96	7,91	7,86
18	8,02	7,92	7,87	7,82	7,78	7,73
19	7,86	7,76	7,72	7,76	7,63	7,58
20	7,70	7,62	7,58	7,53	7,49	7,45

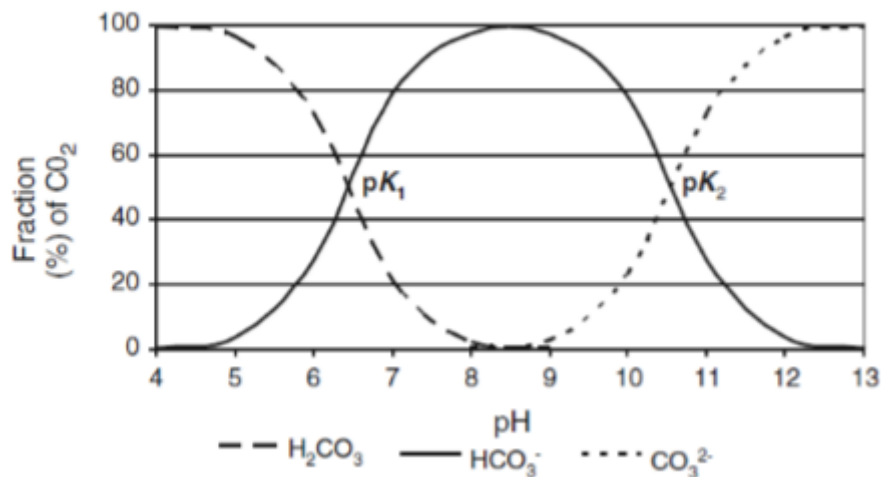
### 3.1.3 Karbondioksid

Karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ) løst i vann gir pH reduksjon.  $\text{CO}_2$  vil delvis reagere med vann og danne den svake syren karbonsyre ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Dette avhenger av pH-verdien i sjøvann. PH-verdi er en negativ logaritme av  $\text{H}^+$ -ioner gitt av likning 3.1:

$$pH = -\log[H^+] \quad (3.1)$$

PH-verdiens grenseområde er 0-14. Hvor en pH-verdi på 7 gir nøytral løsning. Ved  $pH < 7$  er løsningen sur, mens  $pH > 7$  betyr en basisk løsning. Karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ) reagerer med vann og danner karbonsyre ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Videre dannes bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) som omdannes til karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Da frigjøres  $\text{H}^+$ -ioner som medfører senket pH. Ved lav pH reduseres vannets evne til å ta opp  $\text{CO}_2$  da likevekten forskyves mot venstre i Figur 5.



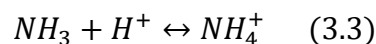


Figur 5: Forholdet mellom pH og uorganiske karbon forbindelser (Portz et al., 2006)

Normal pH-verdi for sjøvann ligger fra 7-9. Figur 5 viser hvilke stoffer som dannes når CO<sub>2</sub> reagerer med vann ved forskjellige pH-verdier. Løseligheten til CO<sub>2</sub> i vann avhenger av temperatur og salinitet, ved økt temperatur og saltinnhold minker løseligheten. Økte CO<sub>2</sub> konsentrasjoner i vannet vil kunne påvirke fisken direkte og indirekte. Direkte ved dårligere oksygenopptak og indirekte ved at pH reduseres. Redusert pH vil medføre utfelling av metallioner som aluminium, dette er mest aktuelt for ferskvann (sur nedbør problematikk). Sjøvann har en god bufferkapasitet og derfor er ofte pH reduksjon ikke et aktuelt problem (Olsen, 2013).

### 3.1.4 Ammoniakk/ammonium

Ammoniakk (NH<sub>3</sub>) forekommer naturlig fra metabolsk nedbrytning av aminosyrer. Ammoniakk forbindelsen kan forekomme på to hovedformer, u-ionisert ammoniakk (NH<sub>3</sub>) i gassform og ionisert ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) i salter. Summen av disse kalles TAN (total ammonium nitrogen).



Faktorer som pH, temperatur og salinitet påvirker likevekten. Ved økende pH og temperatur vil det dannes ammoniakk (NH<sub>3</sub>) fra ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Økende salinitet reduseres NH<sub>3</sub> andelen. Ammoniakk delen er den giftige for fisken (Olsen, 2013).

### 3.1.5 Salinitet

Etter smoltifisering er fisken tilpasset å tåle høy salinitet (>30‰). Sjøvann har generelt en verdi på 35‰.

### 3.1.6 Strømningsforhold

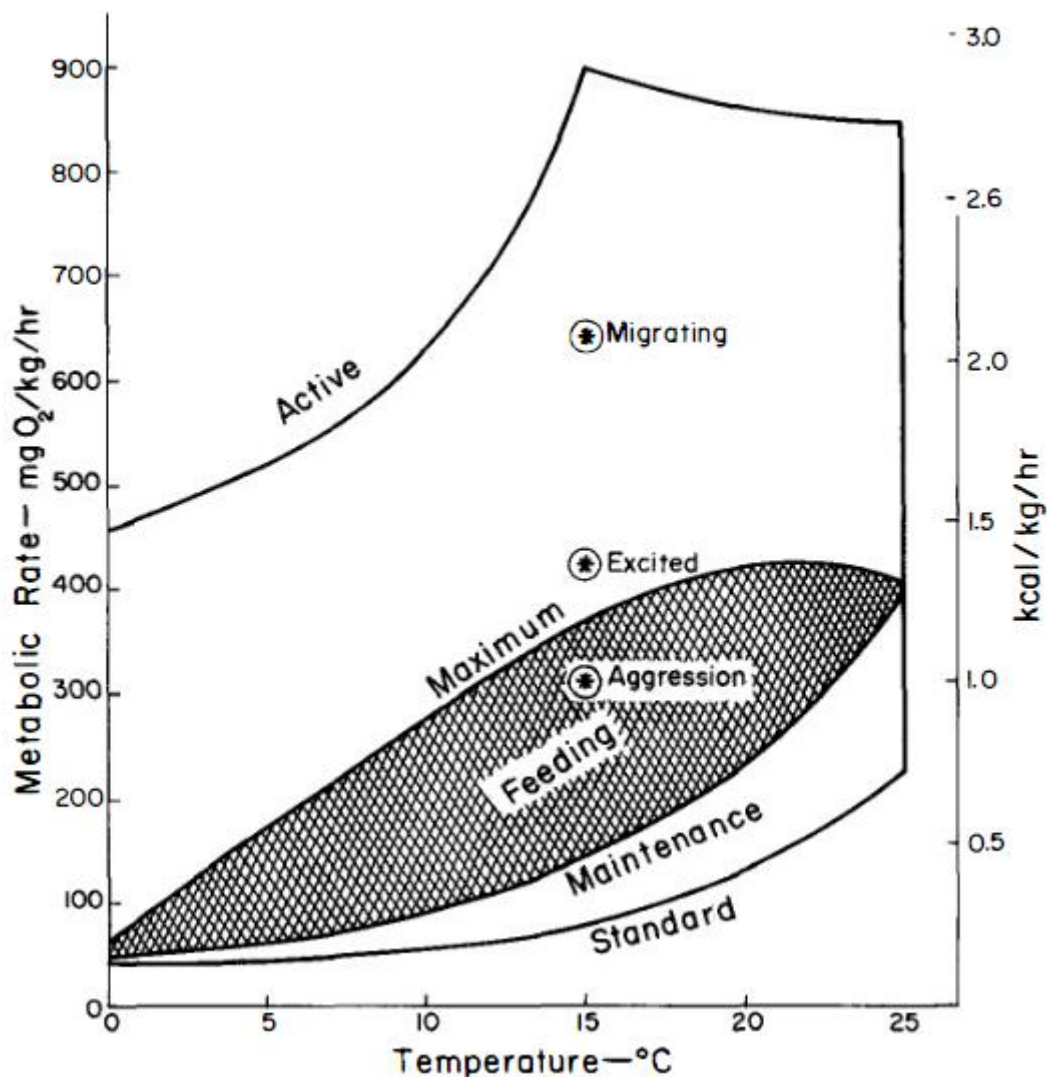
Langs kysten vil flo og fjære påvirke strømningsforholdene, mens Golfstrømmen påvirker strømningsforholdene i fjordene. For de øvre vannlagene vil vindretning og styrke påvirke strømningsforholdene.

## 3.2 Fysiologi

I beskrivelsen av de fysiologiske prosessene er det tatt utgangspunkt i et lukket anlegg. I en merd med skjørt vil ytre faktorer påvirke, disse er det ikke tatt utgangspunkt i her.

### 3.2.1 Metabolisme, oksygenbehov og temperatur

Fisken sitt oksygenforbruk bestemmes etter den metabolske aktiviteten. Enzymer har en økende effekt ved stigende temperatur. Enzymene hos laks påskynder transport av ioner over gjellene og prosesser knyttet til fordøyelse og energiomsetningen (Grøner, Nr. 13), med andre ord økt metabolisme. Det motsatte er tilfelle ved lave temperaturer. Ved økende energiomsetning er det behov for et økt oksygenopptak. Høye temperaturer i vannet reduserer hemoglobinetts evne til å binde oksygen som følge av pH fall og økt CO<sub>2</sub>. Toleranseområdet for laks ligger i området 0-20°C, mens optimale vekstforhold oppnås mellom 15-16 °C.



Figur 6: Forholdet mellom standard og aktiv -metabolisme for gitt fiskestørrelse (Hoar et al., 1979).

Figur 6 viser oksygenbehovet ved forskjellige metabolske tilstander og temperaturer. Standardmetabolisme eller vedlikehold er vedlikeholdsarbeidet i kroppen. Dette inkluderer hjerteaktivitet, respirasjon, osmoregulering og nervefunksjoner (s.175(Ruth et al., 1992)). Hvis fisken spiser og fordøyer fôret, men ikke vokser vises dette i Figur 6 som «maintenance» vedlikehold. I det skraverte område vil fisken ha tilstrekkelig oksygentilgang for vekst, uten fysisk aktivitet. Dette kalles fôringsmetabolisme. Fisken i en merd antas å holde et oksygenbehov tilsvarende fôringsmetabolismen. Med aktiv metabolisme forstås prosesser som bevegelse, syntese av rogn, melke og opprettholdelse av kroppsvev (s.175(Ruth et al., 1992)). Fisken benytter også oksygen til å forbrenne energien i fôret. Energiomsetningen til laks gjengis i likning 3.4 og 3.5 (Grøner, Nr. 13) å referer til Figur 7:

$$C = V + R + F + U \quad (3.4)$$

C = Energi i føde

V = Energi omsatt til vekst

R = Opprettholding av livsfunksjoner

F = Tapt energi fra faeces (avføring)

U = Tapt energi fra urin

Videre deles vekst og livsfunksjoner til fisken inn i flere underkategorier:

$$C = (V_S + V_G) + (R_S + R_A + R_D) + F + U \quad (3.5)$$

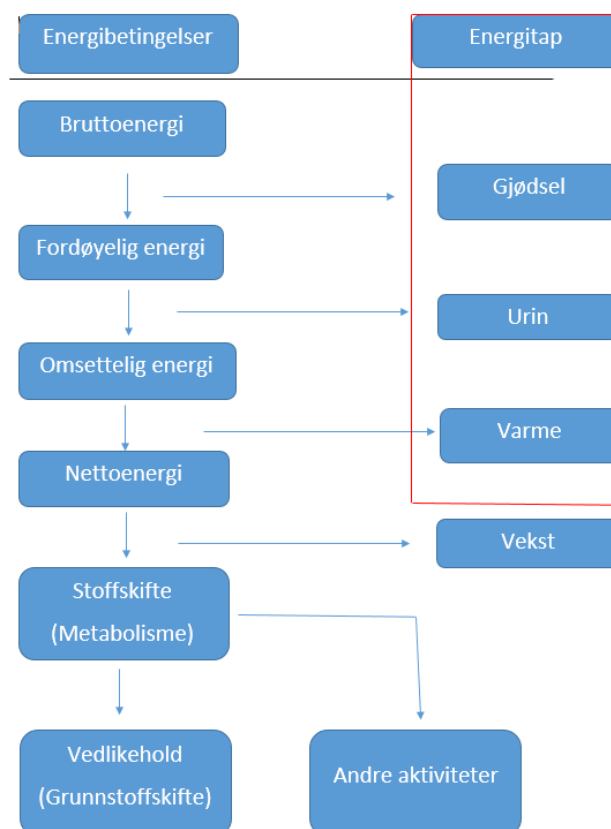
V<sub>S</sub> = Somatisk vekst (fysisk vekst)

V<sub>G</sub> = Gonadevekst (dannelse av kjønnseller)

R<sub>S</sub> = Hvilemetabolisme

R<sub>A</sub> = Energi som går med til arbeid (svømming)

R<sub>D</sub> = Energi for fordøyelse



Figur 7: Energiomsetning til laks (s.174(Ruth et al., 1992)).

### 3.2.2 Beregning av oksygennivå i vannet

Det er delte meninger om hvilke metoder som best reflekterer fiskens oksygenbehov. Ved fysiologiske forsøk benyttes  $\text{mgO}_2\text{kg}^{-1}\text{h}^{-1}$  (milligram oksygen per kg laks per time). En annen metode er metningsgrad som angis i prosent. Benevnelsen  $\text{mgO}_2\text{kg}^{-1}\text{h}^{-1}$  gir et eksakt tall på oksygeninnholdet i vannet. For metningsgraden må temperatur og salinitet være kjent for å angi nøyaktig mengde oksygen i vannet. I oppgaven vil beregningene gjøres i  $\text{mgO}_2\text{kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ . Dette gir bedre nøyaktighet og sikrere beregninger.



### 3.2.3 Oksygenforbruk hos laks

#### Bretts likning:

J. R. Brett gjennomførte forskning på oksygenforbruk hos laks fra 1962-1982 (s.189(Ruth et al., 1992)). Han utviklet en likning 3.6 som beregner fiskens oksygenforbruk både ved aktiv og standard metabolisme:

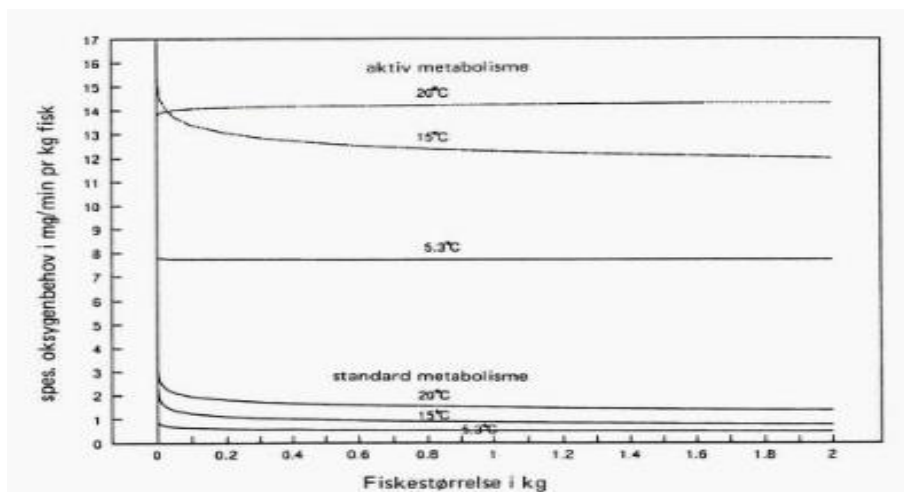
$$Y = aX^b \quad (3.6)$$

X = Fiskevekt [g]

Y = Oksygenbehov for en fisk [mgO<sub>2</sub>]

a,b = Konstanter

Her er a og b konstanter som avhenger av type metabolisme og temperatur. Brett lagde likningen for laks fra 2-2000g. Dette kan leses ut fra Figur 8, resultatene kommer fra likning(3.6).



Figur 8: Grafisk fremstilling av Bretts likning for oksygenforbruk ved aktiv og standard metabolisme (s.190(Ruth et al., 1992)).

### Liaos likning:

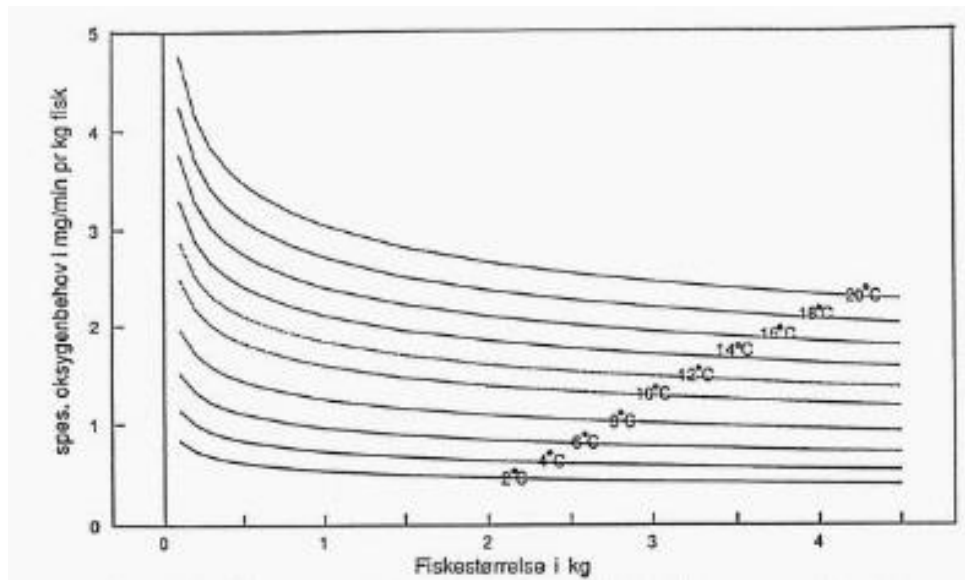
Den mest benyttede verdien fra eldre studier er Liaos likning som ble utviklet i 1971 (Berg et al., 1993). Denne forskningen ble gjennomført ved 300 oppdrettsanlegg på ulike arter stillehavslaks og ørret (s.191(Ruth et al., 1992)). Han utviklet fra dette studiet en likning 3.7 som beregner oksygenbehovet med sammenheng mellom fiskevekt og vanntemperatur:

$$O_2 = K * T^n * W^m \quad (3.7)$$

K, n og m = Konstanter

T = Temperatur [°F]

W = Fiskens vekt [lb]



Figur 9: Grafisk fremstilling av Liaos likning for oksygenforbruk (s.192(Ruth et al., 1992)).

Figur 9 er en grafisk fremstilling av oksygenforbruket hos laks ved beregning med Liaos likning 3.7. Den var benyttet i mange år, men har i senere tid vist et for lavt nivå i forhold til reelt forbruk.

### Christiansens likning:

Nordmannen Jørgen Schou Christiansen kom i 1990 frem med likning 3.8 som estimat på laksens oksygenforbruk (Ruth et al., 1992):

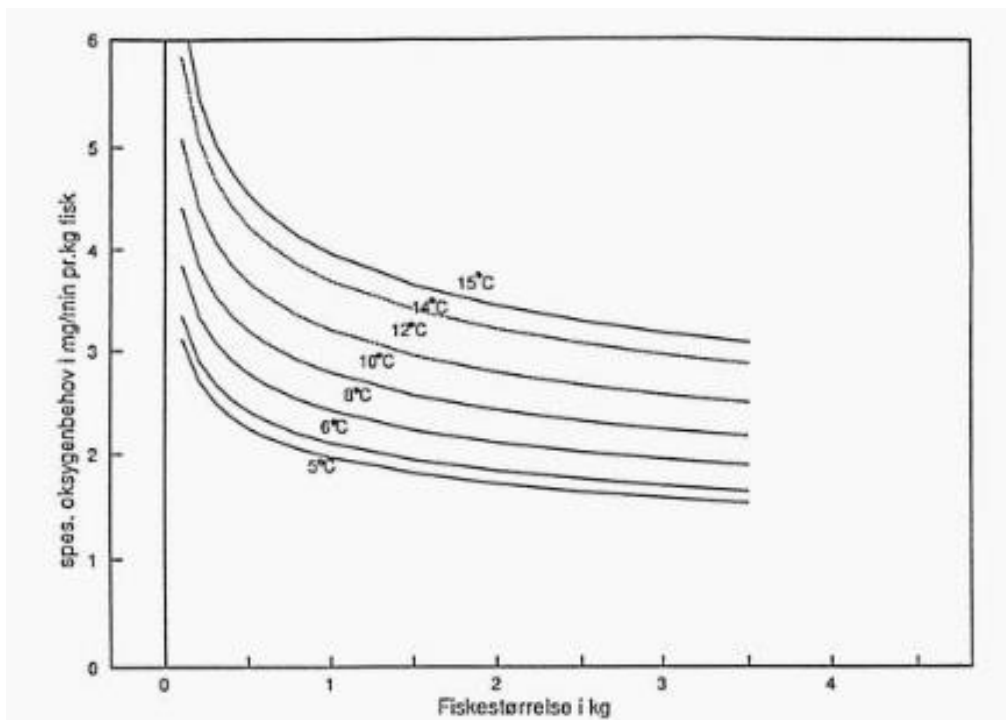
$$OF = 330 * V^{-0,2} * e^{0,07T} \quad (3.8)$$

OF = Fiskens oksygenforbruk [(mgO<sub>2</sub>) / (kg laks\*time)]

V = Fiskevekt [g]

T = Temperatur [°C]

Utgangspunktet for dette studiet var preget av Christiansens mening om at nødvendig oksygenbehov var underestimert (s.195(Ruth et al., 1992)). Figur 10 viser en grafisk fremstilling av oksygenbehovet for laks etter likning 3.8.

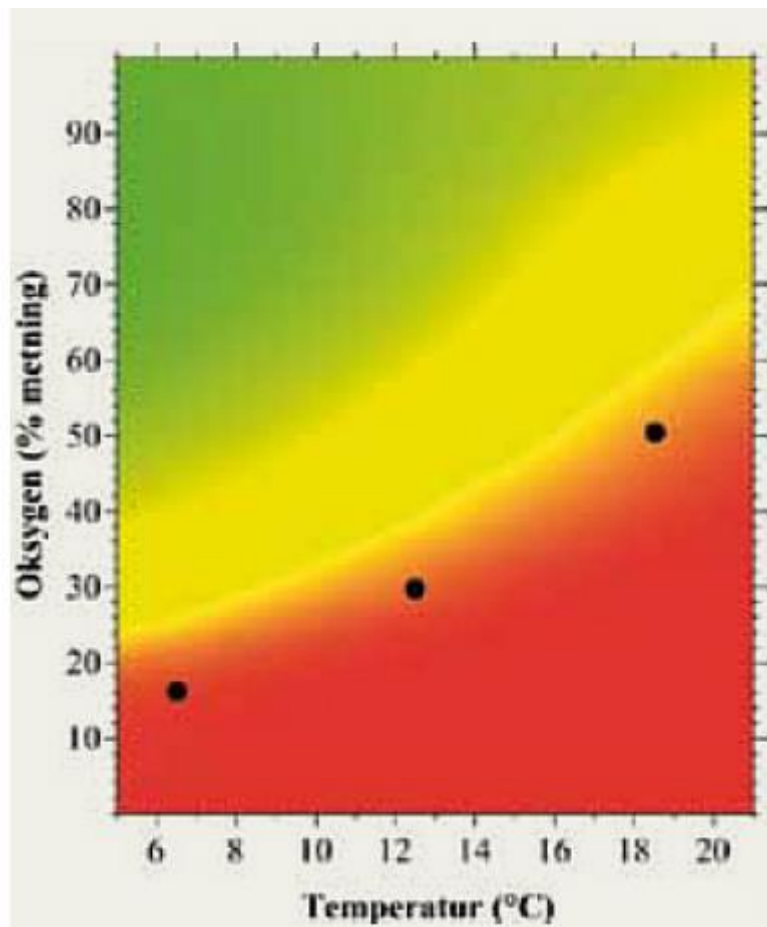


Figur 10: Grafisk fremstilling av Christiansens likning for oksygenforbruk (s.196(Ruth et al., 1992)).

Christiansen viser tilnærmet til en dobling av det tidligere beregnede oksygenbehovet fra Liaos og begge beregningene tar utgangspunkt i fôringsmetabolisme for laks. (Ruth et al., 1992) antar at oksygenbehovet etter Christiansens likning 3.8 vil gi noe overestimerte verdier. Videre gjennomførte B. Grisdale-Helland i 2001 (2002) et forskningsstudie på fôring av laks der oksygenforbruket ble beregnet. Resultatene i dette studiet samsvarer godt med Christiansens resultater.

### 3.2.4 Toleranseområde for oksygenmetning ved ulike temperaturer

Figur 11 er utviklet som et verktøy for å vise hvilke oksygenmetning i vannet som laksen krever ved forskjellige temperaturer.



Figur 11: Kritiske oksygenforhold ved temperaturstigning. Rødt område er skadelig oksygenmetningsgrad for laks, gult er svekkende og grønt er gode (Frank and Lien, 2015)

Ved høy temperatur er oksygenbehovet for laks høyt og løseligheten av oksygen i vannet lavt. Dette fører til at toleranseområdet for oksygenmetningen er lite. Ved lav temperatur er oksygenbehovet for laks lavt og løseligheten av oksygen høyt. Dette fører til et stort toleranseområdet for oksygenmetning. I Figur 11 angis rød farge som skadelige, gul svekkelse og grønn et godt oksygennivå for laksen. Ved 6 °C gir en metningsgrad på 45 % gode forhold for tilvekst. Ved 18 °C og 45 % metning vil oksygennivået være skadelig for laksen.

Generelt ønskes det 80 % metningsgrad i vannet. Mette Remen gjennomførte en studie om løst oksygen grensen «dissolved oxygen, DO» for redusert fôropptak(2016). Under forsøket fremkommer det en forandring i grenseverdien for oksygenmetningsgraden ved forskjellige temperaturer. Forsøket viste at oksygenverdier under 70 % kan gi reduksjoner i vekstraten.

Oksygenovermetning vil kunne forgifte laksen, derfor vil det optimalt ønskes å holde konstant 100 % DO (oksygenmetningsgrad).

### 3.2.5 CO<sub>2</sub>

Det er antatt at 85 % av fiskens produksjon av CO<sub>2</sub> utskilles over gjelene mens den resterende andelen fjernes ved pH regulering. Fiskens CO<sub>2</sub> produksjon er 1,27 g for hvert gram O<sub>2</sub> konsumert (Portz et al., 2006). Ved liten vannutskifting eller CO<sub>2</sub>-utlufting vil CO<sub>2</sub>-verdien i vannet stige. Høye verdier i vannet vil påvirke CO<sub>2</sub> konsentrasjonen i fiskens blod. Økt CO<sub>2</sub> konsentrasjon i blodet gir lavere pH-verdier. Surt blod reduserer evnen til oksygentransport.

### 3.2.6 Ammoniakk (NH<sub>3</sub>)

Ammoniakk tas raskt opp over gjellemembranen. I sjøvann er fiskens gjellemembran mer permeabel, derfor kan ammonium være giftig for fisk i sjøvann. Nivåer fra 0,08-0,45 mg/l er skadelige for laks. Det antas at nivåer for laks bør ligge mellom 0,001-0,005 mg/l (Olsen, 2013).

### 3.2.7 Salinitet

Laks er en anadrome fiskeart, de har muligheten til å reversere den aktive transporten av ioner over gjellene når de vandrer mellom saltvann og ferskvann (Bøhle, 2013). Laksen tilbringer yngelstadiet i ferskvann, her skilles vann ut og salt tas opp. Når laksen går i saltvann tas vann opp og salt skilles. På denne måten opprettholdes 1 % salt i fisken.

## 3.3 Lakselus

Lakselus er en parasitt som tilhører hoppekrepsfamilien. Den finnes naturlig i alle havområder på den nordlige halvkule. Lakselusa er vertsspesifikk og behøver laksen for å kunne fullføre livssyklusen. Lusa påfører fisken skade ved å spise slim, skinn og sugе blod, sårskadene gir inngangsport for infeksjonssykdommer. Lusen liker seg dårlig i vann med lavt salinitet derfor dør lusa når laksen går i elver for å gyte (Svåsand, 2009). Lus er en av de største utfordringene i næringen. I 2015 ble de anslått et tap på 8 milliarder NOK knyttet til lusebehandling (Nodland, 2016). Derfor foregår en intens forskning for å redusere luseproblemet i oppdrett. Bekjempelsesmetoder som benyttes er eksempelvis kjemisk, biologisk og fysisk. Som forebyggende tiltak kan det benyttes presenningskjørt eller leppefisk.

## 3.4 Alger

Alger er en fellesbetegnelse på encellede og flercellede organismer som benytter fotosyntesen og lever i fuktige miljøer. Alger står generelt for ca. 40% av verdens fotosyntese (Thronsen,

2015). De benytter energien fra sol og CO<sub>2</sub> for å produsere O<sub>2</sub>. Alger lever hovedsakelig i de øvre lagene i havet. En utfordringen i laksemerder kan være algeoppblomstringer.

Algeoppblomstringer kan gi endret farge i vannet og produksjon av giftstoffer som er skadelig for laksen. Alger har kort livssyklus og nedbrytningsprosessen krever oksygen. Stor algenedbrytning over en kort periode kan føre til oksygendropp opp til 40 % (Remen et al., 2013). Alger dør i løpet av natta som følge av mangel på sollys. Nedbrytningen starter om morgenen og fører til oksygendropp. Felles for algeoppblomstring er at det fungerer som en reaksjon på endring i økosystemet. Grunner til uregelmessighetene kan skyldes tilførsel av næringssalter eller arter av alger som ikke holdes nede av predatorer (Miljømerking, 2012).

## 4. Teori

### 4.1 Prosess

I denne oppgaven skal det foreslås design av et system (Figur 12) som muliggjør oksygenering av et større merdanlegg. Et slikt system kan være aktuelt ved bruk av luseskjørt, ved bruk av lukkede merder, ved algeoppblomstring eller dersom en ønsker å legge seg høyere i oksygen verdi. Anlegget skal dimensjoneres for å holde optimale oksygenverdier. Presenningskjørt reduserer strømningsfaktorer i merder, noe som påvirker vannkvaliteten.



Figur 12: Prosessen til oksygeneringssystemet

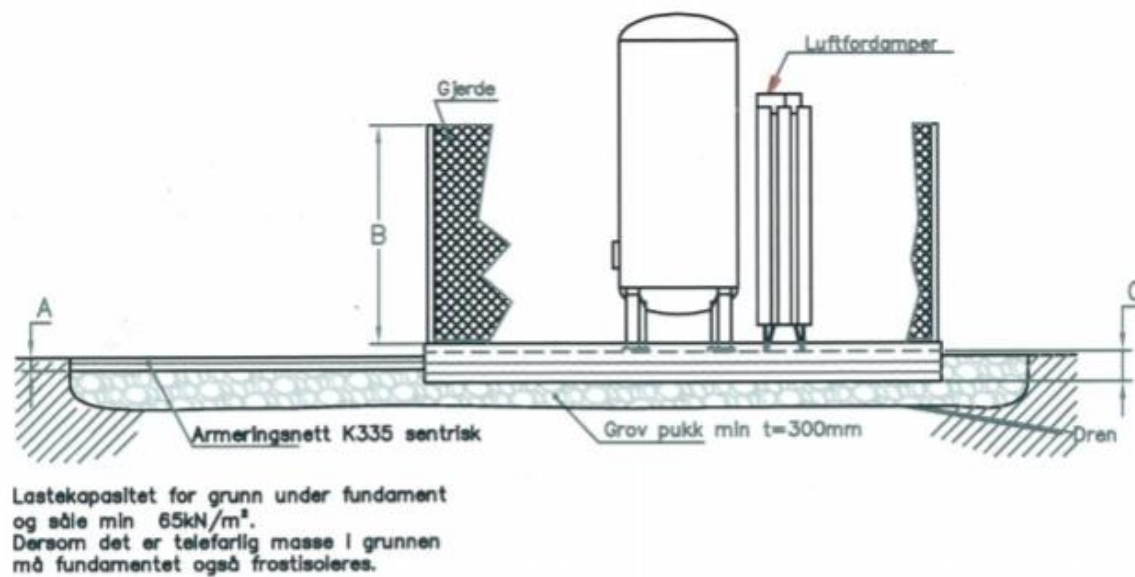
Oksygen lagres på en betongkaien som er dimensjoneres og tilrettelegges for lagring av LOX. Det benyttes en lekter for transport av offshoretanken med LOX fra kaien til oppdrettsanlegget. Ved oppdrettsanlegget overføres LOX til en stasjonert offshoretank. LOX sendes gjennom en fordamper for faseovergang fra væske til gass som benytter sjøvann som energikilde. Oksyngassen blir blandet i merder med en innløsningsmekanisme.

### 4.2 Landlagring

For lagring av LOX følges retningslinjene fra Doc 115/4 fra IGC (Industrial Gases Committee). Den tar for seg plassering, fundament, tilgang for transportkjøretøy, sikkerhet, vedlikehold og reguleringsverktøy. Anlegget må plasseres i friluft. Ved plassering av tankanlegget er det viktig å ta hensyn til områdene rundt, siden det skal plasseres slik at det ikke er fare for personell.

Oksygen er tyngre enn luft, noe som gjør at oksygen vil oppholde seg ved bakkenivå. Oksygen er lett antennelig og har ingen gjenkjennelses varsler. Det er derfor viktig at personell som oppholder seg i områder hvor beriket oksygennivåer kan forekomme, er kjent med sikkerhetsinstrukser. Kun maskineri som er godkjent for bruk ved oksygenrike områder kan benyttes. Lekkasje kan føre til eksplosjon og skader på materialer som ikke tåler anrikt luft. Installasjonen må være jordet for beskyttelse mot lyn, og det må tas hensyn til

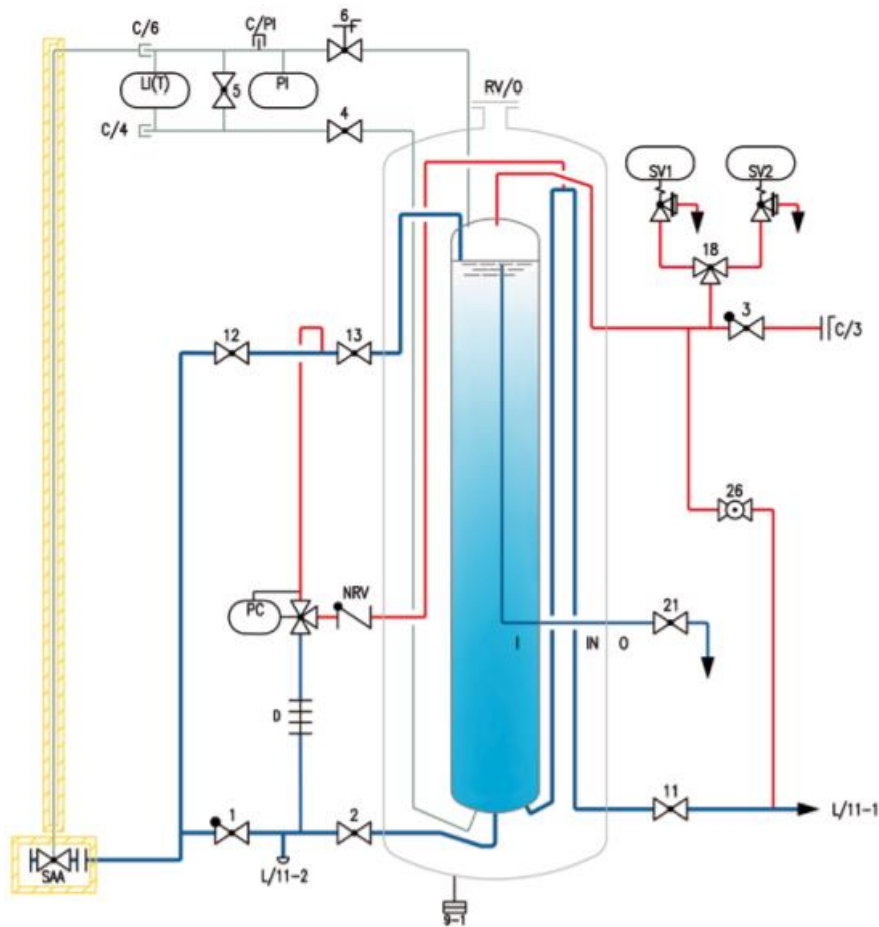
høyspentledninger/kraftkabler som kan påvirke anlegget. Ved påfylling eller bytting av gasstanker er det viktig med enkel adkomst for båt, slik at påfylling av LOX kan gjennomføres enkelt. Ved nødsituasjoner må båten raskt kunne kjøres bort fra anlegget. Anlegget må derfor dimensjoneres slik at båten har god plass til å manøvrere. Samtidig er det krav at avstanden mellom båt og tank ikke overstiger 6 m. Dette er en begrensende faktor grunnet fylleslangen. For mer informasjon anbefales heftet til Praxair (2016).



Figur 13: Skisse av landlagring anlegg (Praxiar, 2016)



For lagring av LOX benyttes standardiserte tanker (Cryogenic standard tanks LITS 2) (Figur 14).



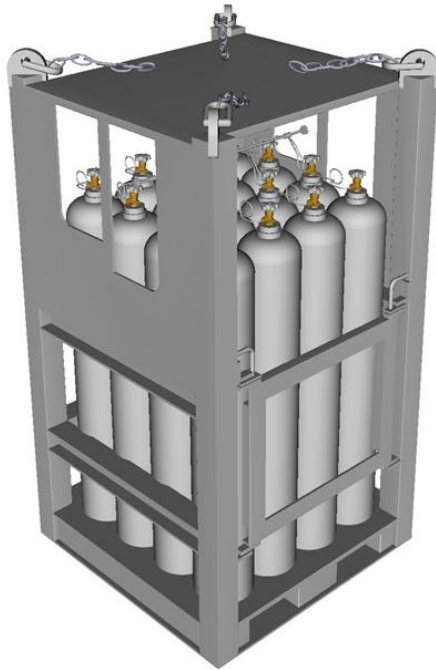
Figur 14: Plantegning av «Cryogenic standard tanks LITS 2» fra Linde (2012)

Tanken har to skall som er skilt med et vakuum (Linde, 2012). Dette forhindrer energioverføring. Noe varmeoverføring vil i realiteten alltid oppstå, dermed har tanken et krav om et minimum daglig forbruk. Ved forbruk under dette vil noe gass slippes ut til omgivelsene gjennom en overtrykksventil.

En regulator er plassert på utsiden av tanken for å opprettholde konstant trykk i tanken. Ved forbruk/reduksjon av LOX vil trykket i tanken reduseres. Det ønskes et konstant trykk, slik at de fysiske egenskapene til væsken ikke endres. Regulatoren regulerer trykket ved tilsetning av oksyngass i toppen på beholderen. Gassen har mindre tetthet enn væsken og legger seg i det øverste sjiktet.

### 4.3 Offshore tanker

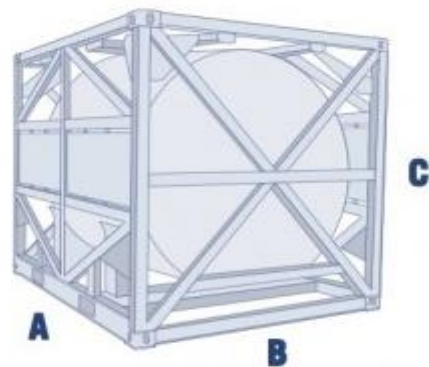
Oksygen kan fraktes til merdanlegget som gass eller væske. For lagring av oksygen i gassform benyttes oksygenpakker. Oksygenpakker som inneholder 12 eller 16 flasker i rack (Figur 15). Flaskene har ett trykk på 200 til 300 bar. Det er vanlig å benytte 300 bar (Praxair, 2016b). Dette gir plassbesparing, reduserte fraktkostnader og mindre håndtering. Ved å benytte oksygen i gassform vil det ikke være behov for noen fordamper.



- 12-16 flakser
- 50 liter per flakse
- 300 bar trykk
- Gassform

Figur 15: Oksygenpakker (Krebs, 2010)

For lagring av LOX benyttes en spesiell offshore cryotank (Figur 16) som er bygd opp etter samme prinsipp som landtanken. Offshoretanker kan ha en størrelse på 2 til 50m<sup>3</sup>, i oppgaven benyttes Praxairs tank som er 10 fot. Tanken er plassert inni et rammeverk som beskytter mot ytre påvirkninger. Tanken har et makstrykk på 18 bar.

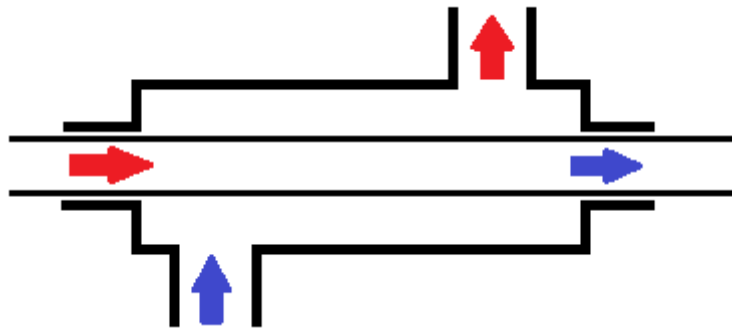


Figur 16: 10ft kryogen offshore tank (Ferguson)

## 4.4 Prinsipper for energioverføring

### 4.4.1 Varmerveksler

«En varmerveksler er en innretning som overfører varme fra et medium til et annet»(Lekang, 2013b). De to mediene er adskilt av materialer som gir rask energioverføring og hindrer blanding. Det finnes forskjellige utforminger av varmervekslere, de mest benyttede er rør- og plate- varmervekslere. Her kan strømmingen både gå mot- og medstrøms. Figur 17 viser en tegning av en medstrøms varmerveksler.



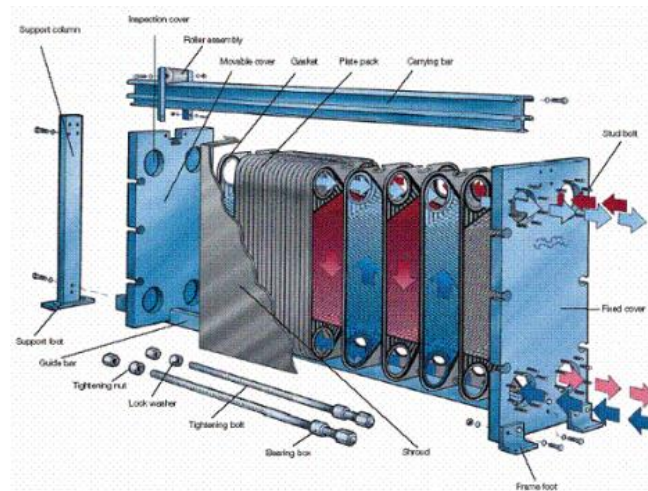
Figur 17: Medstrøms varmerveksler (Troøyen)

Fordeler med varmerveksler er:

- Lite tap til omgivelser
- Robust, lett å oppdage slitasje, korrosjon og andre skader

### 4.4.2 Platevarmerveksler

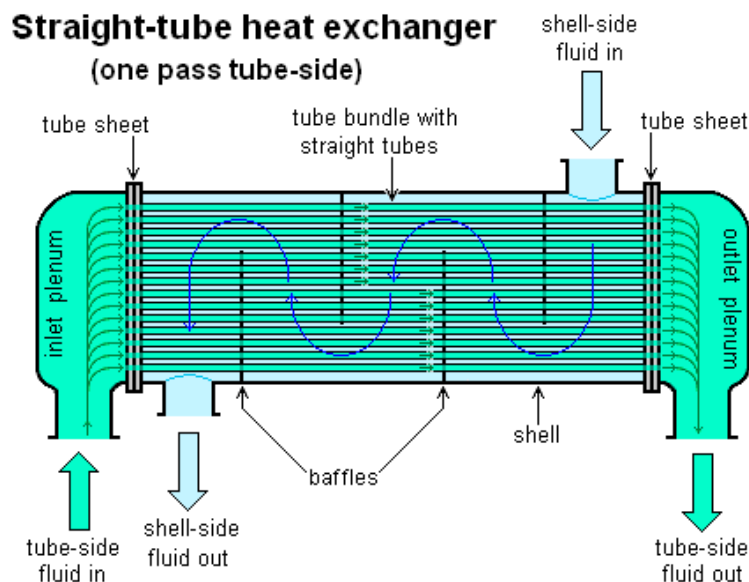
En platevarmerveksler er sammensatt av tettpakkede plater med riller i overflaten. Som vist på Figur 18, vil det strømme kaldt og varmt medium mellom platene. Energien i væsken blir overført fra varm til kald side, uten at mediene er i kontakt. Varmeroverføringskoeffisienten er høy for platevarmervekslere, dette gir varmerveksleren høy effektivitet.



Figur 18: Plate varmeveksler (Laval)

Platevarmeveksler er kompakte og enkle å utvide. Plater kan legges til og tas ut ved behov. I forhold til oppgaven som skal løses med overføring av varme for å fordampe flytende oksygen kan dette være en fordel. Laks vokser og endringer av biomasse vil føre til endringer i oksygenbehovet. Utfordring med platevarmeveksler kan være sensitiviteten for trykk og begroing.

#### 4.4.3 Rørvarmeveksler



Figur 19: Rørvarmeveksler (ndla)

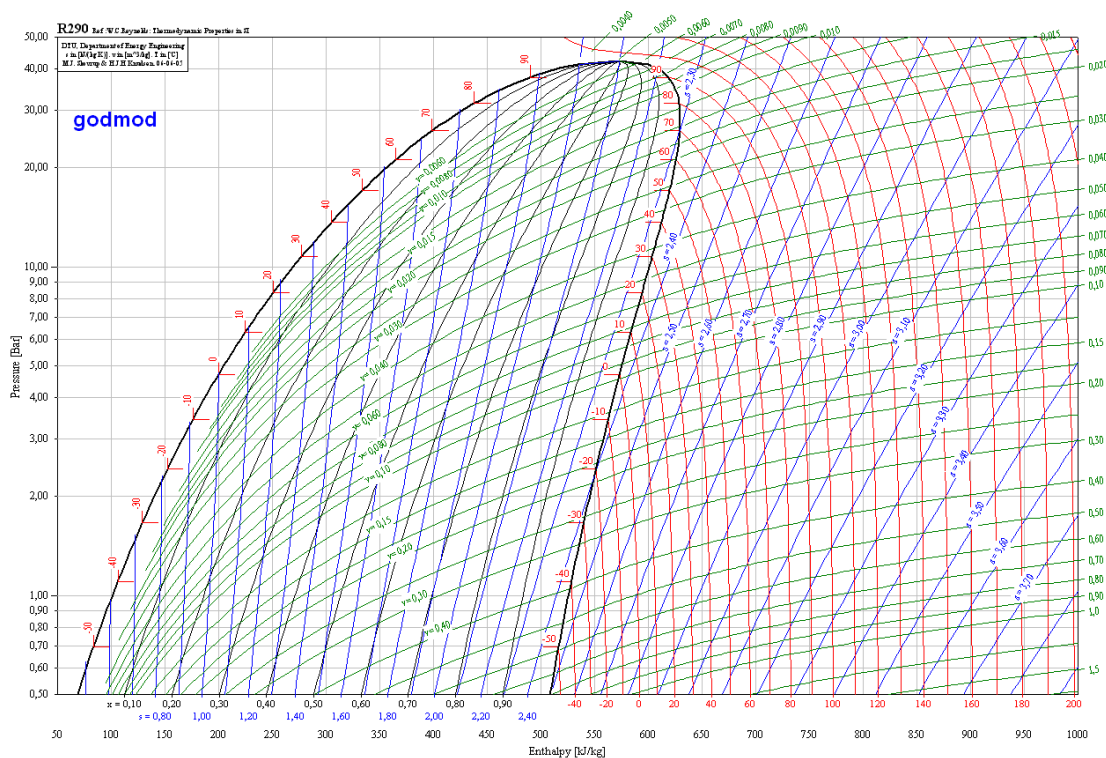
Rørvarmeveksler har ett stort skall som omslutter mange mindre rør (Figur 19). Mediet som tilføres inn i skallet (væsken som omslutter de små rørene), er det varme mediet. Den sirkulerer gjennom skallet. Det er plassert skillevegger (baffles) i skallet for å skape turbulens

og bedre varmeoverføringen. I de små rørene som går gjennom varmeveksleren strømmer kald væske. Det kalde mediet beveger seg gjennom røret til den andre siden av skallet.

#### 4.4.4 Design av fordampere

Varmevekslere brukes også i fordampere og kondensatorer. I en fordamper vil et av mediene fordampe, endre fase, mens i en kondensator vil et av mediene kondensere. Slike brukes i varmpumper/kjølemaskiner og mediet som fordamper kondenseres omtales som kuldemediet eller arbeidsmediet. Det som vanligvis skjer i en fordamper er at kuldemediet strømmer inn med lavt trykk og temperatur og mediet på andre siden av varmeveksleren kommer inn med høyere temperatur. På denne måten overføres energi til kuldemediet som vil fordampe. I denne oppgaven vil kuldemediet være LOX. LOX er en kryogen væske med kokepunkt på  $-183\text{ °C}$  ved atm. trykk. Dette gir en utfordring med lave temperaturer noe som kan medfører at mediet på den andre siden i fordamperen kan fryse.

For å forstå fordampning er det viktig å kunne lese av et trykk-entalpi-diagram (PH-diagram) (Figur 20). Diagrammet er en logaritmisk fremstilling av spesifikk entalpi (indre energi) til mediet i forhold til trykket. Fra diagrammet kan det leses hvor mye energi som er tatt opp fra omgivelsene, hvor mye som blir avgitt og hvor mye som må tilføres.



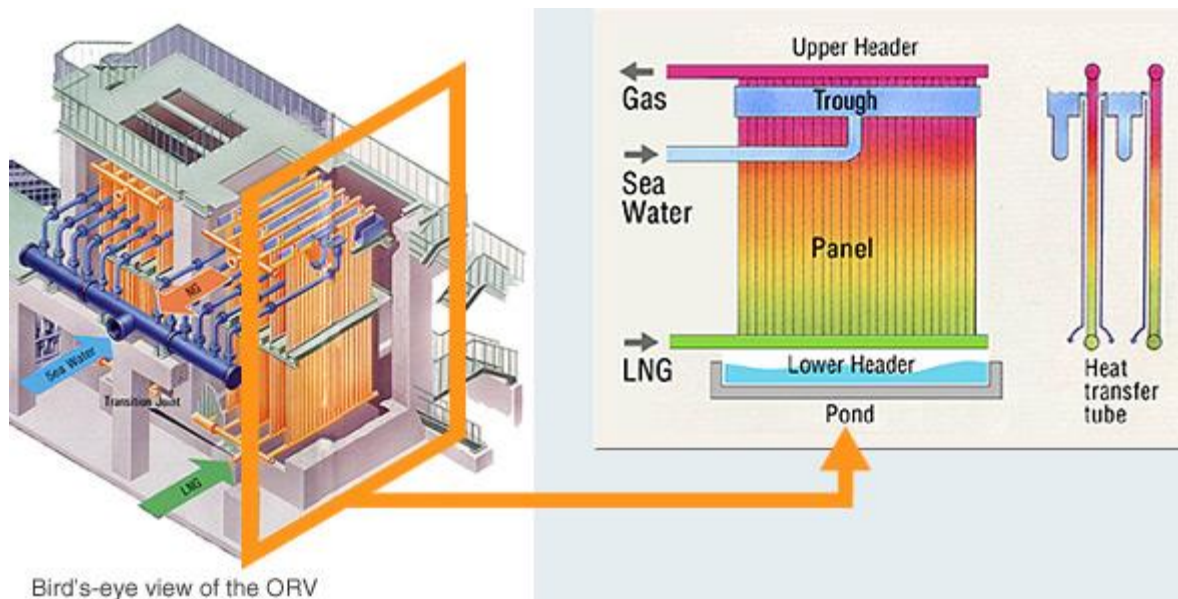
Figur 20: Trykk-entalpi-diagram for propan (Reynolds)

Til venstre side av den sort merkede parabelen er mediet i væskefase. I område for parabelen er mediet i to-fase. På høyre side er mediet i gassform. De røde linjene representerer temperaturen. Temperaturen vil holdes konstant ved faseovergang. All energi går med til å fordampe mediet eller avgis ved kondensasjon.

Det er flere metoder for å øke kapasiteten og forhindre frysing i en fordamper. Siden systemet er lokalisert på sjøen, der det er mulig å benytte sjøvann med varmekapasitet  $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  istedenfor luft med en varmekapasitet på  $1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . I sjøen vil vann holde forskjellige temperatur avhengig av dybde, årstid og lokalisasjon. Det dypeste laget i vannmassen vil holde konstant  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dette skyldes tyngden på vann. Forskjellig utforming av fordamperen kan forhindre at systemet fryser under omdanning fra LOX til gass, omtalt som regassifisering. En bransje som har mye erfaring med storskala bruk av regassifisering fra væske til gass er naturgassindustrien. Naturgass som tas opp fra grunnen gjøres om til væske (LNG) for enklere frakt. Når naturgassen senere skal benyttes må væsken faseforandres til gass. LNG har mye av de samme egenskapene som LOX. Flere typer fordampere benyttes for omgjøring fra LNG til gass. Den vanligste typen er «Open rack vaporizer» (ORV) og denne finnes i 70% av alle installasjoner (Patel et al., 2013). Oppvarming av mediet rundt vil også hindre at det fryser. Et slikt system omtale på engelsk «submerged combustion vaporizer» (SCV). Dette systemet utnyttes i størrelsesorden i 25% av LNGs gassifiseringsanlegg. De resterende 5% benytter en mellomprodukt væske fordamper omtalt som «Intermediate fluid vaporizer» (IFV) eller luftfordampere. Sistnevnte brukes ofte på mindre anlegg (Patel et al., 2013).

#### 4.4.5 Open rack vaporizer (ORV):

En ORV fungerer som en fordamper med sjøvann som energikilde. Fordamperen fungerer med et liknende prinsipp som en rør-varmveksler og rørene er laget av aluminium (Al), som har høy varmeledningsevne og beholder disse ved lave temperaturer. Rør som inneholder den kryogene væsken (LNG) er ordnet i vertikal retning, ved at væsken sendes inn i små rør på undersiden og ut på toppen som gass. Sjøvannet sendes i motsatt retning som i en motstrøms varmeveksler (Figur 21). Utsiden av røret som inneholder den kryogene væsken vil være belagt med sinklegering. Legeringen forhindrer begroing av rørene. Fordampet LNG sendes videre i prosessen.

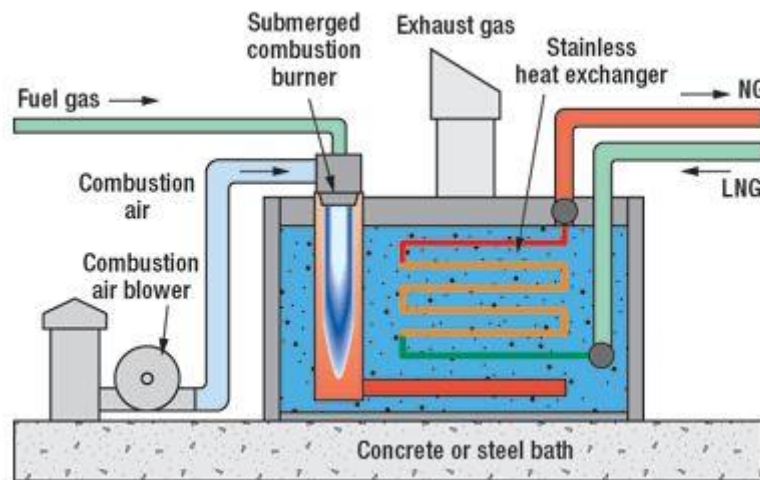


Figur 21: Open rack vaporizer (ORV) (R. Agarwal)

Anlegget lar det kalde og varme mediet passere hverandre med rørveggen som skille. Når det jobbes med ekstremt lave temperaturer vil nedfrysning oppstå. Det anbefales en vanntemperatur over 5°C. Dette for å unngå umiddelbar nedfrysning. Ved lavere temperaturer benyttes en drivstoff gass forbrenner «fuel gas heating» (FG) (Patel et al., 2013). Dette er kostbart og ikke ønskelig. Anlegget dimensjoneres med stor kapasitet slik at kontinuerlig drift kan opprettholdes, selv om deler av anlegget fryser. Dette vil påvirke størrelsen til fordamperen. Vannet som benyttes til ORV kontrolleres for innhold av metall ioner og sand, dette er faktorer som vil skade rørene.

#### 4.4.6 «Submerged combustion vaporizer» (SCV):

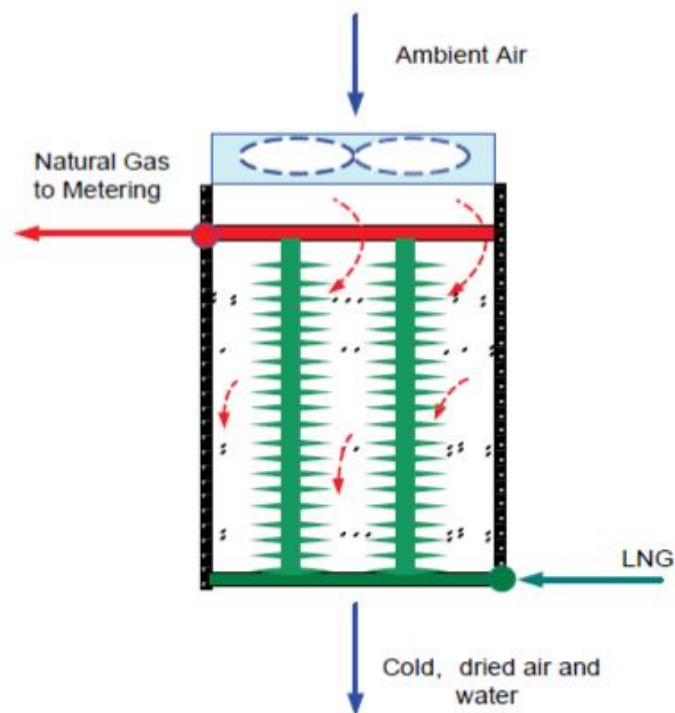
I en undervanns forbrennings fordamper (SCV) (Figur 22) strømmes det flytende kryo-gen mediet i rør under vann. Vannet varmes opp, dette gjør at det kryo-gene mediet fordamper og oppvarming av vannet forhindrer frysing. SCV egnes for regassifisering av LNG her kan LNGs avgasser benyttes i forbrenningsprosessen til oppvarming av vannet. LOX avgir ikke avgasser som kan benyttes til oppvarming, dermed må en alternativ varmekilde benyttes. Dette vil bli en kostbar metode for fordampning av LOX. Rensing av vannet er også krevende og egner seg dårlig for anlegget.



Figur 22: SCV (Ukjent)



#### 4.4.7 Luft fordamper «ambient air vaporizer» (AAV):



Figur 23: Omgivelse luft fordamper (Patel et al., 2013)

Figur 23 viser en luft fordamper. Luft sendes gjennom kammeret og avgir energi til mediet. Her forgår en energiovergang mellom ønsket fordampet medium og luft som strømmer som naturlig konveksjon på utsiden. Det vil forkomme en vannkondensasjon fra luft på rørene grunnet luftfuktighet, vannet vil fryse og det vil være krav til avriming hver 4-8 time (Lekang, 2013a). Ofte benyttes flere fordampere i parallell kobling for å oppnå kontinuerlig drift. Dette gjør at systemene blir store og vanskelige å håndtere på en flåte. Effekten til en AAV påvirkes i stor grad av flere miljøfaktorer som luftstrømninger og temperatur. Dette gjør utregninger og dimensjonering vanskelig.

#### 4.4.8 Mellomprodukt væske fordamper «Intermediate fluid vaporizer» (IFV):

En IFV (Figur 24) benytter et mellom medium (IF) for energioverføring, tre typer IF benyttes:

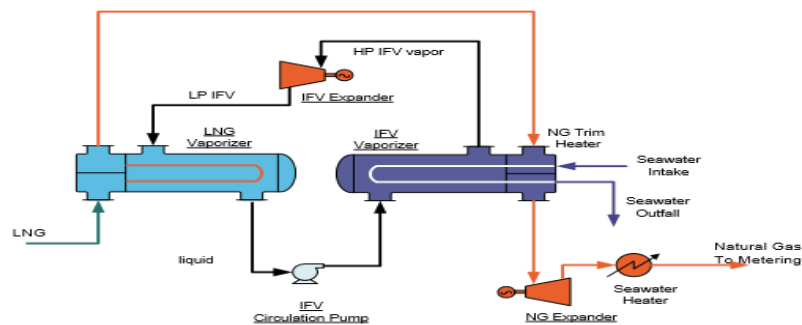
- Glykol
- Varmt vann
- Hydrokarbon (propan, butan eller et blandet kjølemiddel)

En mellomvæske fordamper består av to fordampningsenheter som begge benytter samme IF. Den kryogene væsken pumpes in i rør gjennom en rørvarmeveksler som er fylt med IF medium i gassfase. IF vil kondensere og avgir energi til den kryogene væsken som fordamper og føres videre som gass. IF kondensatet strømmer videre inn i en ny fordamper hvor en varmekilde (sjøvann/spillvarme) avgir energi og fordamper IF mediet. Dette går i en kontinuerlig sirkel og kan hindrer frysing.

Fordelen med glykol-vann er at fordampnings/konduksjons temperaturen til væsken kan reguleres ved hjelp av trykkforandring. Dette for å unngå nedising.

Varmt vann alternativet benyttes ofte ved systemer hvor deler av anlegget har en ubenyttet varmekilde som er høyere en omgivelsestemperaturen.

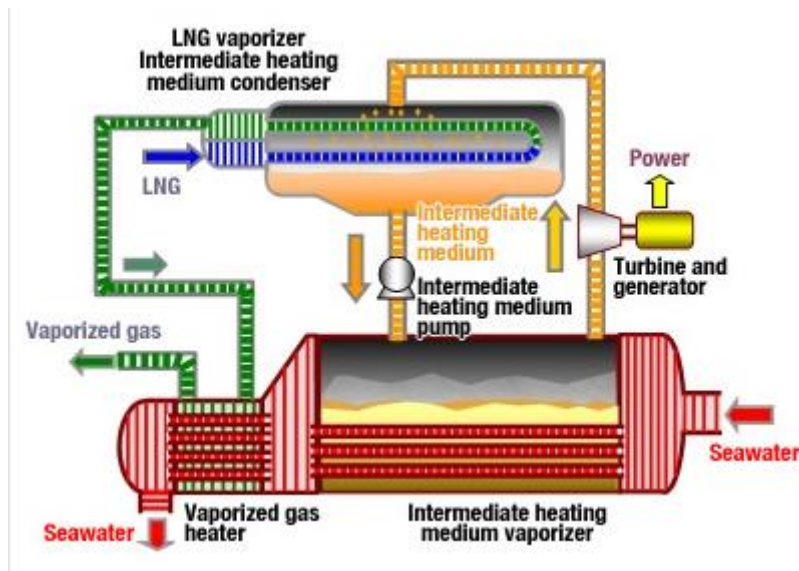
Hydrokarboner kan benytte vann med temperatur ned til 1°C som varmekilde uten at systemet fryser (Patel et al., 2013).



Figur 24: IFV fordamper (Patel et al., 2013)

## 4.5 Prinsipp for beregning av dimensjonering

Det er valgt å benytte et IFV og det benyttes tre varmevekslere i anlegget totalt. En varmeveksler brukes til fordampning av LOX ved kondensering av propan. De andre varmevekslerene benyttes henholdsvis til oppvarming av oksygen ved kondensering av propan, og fordampning av propan ved bruk av sjøvann (Figur 25).



Figur 25: IFV, på figuren vil LNG ha funksjon som LOX (Osaka, ukjent)  
LOX sendes inn i «LOX fordamperen», her fordampes og varmes oksygenet opp.  
Det sendes videre til en varmeveksler som i dette tilfelle benytte sjøvann for oppvarming, i oppgaven benyttes propan.  
Propan kondensatet fra fordampning og oppvarming av oksygen sendes til en fordampner som benytter sjøvann som varmekilde.

Formlene i kapittel 4.5.1 til 4.5.9 er hentet fra kompendium i faget FYS 251 (Lekang, 2013a).

### 4.5.1 Energibehov:

For faseforandring vil det være krav til energi ved fordampning og avgis energi ved kondensasjon. Energien kan beregnes i formel (4.3):

$$Q = \dot{m} * \text{faseovergang energi} \quad (4.3)$$

$Q$  = Varmeoverføringens raten [W]

$\dot{m}$  = massestrøm [kg/s]

faseovergang energi (entalpi) [kJ/kg]

Dette er energien som kreves og kan hentes ut fra faseovergangen til mediene. For sjøvann ønskes ingen faseforandring. Dette gjør at energi avgis ved temperaturforandring og formel (4.4) kan benyttes:

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (4.4)$$

$C_p$  = Spesifikk varmekapasiteten [kJ/(kg\*K)]

$\Delta T$  = Temperatur differansen [ $^{\circ}\text{C}$ ]

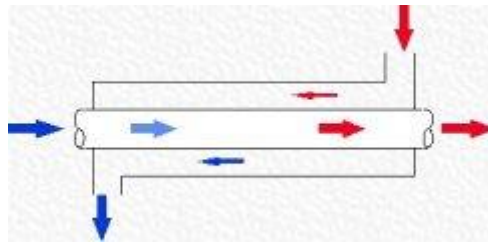
#### 4.5.2 Dimensjonering av varmeveksler:

I varmevekslerene vil de to mediene strømme på hver sin side av en rør vegg. Energien til det varme og kalde mediet vil bestemmes i formlene 4.5 og 4.6.

$$Q_v = \dot{m}_v C_{p,v} (T_{v,i} - T_{v,u}) \quad (4.5)$$

$$Q_k = \dot{m}_k C_{p,k} (T_{k,u} - T_{k,i}) \quad (4.6)$$

«V» og «k», og «i» og «u» fra formlene 4.5 og 4.6 symboliserer varm og kald, og inn og ut. Det ses bort fra tap til omgivelsene. Dette begrunnes ved at varmevekslere ofte er godt isolerte og tapet til omgivelsene er små.



Figur 26: Motstrøms varmeveksler (Sørensen)

Ved null tap til omgivelsene kan formel 4.7 antas:

$$Q = Q_v = Q_k \quad (4.7)$$

Det ses bort fra forandring i varmekapasitet ( $C_p$ ). Denne vil påvirkes av temperaturen, men det vil være små forandringer. Energien som varmeveksler kan levere mellom mediene er definert i formelen (4.8):

$$Q = U * A * \Delta T_{LM} \quad (4.8)$$

$Q$  = Varmeoverføringens raten [W]

$U$  = Energioverførings koeffisienten [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]

$A$  = Varmeoverføringsarealet [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta T_{LM}$  = Logaritmisk temperatur differansen [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta T_{LM}$  eller LMTD «logarithmic mean temperatur difference» logaritmisk midlere temperaturforskjell angir temperaturdifferansen som driver varmeoverføringen. Denne kan beregnes i formel (4.9):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{v,i} - T_{k,u}) - (T_{v,u} - T_{k,i})}{\ln\left(\frac{(T_{v,i} - T_{k,u})}{(T_{v,u} - T_{k,i})}\right)} \quad (4.9)$$

For systemer hvor faseovergang oppstår og temperaturene ved inngang og utgang ikke forandres vil  $\Delta T_{LM}$  være temperatur differansen mellom mediene.

#### 4.5.3 Total energioverføringskoeffisient

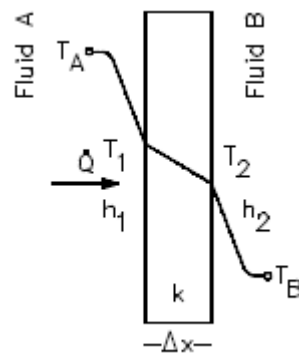
Energioverføringskoeffisient beskriver ledningsevnen mellom mediene. Parameteren påvirkes av egenskaper til mediene, temperaturer, strømningshastighet og geometrien til varmeveksleren. Geometrien omfatter utformingen til varmeveksleren som antall sløyfer og ledeplater (baffles). Formel 4.10 benyttes for beregning av den total varmeoverføringskoeffisienten:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (4.10)$$

$h$  = Varmeoverføringskoeffisienten [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$k$ -verdi = Varmeledningskoeffisienten for et materialet eller medium [ $W/(m \cdot K)$ ]

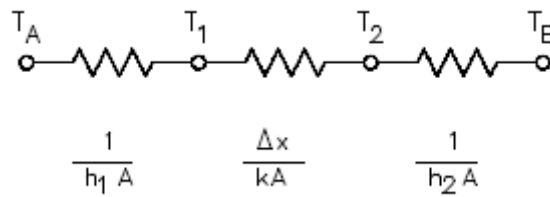
$\Delta x$  = Tykkelsen på røret i varmeveksleren [m]



Figur 27: Varmeledning hastighet (Odesie)

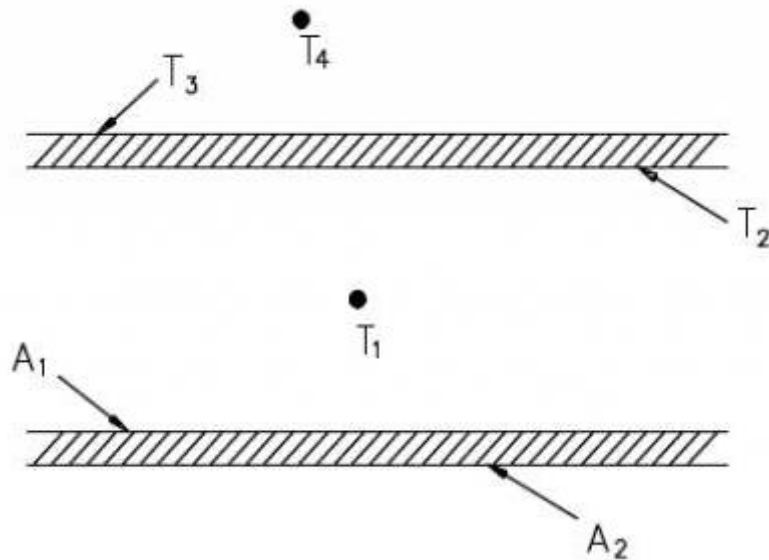
Figur 27 viser temperaturdifferansen mellom de to fluidene i en varmeveksler.

Konveksjonsmotstanden på hver side av platen er vesentlig større enn gjennom platen i de forskjellige fasene. Derfor ser man ofte bort fra ledningen gjennom materialet. Denne er ubetydelig i forhold til ledningen gjennom mediene.



Figur 28: Hvordan formel for varmeledning er satt sammen (Odesie)

Figur 28 forklarer sammensetningen av formel 4.10. Den viser energioverføringskoeffisienten for de forskjellige fasene i prosessen.  $T_A - T_1$  og  $T_2 - T_B$  er motstanden gjennom væskefasen og  $T_1 - T_2$  gjennom veggen.



Figur 29: Varmeledning i forskjellige faser (Odesie)

Energioverføringen mellom  $T_1 / T_2$  og  $T_3 / T_4$  (Figur 29) gjøres ved konveksjon. Konveksjon oppstår ved at et medium blir varmere eller kaldere. Dette endrer tettheten til mediet. Det laget som forandrer tetthet vil forflytte seg og avgir eller tar opp energi. Overføringen mellom  $T_2 / T_3$  (Figur 29) gjøres ved konduksjon. Konduksjon er ledning av varme fra kald til varm side.

#### 4.5.4 Konduksjon

Konduksjon er varmeledning gjennom materialet. Dette oppstår når medier med forskjellig temperatur er fordelt på to sider av en vegg. Energi vil overføres fra varm til kald side. Materialkvaliteten til veggen bestemmer varmeledningen. Fouriers lov formel 4.11, kan benyttes for beregning av varmeledning gjennom veggen:

$$q = -k * A \frac{dT}{dx} \quad (4.11)$$

Q = Varmeraten [W]

A = Arealet av veggen hvor varmestørmmen går [m<sup>2</sup>]

$\frac{dT}{dx}$  = Temperatur gradienten [°C/m]

Ved konstant varmeledningskoeffisient brukes ofte termisk spredningsevne(4.12):

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p} \quad (4.12)$$

$\rho$  = Massetetthet [kg/m<sup>3</sup>]

C<sub>p</sub> = spesifikk varmekapasitet [kj/(kg\*K)]

#### 4.5.5 Tvungen konveksjon

Varmeoverføring fra et medium til omkringliggende blir kalt varmeoverføring ved konveksjon. I anlegget vil mediene settes i tvungen bevegelse, dette kalles tvungen konveksjon. Varmebalansen kan beregnes ved bruk av Newtons lov om kjøling (4.13):

$$Q = hA(T_u - T_i) \quad (4.13)$$

A = Overflatearealet [m<sup>2</sup>]

T<sub>u</sub> = Temperaturen på yttersiden av veggen [°C]

T<sub>i</sub> = Temperaturen i mediet på innsiden [°C]

#### 4.5.6 Varmeoverføringskoeffisienten

H-verdien er overgangstallet/konveksjonstallet. Tallet beskriver varmeoverføringen til mediet ved den aktuelle situasjonen (Lekang, 2013a). H-verdien (formel 4.14) vil påvirkes av ytre faktorer som hastigheten, tetthet, ledningsevne, dynamisk viskositet, spesifikk varmekapasitet i mediet og utforming. For å beregne h-verdien benyttes formel 4.14:

$$h = \frac{Nu * k}{D} \quad (4.14)$$

Nu = Nusselts tall

K-verdi = Varmegjennomgangskoeffisienten for materialet eller mediet [W/(m\*K)]

D = Diameter avhengig av kontaktområde [m]

Det må benyttes dimensjonsløse forholdstall for beregning av varmeoverføringskoeffisienten (h). De mest sentrale er Reynolds tall, Prandtls tall og Nusselts tall.

#### 4.5.7 Nusselts tall (Nu)

Nusselts tall (Nu) er et dimensjonsløst tall som beskriver forholdet mellom konveksjon og varmeledning. Nusselts tall kan forstås som stigningstallet for linja for det termisk grensesjiktet.

$$Nu = \frac{\text{konveksjon} + \text{konduksjon}}{\text{konduksjon}} \quad (4.15)$$

Den laveste verdien for Nusselts tall er  $Nu = 1$ . Ved  $Nu$  lik 1 er det kun varmeledning, dette er teoretisk umulig pga. tyngdekraften. Ved laminær strømming vil  $Nu \approx 1$ . I praksis vil de fleste strømminger være turbulente. Nusselts tall ligger i område 100-1000. Formelen for Nusselts tall varierer med strømningsmønsteret og det termiske grensesjiktet. Det er i beregningene for oppgaven valgt å benytte den empiriske formelen:

$$Nu = 0,0296Re^{0,8} * Pr^n \quad (4.16)$$

For alle beregningene er det valgt turbulent strømming, Nusselts tall beregnes fra Reynolds (Re) og Prandtl (Pr) tall.

#### 4.5.8 Prandtl's tall (Pr)

«Prandtl's tall er et dimensjonsløst forholdstall som sier noe om hvordan det termiske grensesjiktet er i forhold til hastighetsgrensesjiktet» (Lekang, 2013a).

$$Pr = \frac{\text{hvor raskt forplanter hastigheten seg}}{\text{hvor raskt forplanter varmen seg}} \quad (4.17)$$

$$Pr = \frac{\mu * C_p}{k} \quad (4.18)$$

$\mu$  = Viskositeten [kg/(m\*s)] = [10<sup>3</sup>cP]

Prandtl's tall er satt sammen av flere materialkonstanter. Tallet vil variere ved temperaturforandringer. Pr kan slås opp i tabeller.

#### 4.5.9 Reynolds tall (Re)

Reynolds tall kan omtales som et strømmingstall. Det er et ubenevnt forholdstall som beskriver strømningsbilde. Reynolds tall benyttes for å bestemme om en strømming er laminær eller turbulent. Ved laminær strømming går mediet i en retning, når strømmingen blir turbulent vil den bevege seg i to retninger. Turbulent strømming oppstår når  $Re > 2300$ . I en varmeveksler ønskes det turbulente strømminger for å optimalisere varmeovergangskoeffisienten.



$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (4.19)$$

$\rho$  = Tettheten til væsken [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = Hastigheten [m/s]

$d$  = Karakteristiske lengden [m]

## 4.6 Innløsnings metoder

Det finnes flere metoder for innløsning av oksygen i vann, det skiller mellom tilsetning ved lavt og høyt trykk. Innløsning ved hjelp av pakket kollonne og diffusor betegnes som lavt trykk innløser, mens oksygen kjegle og oksygen brønn er metoder for høyt trykk. Valget av innløsningsmetode gjøres etter utforming og oksygenoverføringseffektiviteten fra fri oksygen til oksygen i vannet.

### 4.6.1 Effektivitet

Effektivitetskoeffisienten til en innløser bestemmes etter forandringen av oksygenkonsentrasjonen av vannet før og etter innløsning. Effektiviteten kan beregnes fra formel(4.20):

$$\text{absorpsjons effektiviteten} = \frac{(C_{in} - C_{ut})\dot{m}_w}{\dot{m}_{O_2}} \quad (4.20)$$

$C_{in}$  = Konsentrasjon av O<sub>2</sub> i vann inn [mg/l]

$C_{ut}$  = Konsentrasjon av O<sub>2</sub> i vann ut [mg/l]

$\dot{m}_w$  = Vann strømning [kg/s]

$\dot{m}_{O_2}$  = Massestrømning av O<sub>2</sub> [kg/s]

Formel (4.20) vil være et mål for innløsning i lukkede merder. Ved innløsning i delvis åpne eller åpne merder vil ytre faktorer som dybde, strømning og oksygenmetningsgraden i vannet påvirke effektiviteten. Effektiviteten vil derfor avhenge av metode og utformingen på systemet, dette vil være viktig for å dimensjonere kapasiteten til anlegget.

#### 4.6.2 Prinsipp ved innløsning

Ved et gitt trykk, temperatur og salinitet er det en gitt metningsgrad av oksygen i vannet. Ved økt trykk vil metningsgraden til vannet øke og mer oksygen kan løses. For å finne likevekt konsentrasjonen kan Henry's og Dalton's lov benyttes.

Henry's lov er gitt i likning 4.21:

$$P_g = HX_g \quad (4.21)$$

$P_g$  = Partialstrykket til gass [atm]

$H$  = Henrys konstant [atm/mol]

$X_g$  = konsentrasjonen av gass i vann [mol gass/(mol gass + mol vann)]

Henry's lov uttrykker metningsgraden ved ett gitt partialtrykk.

Dalton's lov (likning 4.22) beskriver at summen av partialtrykket av gassene i en blanding er lik totaltrykket.

$$p_i = p_t y \quad (4.22)$$

$p_i$  = Partialstrykket av en gass [atm]

$p_t$  = Summen av trykket i en gassblanding [atm]

$y$  = Andel av gass i [mol gass i / mol totalt gass i blandingen]

Henry og Dalton's lov kan sammenstilles i likning 4.23:

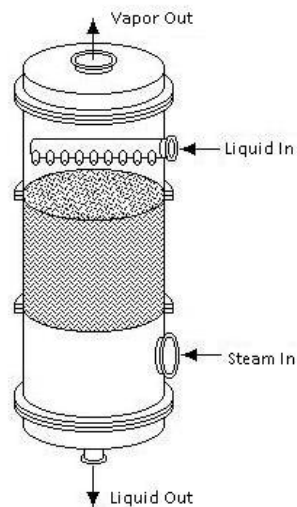
$$p_t y = Hx_g \quad (4.23)$$

Henry-Dalton lov beskriver at et økt totaltrykk fører til en økt metningsgrad av gass i vannet. Dette prinsippet benyttes for innløsningssystemene.

#### 4.6.3 Lavt trykk metoder

##### **Pakket kollonne (Packed column):**

En pakket kollonne består av en kollonne eller tank (Figur 30). Vann tilføres øverst i tanken mens oksyngass sendes inn medstrøms eller motstrøms med vannet, dvs. i toppen sammen med vannet eller i bunn. Kollonnen er fylt opp med legemer (Figur 31) som har stort A/V forhold, dette gir vannet stor overflate slik at gassen tas opp effektivt. Den resterende gassen som ikke er absorbert kan eventuelt sendes tilbake og benyttes på nytt. Dette gir høy virkningsgrad (s.111(Lekang, 2007))



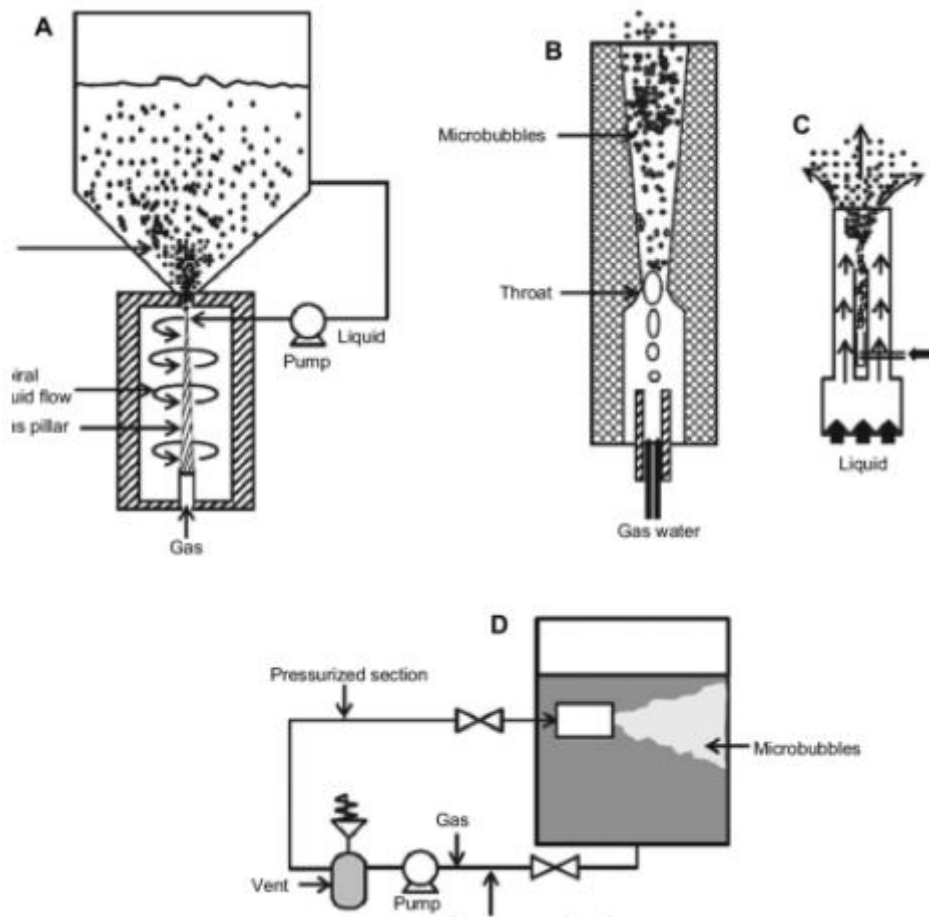
Figur 30: Packet kolonne (Chemical engineering)



Figur 31: Fyll legemer bruk i en pakket kollonne (environmental)

## Diffusor:

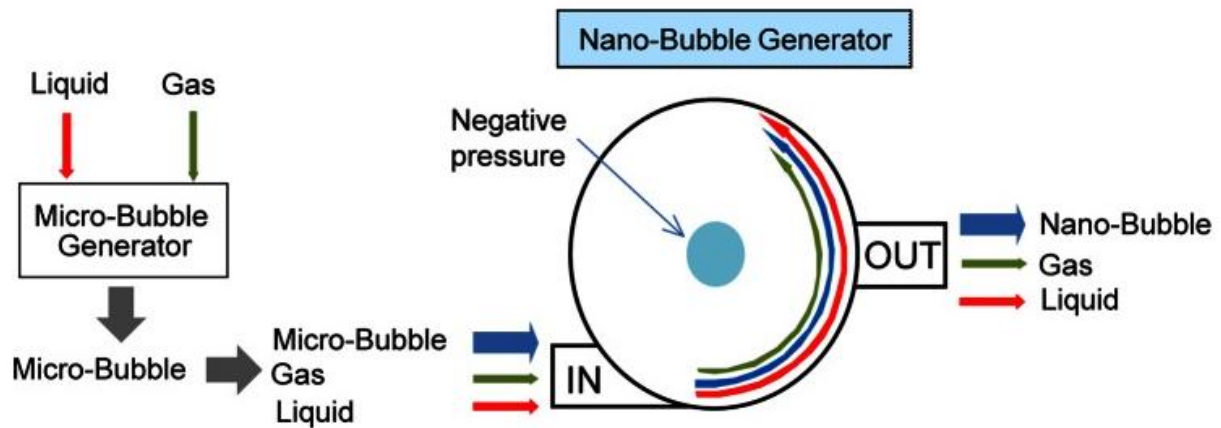
En diffusor er et system hvor det genereres oksygenbobler (Figur 32) og de slippes inn i merden. Her stiger boblene mot overflaten mens de absorberes av sjøvannet. Effektiviteten av oksygenopptaket vil variere med boblestørrelse og dybden diffusoren er plassert på. Små bobler har totalt større overflate arealer, stiger senere og vil lettere absorberes i vannet.



Figur 32: Mikroboble generator (snigdha Khuntia, 2012)

Nanobobler:

Et Japansk firma har utviklet en nanoboble generatorer. Her produseres mikrobobler som pumpes sammen med vann og gass. Pumpen skaper en sentrifugalkraft som kutter mikroboblene ved hjelp av skjærkrefter og danner nanobobler.



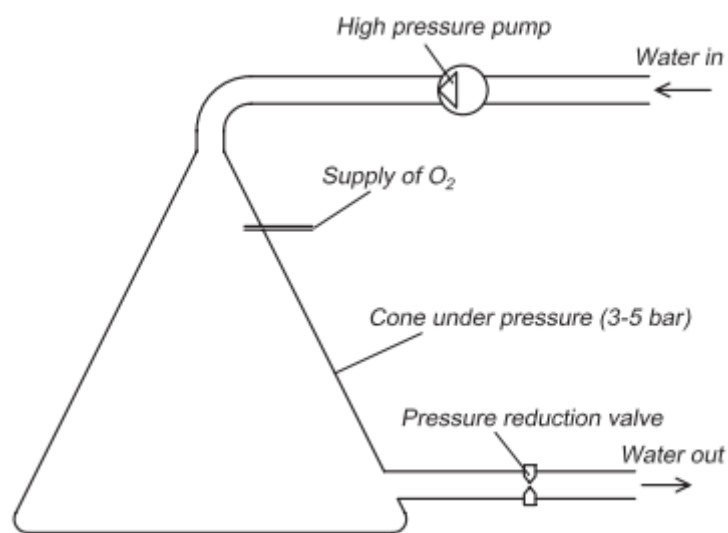
Figur 33: Nanoboble kutter (BUVITAS; Ligarc Company Limited, Osaka, Japan) (Kosuke et al., 2013).

Ved forsøk ble nanobobler produsert ved å tilføre oksyngengass ved 0,1 MPa og 0,7 L/min i mikroboble vann (Figur 33). Det ble benyttet en 3600 rpm pumpe, for å sentrifugere blandingen i 30min. Mikroboblene ble delt til nanobobler (Kosuke et al., 2013). Nanobobler er mindre enn  $D = 1 \mu\text{m}$  å de vil derfor stige langsomt. Dette skyldes gravitasjonen og en lave oppdriften, og den tilfeldige Brownske bevegelsen (Chaplin, 2017). Brownske bevegelser er uregelmessig bevegelse som skyldes kollisjoner mellom små partikler (Grøn, 2011). Nanobobler vil absorberes rask i vann grunnet sitt store totalt overflate areal.

#### 4.6.4 Høyt trykk metoder

##### **Oxygen cone (oksygen kjegle):**

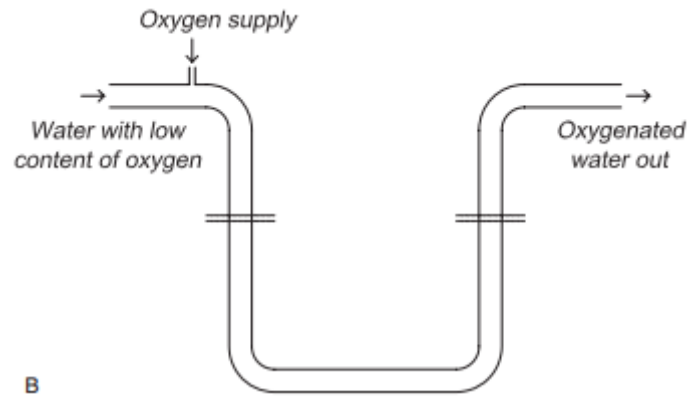
Oksygen under høyt trykk og vann tilsettes i toppen av en kjegle i forskjellige rør (Figur 34). Vandrdåper strømmer gjennom en ren oksygen atmosfære. Ved at kjeglen kan holde et trykk på 5 bar vil dette gi god oksygenoverføring og høy effekt (s.113(Lekang, 2007)). Etter at vandrdåpene har gått gjennom oksygensjiktet vil de strømme ut i bunnen av kjeglen. Utfordringen er overbelastning av kjeglen.



Figur 34: Skisse tegning av en oksygen kjegle (s.114(Lekang, 2007)).

### Oksygen brønner:

Vann og oksygen sendes inn i ett rør som føres ned på dypt vann (Figur 35). Prinsippet er å blande oksygen og vann sammen under høyt trykk. Oksygen injiseres i vannet før det sendes inn i U-røret. På bunnen av U-røret vil trykket være høyt. Trykkøkningen avhenger av dybden, ofte 10-30m. Det skapes effektiv miksing ved dannelse av turbulens i røret. Effektiviteten på denne metoden er angitt til 70-90% (s.113(Lekang, 2007)).



Figur 35: Skisse tegning av en oksygen brønner (s.114(Lekang, 2007)).





## 5. Beregninger

### 5.1 Beregning av oksygenforbruk hos laks

Som utgangspunkt for beregningen er det satt som forutsetning at det skal tilføres O<sub>2</sub> til å dekke forbruket tilsvarende 1 MTB – satt til 780 tonn. Videre er det satt at all fisk er 1 kg og vanntemperaturen 15 °C.

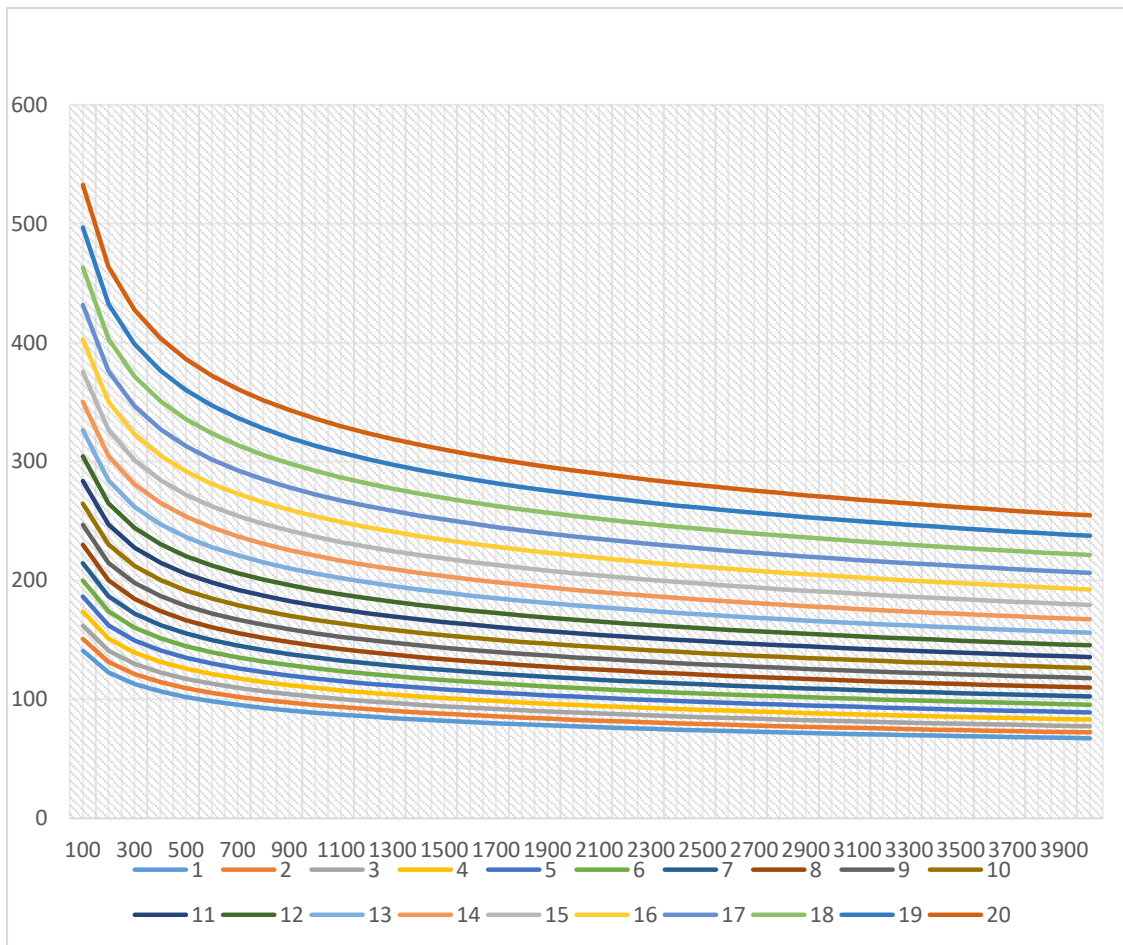
Det var i kapittel 3.2.3 vurdert forskjellige formler for laksens oksygenforbruk. Christiansens formel 3.8 antas å gi et godt estimat for oksygenforbruk hos oppdrettsfisk:

$$\dot{m}_{\text{oksygen}} = 330 * m_{\text{biomasse}}^{-0,2} * e^{0,07*T}$$

Forutsetter 1000g fisk og vanntemperatur på 15°C. Dette er verdier som gir høyt forbruk av oksygen:

$$\dot{m}_{\text{oksygen}} = 330 * 1000g^{-0,2} * e^{0,07*15^{\circ}\text{C}} = 236,9 \frac{mgO_2}{kg * time}$$

For annen vekt og temperatur kan Figur 36 benyttes:



Figur 36: Her symboliserer fargekodene temperaturen i °C, x-aksen vekten på fisken og y-aksen  $(\text{mgO}_2)/(\text{kg} \cdot \text{time})$ .

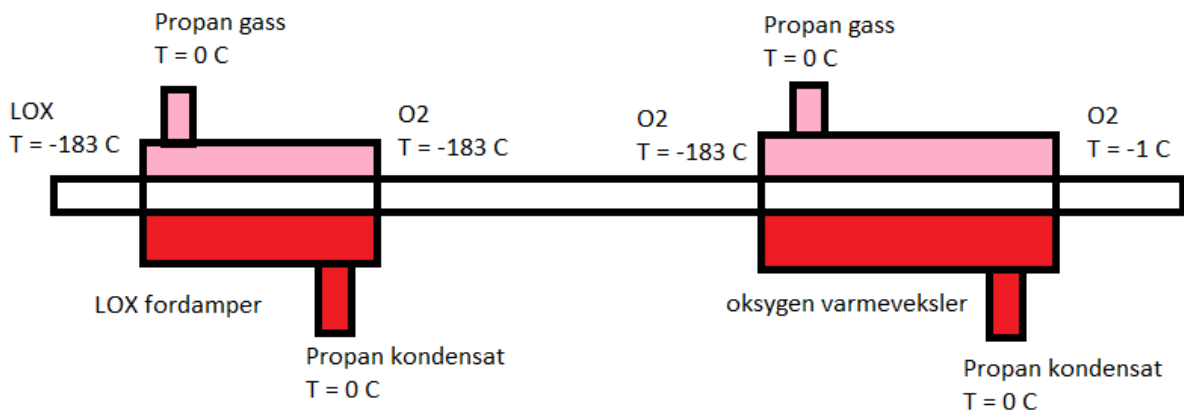
Beregner mengden oksygen som forbrukes av 1 MTB med 1 kg laks ved 15 °C per tidsenhet:

$$\dot{m}_{\text{oksygen}} = 236,9 \frac{\text{mgO}_2}{\text{kg} \cdot \text{time}} * 780 \text{tonn} = 184,78 \frac{\text{kg}}{\text{time}} = 0,0513 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

## 5.2 Fordamper system

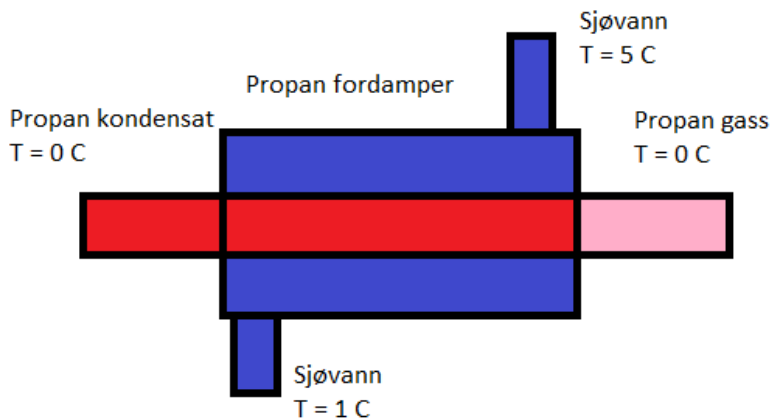
Det er valgt å benytte tre rørvarmevekslere. Det benyttes et IFV system (Figur 39) for fordamping og oppvarming av LOX. Her benyttes propan som IF og sjøvann som energikilde, propan benyttes for å unngå frysing. Propan har gode egenskaper for å være et IF medium og har et frysepunkt på  $T = -189,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Toolbox), og gode lede egenskaper. Sjøvann er en stor energikilde som er tilgjengelig ved anlegget. Sjøvann fryser ved  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Levine, 1999). Ved å trykkregulere propan til 4,7 bar blir kokepunktet  $T \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tabell 6). Dette gjør at sjøvann ikke vil fryse ved kontakt med propan.

Systemet er bygget opp av to fordampere og en varmeveksler:

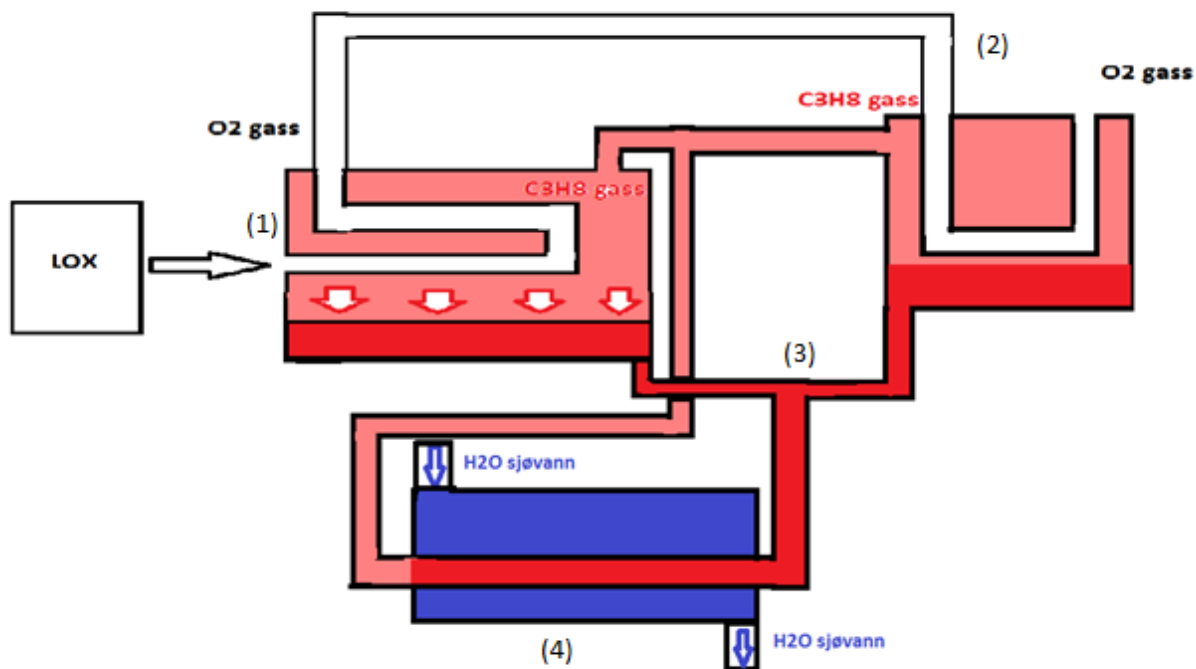


Figur 37: Temperatur og tilstand til mediene i LOX fordamperen og oksygen varmeveksleren

LOX føres inn i LOX fordamperen (Figur 37) med en  $T = -183\text{ }^{\circ}\text{C}$  ved atm. trykk i rør som er omgitt av trykkregulert propangass. LOX fordamper og oksygen gassen føres inn i oksygen varmeveksleren (Figur 37) med en  $T = -183\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oksygen gassen rørene omgis av trykkregulert propangass som energikilde. Propangassen kondenserer og oksygen gassen varmes fra  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$  til  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oksygen gassen føres videre til innløsningsystemet. Propan kondensatet med et trykk på 4,7 bar og  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sendes inn i propan fordamperen (Figur 38). Propan rørene omgis av sjøvann som strømmer inn med  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  og går ut av systemet med  $T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Propan fordamper og sendes tilbake til LOX fordamper og oksygen varmeveksler.



Figur 38: Fasetilstand og temperatur til mediene i Propan fordampneren



Figur 39: IF-systemet for fordampning og oppvarming av LOX til O<sub>2</sub> gass

Beregningen for dimensjoneringen av varmevekslerene er gjort for rør-varmevekslere. Ved skall diameter  $D_s < 305$  mm er minste avstand mellom rørveggene 4,8 mm (s.27(Øksnevad, 2010)). Det er valgt å benytte aluminiums rør. Aluminium har en høy varmeledningskoeffisient  $k = 230$  w/(m\*K) (Ormestad, 2009) og vil beholde gode ledningsevner ved lave temperaturer. Tykkelsen til rørveggene i systemet er satt til 2 mm.

Beregninger for fordampene er gjort ved vanntemperatur  $T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . For å unngå mange beregning for alle situasjoner er det valgt lav temperatur i vannet for beregning av fordampningssystem og høy temperatur ved beregning av oksygenforbruket hos laks. Dette er en sikkerhet for beregningene.

For varmevekslere settes væskestrøm til  $v_v = 1\text{-}3 \text{ m/s}$  og gass-strøm  $v_g = 15\text{-}30 \text{ m/s}$  (s.26(Øksnevad, 2010)). Ved bestemt massestrømning vil strømningshastigheten påvirke tverrsnittarealet. Tverrsnittarealet vil variere med antall rør ( $N_r$ ) som benyttes. Det er i beregningene kun benyttet ett rør. Det er sett bort fra ekspansjon ved faseovergang til mediene. Dette gjør håndberegninger mulige. Forutsetningen gjør at beregningene inneholder unøyaktig rør dimensjonering.

### 5.3 Energibehov og massestrømning i varmvekslere

For beregningen i kap. 5.3.1 til kap.5.3.3 benyttes formelen fra kap. 4.5.1 til kap. 4.5.9.

#### 5.3.1 LOX fordemper

Tabell 3: Verdiene for LOX og propangass som benytte for utregningene i kap. 5.3.1.

LOX egenskaper(products)		Propan gass egenskaper ved 4,7bar (Tabell 6)	
Tetthet	1142kg/m <sup>3</sup>	Tetthet	10,36 kg/m <sup>3</sup>
Viskositet	$188 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$	Viskositet	$7,794 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
k-verdi	$0,026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	k-verdi	$0,01576 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Cp	$1700 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Cp	$1768 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Fordampningsenergi	213kJ/kg	Fordampningsenergi (Figur 20)	400kJ/kg

For å løse oksygen i merden må LOX gjennom en faseovergang fra flytende til gassfase. Energienbehovet til fordampning varierer med trykket, økt trykk fører til økt kokepunktet. Verdiene kan lese av i et PH-diagram. I litteraturen er PH-diagram for oksygen lite beskrevet, det er derfor gjort beregningene etter energibehovet for faseovergang ved 1 atm(ToolBox):

$$P_{\text{faseovergang,LOX,1atm}} = 213\text{kJ/kg (ToolBox)}$$

Energien som kreves for faseovergangen av 184,7kg LOX til  $\text{O}_{2(\text{g})}$  ved 1 atm blir dermed:

$$Q = 184,7 \frac{kgO_2}{time} * 213 \frac{kJ}{kg} = 39,34 \frac{MJ}{time} = 10,93 \frac{kJ}{s}$$

Til fordamping av oksygen benyttes C<sub>3</sub>H<sub>8(l)</sub> (propan). Propan trykkes til 4,7 bar, dette for å oppnå stor temperatur differanse og en sikkerhetsmargin for å unngå nedfrysning i prosessen. Ved 4,7 bar vil faseovergangen for propan avgi:

$$P_{faseovergang,propan,16bar} = 400 \frac{kJ}{kg} \quad (figur\ 20)$$

Dette fører til en massestrømmingen av propan til:

$$\dot{m}_{propan} = \frac{39,34 \frac{MJ}{time}}{400 \frac{kJ}{kg}} = 98,35 \frac{kg}{time} = 0,0273 \frac{kg}{s}$$

LOX har tetthet( $\rho$ )=1142kg/m<sup>3</sup> (Tabell 3). Fra dette kan tverrsnittarealet til røret beregnes:

$$A_{tversnitt,LOX,rør} = \frac{0,0513 \frac{kg}{s}}{1142 \frac{kg}{m^3} * 1 \frac{m}{s}} = 4,49 * 10^{-5} m^2$$

Dette gir en rør diameter:

$$D_{rør,i} = \sqrt{\frac{4,49 * 10^{-5} m^2 * 4}{\pi}} = 7,56mm$$

Forutsetter en veggtykkelse på røret til t = 2 mm dermed vil ytterdiametere på røret bli:

$$D_{rør,y} = 7,56mm + 4mm = 11,56mm$$

Dette gir røret et tverrsnittareal:

$$A_{tversnitt,Dy,rør} = \frac{\pi * (11,56 * 10^{-3})^2}{4} = 1,05 * 10^{-4} m^2$$

Propan sin tetthet ved 4,7 bar er  $\rho = 10,36 kg/m^3$  (Tabell 3). Fra dette beregnes det behøvde tverrsnittarealet til skallet ved en hastighet 25 m/s:

$$A_{tversnitt,LOX,skall} = \frac{0,0273 \frac{kg}{s}}{10,36 \frac{kg}{m^3} * 25 \frac{m}{s}} = 1,05 * 10^{-4} m^2$$

Dette gir en skall diameter:

$$D_{lox,skall} = \sqrt{\frac{(1,05 * 10^{-4} m^2 + 1,05 * 10^{-4} m^2) * 4}{\pi}} = 16,38mm$$

Ut fra beregning gir det rør og skall med små tverrsnitt. Lengden som behøves for å få den ønskede varmeoverføring må beregnes. Energibehovet ble beregnet til 10,93kj/s. Arealet som behøves for varmvexleren uttrykkes:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{LM}}$$

Varmeoverføringskoeffisienten (h) for begge mediene må beregnes for å kunne beregne energioverføringskoeffisienten (U) til varmvexleren. For å finne h-verdien må Re, Pr og Nu tall beregnes. Beregningen av LOX sin h-verdi:

$$Re = \frac{1142 \frac{kg}{m^3} * 1 \frac{m}{s} * 0,00756m}{188 * 10^{-6} \frac{kg}{m * s}} = 45965,5$$

$$Pr = \frac{188 * 10^{-6} \frac{kg}{m * s} * 1700 \frac{j}{K * kg}}{0,1514 \frac{W}{m * K}} = 2,11$$

Antar turbulent strømning og benytter formel 4.16:

$$Nu = 0,0296 * 45965,5^{0,8} * 2,11^{0,4} = 214$$

Dermed kan h-verdien for LOX beregnes ved bruk av formel 4.14:

$$h = \frac{214 * 0,1514 \frac{W}{m * K}}{0,007567m} = 4287,77 \frac{W}{m^2 * K}$$

H-verdi for propan:

$$Re = \frac{10,36 \frac{kg}{m^3} * 4,04 \frac{m}{s} * (16,38 * 10^{-3}m - 11,56 * 10^{-3}m)}{7,794 * 10^{-6} \frac{kg}{m * s}} = 160281$$

$$Pr = 0,875$$

Antar turbulent strømning og beregner Nusselts tall for propan fra formel 4.16:

$$Nu = 0,0296 * 160281^{0,8} * 0,875^{0,3} = 414,76$$

Dermed kan h-verdien for propan beregnes ved bruk av formel 4.14:

$$h = \frac{414,76 * 0,01576 \frac{W}{m * K}}{(16,38 * 10^{-3}m - 11,56 * 10^{-3}m)} = 1361,8 \frac{W}{m^2 * K}$$

Legger sammen ledningen i begge mediene og benytter aluminium som materiale i rørene.

Beregning av U-verdi (formel 4.10):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4287,77 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0,002m}{205 \frac{W}{m * K}} + \frac{1}{1361,8 \frac{W}{m^2 * K}}} = 1032,1 \frac{W}{m^2 * K}$$

Temperaturdifferansen  $\Delta T_{LM}$  beregnes som forskjellen i temperatur mellom mediene. LOX ved 1 atm vil holde  $-183 \text{ }^\circ\text{C}$  og propan er satt til  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\Delta T_{LM} = 183K$$

Dermed kan overflatearealet som behøves for varmeoverføringen beregnes med formel 4.8:

$$A = \frac{10,93 \frac{kJ}{s}}{1032,1 \frac{W}{m^2 * K} * 183K} = 0,0579m^2$$

Fra dette arealet finner man lengden som behøves for røret i varmeveksleren:

$$L = \frac{A}{\pi * D_y} = \frac{0,0579m^2}{\pi * 11,56 * 10^{-3}} = 1,59m$$

Det totale volumet til LOX fordampere blir:

$$V_{LOX \text{ fordampere}} = A_{tversnitt,skall} * L = 1,05 * 10^{-4}m^2 * 1,59m = 1,67 * 10^{-4} m^3$$



### 5.3.2 Oksygen varmeveksler

Tabell 4: Verdiene for oksyngass og propangass som benytte for utregningene i kap. 5.3.2.

Oksyngass egenskaper (ToolBox)		Propan gass egenskaper ved 4,7bar (Tabell 6)	
Tetthet	1,7475kg/m <sup>3</sup>	Tetthet	10,36 kg/m <sup>3</sup>
Viskositet	1,616*10 <sup>-5</sup> kg/(m*s)	Viskositet	7,794*10 <sup>-6</sup> kg/(m*s)
k-verdi	0,02 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	k-verdi	0,01576 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Cp	984,4 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Cp	1768 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Fordampningsenergi	213kJ/kg	Fordampningsenergi (Figur 20)	400 kJ/kg

Oksyngassen vil holde en temperatur -183°C ut fra LOX fordamperen. Det benyttes en varmeveksler for å varme opp oksyngassen til -1°C. Varmekapasiteten til O<sub>2(g)</sub> er 984 J/(kg\*K) (Tabell 4).

$$P = 984 \frac{J}{kg * K} * 182K * 184,76 \frac{kgO_2}{time} = 33,08 \frac{MJ}{time} = 9,191 \frac{kJ}{s}$$

Det benyttes propan som mellommedium for oppvarming. Propan vil som i LOX fordamperen være trykk satt til 4,7 bar. Massestrømningen for propan:

$$\dot{m}_{propan} = \frac{33,08 \frac{MJ}{time}}{400 \frac{kJ}{kg}} = 82,72 \frac{kg}{time} = 0,023 \frac{kg}{s}$$

Tverrsnitts arealet for at oksyngass skal strømme med 15 m/s beregnes:

$$A_{tverrsnitt,rør} = \frac{0,0513 \frac{kg}{s}}{1,7475 \frac{kg}{m^3} * 15 \frac{m}{s}} = 1,96 * 10^{-3} m^2$$

Dette gir en indre diameter på røret:

$$D_{varmeveksler,rør,i} = \sqrt{\frac{1,96 * 10^{-3} m^2 * 4}{\pi}} = 49,9mm$$

Beregner den ytre diameteren til røret ved rørtykkelse t = 2mm. Dette gir:

$$D_{\text{varmeveksler,rør,y}} = 49,9\text{mm} + 4\text{mm} = 53,9\text{mm}$$

Beregner tversnittarealet for den ytre diameteren til røret:

$$A_{\text{tversnitt,Dy,rør}} = \frac{\pi * (53,9 * 10^{-3}\text{m})^2}{4} = 2,28 * 10^{-3} \text{m}^2$$

Tversnittarealet for skallet i varmeveksleren er beregnet til:

$$A_{\text{tversnitt,O}_2,\text{skall}} = \frac{0,023 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{10,36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 4,44 * 10^{-4} \text{m}^2$$

$$D_{\text{propan,skall}} = \sqrt{\frac{(4,44 * 10^{-4} \text{m}^2 + 2,28 * 10^{-3} \text{m}^2) * 4}{\pi}} = 58,89\text{mm}$$

Har funnet diameteren til skall og rør, og satt hastigheten til mediene. Må da finne lengden som behøves for at overføringsflaten blir stor nok slik at oksygenet får ønsket temperatur.

Beregner arealet som behøves først, dette gjøres ved bruk av formel (4.8):

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{LM}}$$

For å beregne U-verdien må h-verdiene for oksygen- og propan-gassen beregnes.

Oksygen-gassen sin h-verdi:

$$Re = \frac{1,7475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0499\text{m}}{1,616 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 80940$$

$$Pr = 0,7694$$

Det antas turbulent strømning:

$$Nu = 0,0296 * 80940^{0,8} * 0,7694^{0,4} = 225,05$$

Ut fra dette kan varmeoverføringskoeffisienten beregnes fra formel 4.14

$$h = \frac{225,05 * 0,02067 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}}{0,0499\text{m}} = 93,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

H-verdi for propan:

$$Re = \frac{10,36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4,8 * 10^{-3}\text{m}}{7,794 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 31901$$

$$Pr = 0,875$$

Det antas turbulent:

$$Nu = 0,0296 * 31901^{0,8} * 0,875^{0,3} = 114$$

Ut fra dette kan varmeoverføringskoeffisienten beregnes fra formel 4.14:

$$h = \frac{114 * 0,01576 \frac{W}{m * K}}{4,8 * 10^{-3} m} = 374,33 \frac{W}{m^2 * K}$$

Fra dette kan kan energioverføringskoeffisienten beregnes fra formel 4.10:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{93,22 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0,002 m}{205 \frac{W}{m * K}} + \frac{1}{374,33 \frac{W}{m^2 * K}}} = 74,58 \frac{W}{m^2 * K}$$

Beregner den logaritmiske temperaturdifferansen mellom mediene fra formel 4.9:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(0 + 183) - (0 + 1)}{\ln\left(\frac{0 + 183}{0 + 1}\right)} = 34,94 K$$

Rørets overflateareal beregnes fra formel 4.8:

$$A = \frac{9,44 \frac{kJ}{s}}{74,58 \frac{W}{m^2 * K} * 34,94 K} = 3,62 m^2$$

Dette er arealet som behøves for ønsket varmeoverføring. Berenger lengden til røret:

$$L = \frac{3,62 m^2}{\pi * 53,9 * 10^{-3}} = 21,4 m$$

Volumet til oksygen varmeveksleren vil dermed bli:

$$V_{O_2 \text{ varmeveksler}} = A_{\text{tversnitt}, O_2, \text{skall}} * L = 4,44 * 10^{-4} m^2 * 21,4 m = 1,08 * 10^{-2} m^3$$

### 5.3.3 Propan fordamer:

Tabell 5: Verdiene for propanvæske og sjøvann som benytte for utregningene i kap. 5.3.3.

Sjøvann egenskaper (ToolBox) (Kishor G. Nayar, 2016)		Propanvæske egenskaper ved 4,7bar (Tabell 6)	
Tetthet	1,028kg/m <sup>3</sup>	Tetthet	528,7 kg/m <sup>3</sup>
Viskositet	1,906*10 <sup>-3</sup> kg/(m*s)	Viskositet	1,259*10 <sup>-4</sup> kg/(m*s)
k-verdi	0,570 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	k-verdi	0,1054 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Cp	4001 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Cp	2507 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Fordampningsenergi		Fordampningsenergi (Figur 20)	400kJ/kg

Propanen benyttes for oppvarming og fordamping av oksygen. Massestrømningene til propan ble beregnet i 5.3.1 og 5.3.2. Strømningene settes sammen i en fordamper med sjøvann:

$$\dot{m}_{tot,propan} = 0,0273 \frac{kg}{s} + 0,023 \frac{kg}{s} = 0,0503 \frac{kg}{s}$$

Sjøvann vil fryse på -2°C. Trykket på propan i fordamperen er satt for at propan fordamper ved -0 °C. Dette for å få størst mulig temperatur differansen uten frost dannelse. Ved dette trykket en fordampningsenergien til propan bestemt fra Figur 20. Det beregnes energimengden som må tilsettes:

$$P = 0,0503 \frac{kg}{s} * 400 \frac{kJ}{kg} = 20,12 \frac{kJ}{s}$$

Det antas at vannet som kommer in har en temperatur på 5°C og vil gå ut med en temperatur på 1°C

$$\dot{m}_{tot,sjøvann} = \frac{20,12 \frac{kJ}{s}}{4001 \frac{J}{kg * K} * 4K} = 1,26 \frac{kg}{s}$$

Propan væske under et trykk på 4,7 bar har en tetthet( $\rho$ )=528,7 kg/m<sup>3</sup>. Fra dette beregnes tverrsnittarealet til røret for en hastighet 1m/s:

$$A_{tversnitt,propan,rør} = \frac{0,0503 \frac{kg}{s}}{528,7 \frac{kg}{m^3} * 1 \frac{m}{s}} = 9,51 * 10^{-5} m^2$$

Dette gir en rørdiameter:

$$D_{propan,rør} = \sqrt{\frac{9,51 * 10^{-5} m^2 * 4}{\pi}} = 11,01 mm$$

Rør tykkelse t=2:

$$D_{y,rør} = 11,01 mm + 4 mm = 15,01 mm$$

Tversnittarealet til yttersiden av røret:

$$A_{tversnitt,D_y,rør} = \frac{\pi * (15,01 * 10^{-3} m)^2}{4} = 1,77 * 10^{-4} m^2$$

Vannet holder en hastighet 3m/s

$$A_{tversnitt,LOX,skall} = \frac{1,26 \frac{kg}{s}}{1028 \frac{kg}{m^3} * 3 \frac{m}{s}} = 4,08 * 10^{-4} m^2$$

$$D_{propan,skall} = \sqrt{\frac{(4,08 * 10^{-4} m^2 + 1,77 * 10^{-4} m^2) * 4}{\pi}} = 27,3 mm$$

Som vi ser ved utregning er dette små rør. Derfor velges det å kun benytte en rør varmeveksler. Lengden som behøves for å få den ønskede varmeoverføring må beregnes. Ønsket energioverføring ble beregnet i kap. 5.1. Arealet som behøves for varmeveksleren uttrykkes:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{LM}}$$

For å beregne U må h-verdiene for mediene beregnes. Flytende propan sin h-verdi:

$$Re = \frac{528,7 \frac{kg}{m^3} * 3 \frac{m}{s} * 0,01101 m}{1,259 * 10^{-4} \frac{kg}{m * s}} = 138705$$

$$Pr = 2,99$$

$$Nu = 0,0296 * 138705^{0,8} * 2,99^{0,4} = 596$$

$$h = \frac{596 * 0,1054 \frac{W}{m * K}}{0,01101m} = 5705,3 \frac{W}{m^2 * K}$$

H-verdi for vann:

$$Re = \frac{1028 \frac{kg}{m^3} * 1 \frac{m}{s} * (0,0273 - 0,01501)m}{1,906 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}} = 6629$$

$$Pr = 13,3 \text{ fra tabell}$$

$$Nu = 0,0296 * 6629^{0,8} * 13,3^{0,3} = 73,4$$

$$h = \frac{73,4 * 0,570 \frac{W}{m * K}}{(0,0273 - 0,01501)m} = 3408,2 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{5705,3 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0,002m}{205 \frac{W}{m * K}} + \frac{1}{3408,2 \frac{W}{m^2 * K}}} = 2133,6 \frac{W}{m^2 * K}$$

Finner den logaritmiske temperaturredifferansen mellom mediene:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(5 - 0) - (1 - 0)}{\ln\left(\frac{5 - 0}{1 - 0}\right)} = 2,48K$$

$$A = \frac{20,12 \frac{kJ}{s}}{2133,6 \frac{W}{m^2 * K} * 2,48K} = 3,8m^2$$

$$L = \frac{3,8m^2}{\pi * 0,01501 m} = 80,53m$$

Volumet til propan fordampere er:

$$V_{propan \text{ fordampere}} = A_{tversnitt, LOX, skall} * L = 4,08 * 10^{-4} m^2 * 80,53 m = 3,28 * 10^{-2} m^3$$

Det totale volumet til systemet vil dermed være:

$$V_{tot} = V_{propan \text{ fordampere}} + V_{O_2 \text{ varmeveksler}} + V_{LOX \text{ fordampere}}$$

$$V_{tot} = 3,28 * 10^{-2} m^3 + 1,08 * 10^{-2} m^3 + 1,67 * 10^{-4} m^3 = 4,37 * 10^{-2} m^3$$

Beregningene som er utført er sterkt unøyaktige og gir for lavt volum på systemet. Grunnen til dette er at det vil oppstå tofasesituasjoner i rørene, dette er sett bort fra i beregningene.

Tofasesituasjonen gjør at det vil være både gass og væske i røret på en gang. Ved tofasesituasjoner vil gassen ekspandere, noe som vil føre til en trykkøkning. Denne

trykkøkningen gjør at tverrsnittsarealet eller hastigheten må økes. Det er i beregningene satt konstant rørdiameter og strømningshastigheter. Dette vil i realiteten føre til trykkøkning. I en tofasesituasjon vil det være mindre kontaktflate mellom røret og væsken, noe som fører til redusert varmeledning. Energioverføringen vil reduseres da noe av energioverføringen vil skje gjennom gassfasen, som har en lavere ledningsevne. Dette gjør at lengden på røret må økes. I en optimalisert fordampner vil det bli benyttet flere rør med en diameter som er optimal for varmeoverføring.





## 6. Dimensjonering av komponenter

I kravspesifikasjonen for oppgaven ønskes det å levere oksygen for en konsesjon med oppdrettslaks. I beregninger er det sett bort fra miljøfaktorene. Anlegget er dimensjonert til å levere den mengde oksygen fisken forbruker. Det er antatt en optimal vekst temperatur hvor oksygenbehov til laks er stort, temperatur 15°C og fiskestørrelse på 1 kg. Ved de oppgitte forutsetningene antas et forbruk på:

$$\dot{m}_{\text{oksygen}} = 184,78 \frac{\text{kg}}{\text{time}} = 0,0513 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 6.1 Landlagring

For land lagring benyttes kryogen standard tank. Det er valgt å ta utgangspunkt i Linde sine modeller (Linde, 2012). Disse er bygget opp som forklart i teorien. Det indre skallet er laget av rustfritt stål og yterskallet av karbon. Trykkapasitet i tanken bestemmer hvor mye av volumet som kan benyttes til lagring. Det velges en tank med 18 bar trykkapasitet der 95 % av volumet kan benyttes for lagring av 1 bar LOX. Størrelsen på tanken bestemmes av det daglige forbruket. Det velges en «Cryogenic standard tanks lits 2, size 610 (Linde, 2012)» som har en kapasitet på 66850kg LOX som krever et daglig forbruk på 0,12%. Daglige forbruk må være mer enn:

$$\dot{m}_{\text{daglig forbruk}} = 66850\text{kg} * 0,12\% = 80,22 \frac{\text{kg}}{\text{dag}}$$

Ved kontinuerlig forbruk av 184,5kg/h LOX må tanken etterfylles hver 15. dag.



Figur 40: Linde Cryogenic standard tanks (Linde, 2012)

## 6.2 Lagring

Samarbeidspartner til prosjektet er Jara Praxair. Det skal benyttes to transportable kryogene offshore tanker på flåte for lagring og transport av LOX. Tankene er laget spesielt for oppdrettsnæringen og er vakuumisolert som landtanken. Offshore tankene er bygget inn i et rammeverk for å unngå skader ved transport og håndtering. Tankene er 10 ft og kan frakte 7000 kg LOX per tank (Praxair, 2016a).



- Godkjent i forhold til DNV 2.7-1 / EN 12079 standard
- Maks trykk 18 bar
- Rammeverk 10 fors
- Brutto vekt 13,8 tonn
- Kapasitet ca. 7 tonn LOX

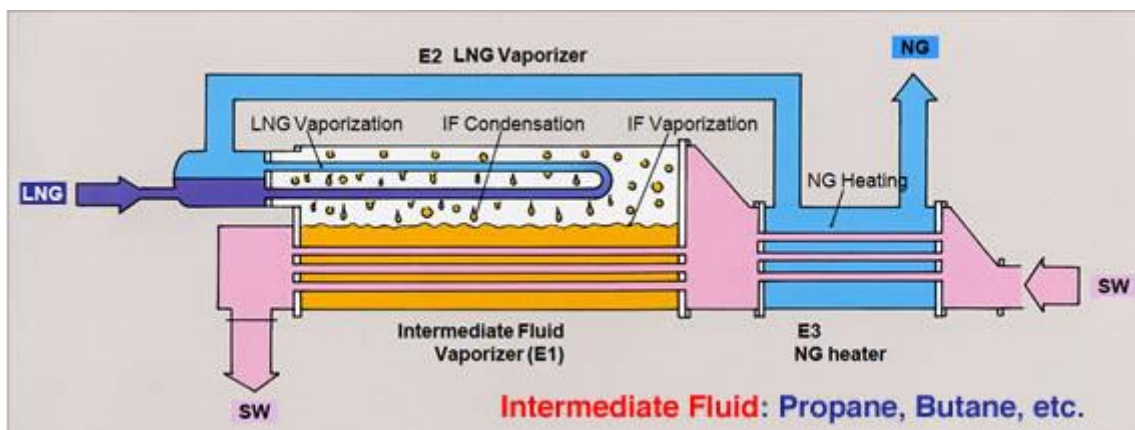
Figur 41: Offshore tank fra Praxair (2016a)

Merden må alltid ha tilgang til oksygen. Ved bruk av 10ft tanker med en kapasitet på 7000L må tankene regelmessig fylles:

$$\frac{7000L}{184,7L/t} = 37,9timer = 37timer og 54min$$

## 6.3 Fordamper

Det er valgt å stasjonere fordamperen separat på en lekter i tilknytning til oppdrettsanlegget. Flåten med offshore tanken legges ved lekteren og kobles til. Det er valgt en fordamper som består av tre deler som er bygd sammen (Figur 42). Fordamperne og varmeveksleren er designet med fastlåst rørdesign som en skall og rør -varmeveksler. Fordampningssystemet er planlagt med en kapasitet til å fordampe og varme 184,78 kgLOX/h (kap.4.5.1) Beregninger av størrelsen til systemet har svakheter. Det er derfor utført estimater på størrelsen av systemet.



Figur 42: Sammensatt system for en IFV for LNG (Kobelco).

### 6.3.1 Estimat ved å ekspandere væskene i beregningene

LOX og propan har en ekspansjonsrate:

$$\text{ekspansjonsrate for oksygen} = \frac{1142 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1,7475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 653,5 \text{ ganger}$$

$$\text{ekspansjonsrate for propan} = \frac{528,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{10,36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 51,03 \text{ ganger}$$

$$V_{tot} = V_{\text{propan fordampner}} * 51,03 + V_{\text{LOX fordampner}} * 653,5$$

$$V_{tot} = (3,28 * 10^{-2} \text{ m}^3 * 51,03) + (1,67 * 10^{-4} \text{ m}^3 * 653,5) = 1,78 \text{ m}^3$$

Fordampersystemet vil være større grunnet redusert varmeledning og dermed behov for flere og lengere rør for energioverføring. Dette vil påvirke lengden og tverrsnitts arealet til fordampneren. Væskestrømmingen kan forandres for å endre temperaturdifferansen. Dette gir en større energioverføring og muligheten for å redusere størrelsen.

### 6.3.2 Estimering fra Chart Industries fordampere:

«Chart Industries group» har utviklet sirkulerende vann fordampere (Thermax, 2010).

Modellen «P 300-30» er dimensjonert til å fordampe og varme opp 240 kg/h LOX. Denne fordampneren har en størrelse:

$$V_{P\ 300-30} = 5,69\text{m} * 0,762\text{m} * 1,067\text{m} = 4,63\text{m}^3$$

«P 300-30» fordampneren benytter 10 °C vann. Her er det et krav om en vannstrømning  $\dot{m} = 1224 \text{ kg/h}$ .

For propanfordampneren vil energibehovet være lik:

$$P_{\text{propan fordampner}} = P_{\text{LOX fordampner}} + P_{\text{O}_2(g)} \text{ varmeveksler}$$

Energibehovet hos den ønskede propan fordampneren vil være tilsvarende energibehovet hos P 300-30 fordampneren. Temperaturdifferansen, ledningsevne og massestrømmer vil være forskjellig. Dette er et estimat, ingen absolutt verdi.

Modellen «T300S»(Industires) er en fordampner som bruker vanddamp som energikilde. Denne har muligheten til å fordampe 163 kg LOX i timen. Fordampneren har dimensjon:

$$V_{T300S} = 2,8m * 0,56m * 1,68m = 2,63m^3$$

Situasjonen vil være gass mot væske fordampner. Samme situasjon forekommer i LOX fordampneren og oksygen varmeveksleren. Dimensjonene vil variere i forhold til temperatur differansen og ledningsevnen. Chart sine modeller brukes for å estimere en størrelse til IFV-systemet. Det benyttes tre komponenter til fordampning av LOX. Det kan antas at fordampneren og varmeveksleren til oksygen vil være i størrelsesorden lik «T300S». I «T300S» benyttes vanddamp istedenfor propandamp, det antas likevel at fordampnerene har likheter. Forandring i strømmingen til mediene kan føre til forandring i størrelse og kapasitet i begge fordampnerne.

Det kan estimeres fra Chart industries sine komponenter at fordampningssystemet vil ha en størrelse:

$$V_{\text{chart industries}} = 4,63m^3 + 2,63m^3 = 7,26m^3$$

### 6.3.3 Estimering utfra luftfordampere

Fordampneren som benyttes vil være mindre enn luftfordampersystemet. Luftfordampere må seriekobles for å oppnå ønsket kapasitet. Fra Chart industries sitt datablad er det plukket ut luftfordampere for å fordampe 184 kgLOX/h. Modellen som er valgt heter «SG140HF». Denne har en kapasitet for LOX på 353 Nm<sup>3</sup>/h. Dette tilsvarer en massestrøm:

$$\dot{m} = \frac{353 \frac{m^3}{h}}{1,7574 \frac{kg}{m^3}} = 200 \frac{kg}{h}$$

Dette er ved normal kapasitet med 20 °C lufttemperatur. Denne fordampneren har et volum på:

$$V_{SG140HF} = 5,41m * 1,21m * 1,21m = 7,92m^3$$

Luftfordampneren vil kunne benyttes i 8 timer før den fryser. Parallellkobling av to luftfordampere er nødvendig for å opprettholde kontinuerlig drift. Dette gir et totalt volum:

$$V_{\text{luftfordamper}} = 7,92\text{m}^3 * 2 = 15,84\text{m}^3$$

Ofte vil lufttemperaturen og vanntemperaturen være tilnærmet like. Varmekapasiteten til vann er fire ganger større enn for luft. Ved bruk av sjøvann benyttes pumper for å bestemme massestrømmen over fordamperen, brukes luftfordampere vil ikke strømmingen bestemmes. Fra dette kan det antas at luftfordamperen er fire ganger større enn væskefordamperen. Væskefordamperne kan anta å ha en størrelse:

$$V_{\text{væskefordamper}} = \frac{V_{SG140HF}}{4} = \frac{7,92\text{m}^3}{4} \approx 2\text{m}^3$$

IFV systemet med sjøvann kan ses på som to fordampere hvor det i den ene foregår faseovergang og oppvarming av oksygen og i den andre fordampning av propan. Derfor kan det antas at systemet til sammen har en størrelse på 4 m<sup>3</sup>.

#### 6.3.4 Størrelsen til fordamper

Fra estimatene på størrelsen til fordamperen kommer det frem til at en størrelsen på 4 m<sup>3</sup>. Det antas at fordamperen vil ha en kapasitet til å fordampe og varme opp 184,78 kg LOX fra -183 °C til -1 °C. Det anbefales å teste systemet empirisk.

## 6.4 Innløser

Det foreslås en mikroboble innløser for å tilsette oksygen til vannet. Pentair sitt «sea pen aeration system» (SPA) kan benyttes for å genere og løse inn mikroboblene. Sjøvann og oksygen sendes gjennom en pumpe. Her trykkesettles blandingen slik at vannets metningsgrad økes. Trykket senkes raskt og mikrobobler dannes.



Figur 43: Plassering av doseringsskap (Pentair)

Figur 44: Lufting plattform (Pentair)

Det benyttes fem innløsningsplattformer (Figur 44) og tilhørende mikroboble generatorer.

Kapasiteten per generator:

$$\frac{184,68 \frac{kg}{time}}{5} = 37 \frac{kg}{time}$$

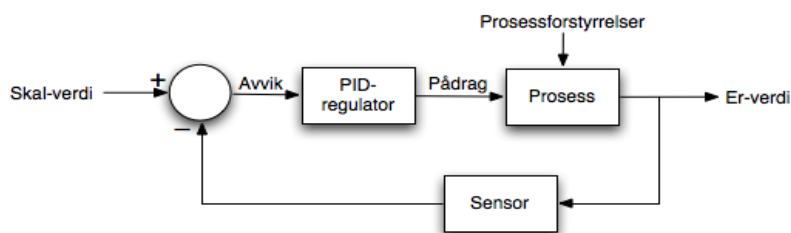
$$\frac{37 \frac{kg}{time}}{1,7475 \frac{kg}{m^3}} = 21,17 \frac{m^3}{time} = 353 \frac{L}{min}$$

Diffusorene har en kapasitet på 510 lpm (liter per minutt).

Luftplattformene har tre «diffusorer» innløserer (Figur 44). Plattformene er plassert strategisk i merden for en best mulig oksyginering (Figur 43). PENTAIR anbefaler å plassere innløserene på 50ft (16,67m) dyp (Pentair, 2016). Doseringsskap (Figur 43) plasseres på siden av merden og her kan forbruket av oksygen til merden kontrolleres.

Det anbefales å benyttes målesensorer for oksygeninnholdet, temperatur og salinitet.

Sensorene er plassert på 5m, 3m og 1m dybde. Dette er områdene som oftest vil være utsatt for svekket oksygennivåer. Måle-resultatene sendes til en regulator som justerer oksygentilførselen i forhold til behovet. En (Proporsjonal Integrasjon Derivasjon) PID-regulator benyttes. PID-regulator er den mest benyttede regulatoren i prosessindustrien(Mathisen, 2013).



Figur 45: PID regulator(Mathisen, 2013)

Figur 45 viser at regulatoren mottar data fra målesensorene og regulerer pådraget i forhold til verdiene i merden. P leddet er pådraget som beregnes ved en konstant multiplisert med avviket. I er integral leddet. Dette gjør formelen i regulatoren om til annenorden. D leddet er derivat leddet. Dette fungerer som en demping på hurtig endring i avvik. En PID regulator vil reagere raskt på endringer i systemet. P, I og D faktorene multipliseres med en konstant for å bestemme pådraget. Ved manipulering kan reaksjonshastigheten bestemmes.

## 7. Diskusjon

Laksenæringen er en raskt voksende næring nasjonalt og internasjonalt. Produksjon av laks i åpne systemer i havet er den dominerende metoden for oppdrett. Ved økende verdensbefolkning og økt behov for mat er matproduksjon i havet en viktig næringskilde for mennesker (Martin Steinholt, 2015). Lakselus er en faktor som årlig står for milliard tap i fiskenæringen (Thonhaugen, 2016). Dette gjør at satsning på lukkede anlegg på land og sjø er aktuelt. Miljøpartiet de grønne har et mål om at all oppdrettsfisk skal inn i lukkede merder innen 2025 (Nodland, 2017). Dette er en pådriver til videre forskning på optimalisering av levetilstand for laks. Overgangen til lukkede merder er en kostbar prosess, Grieg Seafood beregnet at overgangen fra sjøanlegg til landanlegg ville koste 110 milliarder NOK for norske anlegg (Myrset, 2015). Produksjonsprisen på laks i landbaserte anlegg vil være høyere enn i åpne merder. Dette gjør at delvis lukkede merder i sjøen er et godt alternativ for reduksjon av lusepåslaget.

For anlegget er det beregnet et oksygenforbruk for 780 000 laks på 1 kg. Det er i praksis ikke vanlig at en hel konsesjon av laks veier 1 kg, dette skyldes at regjeringen har satt en grense på  $25 \text{ kg/m}^3$  (Regjeringen, 2009). En merd med omkrets 130 m og dybde 25 m har et volum på  $25000 \text{ m}^3$ . Dermed vil 780 000 laks med en slaktevekt på 5 kg måtte fordeles på 5 merder. Oksygenforbruket ble estimert til  $184,78 \text{ kg/h}$  basert på Christiansens formel fra 1990 (Ruth et al., 1992). Dette er et teoretisk beregnet tall for oksygenbehovet i lukkede merder. I oppgaven benyttes luseskjørt for å redusere lusepåslaget, dette er en delvis lukket merd. Det fører til at noe oksygen vil tilføres ved hjelp av utligning internt i vannet, diffusjon med luft og ved «oppstøt» fra understrømmer. Det er også antatt at all fisk vil stå i det lukkede vannvolumet. I praksis vil fisken ha mulighet til å bevege seg til dypere vann, her vil vannforholdene være uforandret.

For å tilfredsstille fiskens behov for oksygen i delvis lukkede merder tilsettes oksygen gjennom oksygeneringsanlegg. Ved tilgang på oksygen vil laksen bedre sin metabolisme, noe som fører til økt produksjon av avfallsproduktene  $\text{CO}_2$  og ammoniakk. Det er antatt at bufferkapasiteten i sjøvann vil være så høy at problemer med økte ammoniakk verdier og reduserte pH kan ses bort fra. Om dette er tilfelle når sirkulasjonen i vannet reduseres med luseskjørt er usikkert. Fisken er mer følsom for ammoniakk i sjøvann, små konsentrasjoner kan skade fisken. Dette bør undersøkes videre.

Luseskjørt benyttes for å redusere lusepåslaget på fisken. Lusa vil være mest aktiv i de varme delene av året (Aadland, 2015) dermed vil skjørtene ha størst effekt på sommerstid. I de kalde periodene vil lusepåslaget være mindre. Det kan derfor anbefales å installere en løftemekanisme slik at skjørtet kan løftes av. Dette vil kunne redusere behovet for oksygenering i perioder med lite lus og være en sikkerhetsmekanisme når kritiske verdier oppstår i vannet.

For beregning av oksygenforbruket til laks er det sett på den metabolske raten. Figur 6 kap.3.2.1 viser forandringen i oksygenforbruket ved forskjellige metabolske stadier. Det er antatt i oppgaven at laksen i merder har et stoffskifte som tilsvarer fôringsmetabolisme for beregning av oksygenforbruket. Om fisken vil holde fôringsmetabolisk rate når den får økt oksygentilgang er usikkert. Utfordringen vil være å finne grenseverdien mellom fôringsmetabolisme og aktiv metabolisme. Økt oksygentilførsel kan føre til aktivitet som ikke fører til økt tilvekst. Aktiv metabolisme gir dårligere utnyttelse av oksygen og må unngås.

LOX lagrene er vakuumisolerte tanker. Det vil alltid oppstå noe energioverføring til omgivelsene. Dette fører til et krav om daglig minste forbruk. Tankens størrelse dimensjoneres derfor i forhold til det daglige forbruket. Ved likhet mellom disse tallene vil det unngås tap av oksygen. Gjennom et år vil oksygenbehovet til fisken variere grunnet temperatur og vekst. Det vil være formålstjenlig å ha forskjellige størrelser på tankene for å unngå tap til omgivelsene. Alternativt kan det installeres en mindre tank som tidvis må fylles oftere. I oppgaven er det valgt å benytte en tank hvor det daglige forbruket må være større enn 80,22 kg. Dette valget er gjort med en antagelse på at systemet sjeldent vil ha et forbruk likt 183,78kg/h. Det burde her gjøres tester med oksygenering for å finne reelle tall på daglig forbruk.

Algedød kan føre til raske oksygendropp med verdier helt ned til 40 %. Under slike situasjoner vil fisken redusere sitt oksygenbehov til kun vedlikehold. Når dette oppstår er det behov for forutsigbarhet, og at tiltak kan iverksettes raskt. Dette kan kreve at anlegget må ha større kapasitet en beregnet og at registrering av mengden alger må overvåkes.

I fordampningssystemet er det valgt å benytte sjøvann som varmekilde til fordel for luft. Dette er gjort grunnet sjøvann sin høyere varmekapasitet og gode muligheter for tvungen konveksjon. Ved bruk av sjøvann settes vannet i sirkulasjon ved bruk av en pumpe. Dette gir høyere kapasitet når vann pumpes raskere over fordamperen og temperaturdifferansen stiger, som igjen fører til høyere ledningsevne. Luft som varmekilde vil derimot gi større risiko for frysing, anlegget blir fysisk større og dermed vanskeligere å installere på en flåte.



Til fordamping av LOX benyttes en IFV med sjøvann som varmekilde. Dette valget er gjort for å redusere størrelsen til fordamperen og unngå nedfrysning. Ved dimensjonering/beregning av fordamperen oppsto flere utfordringer. PH-diagram for LOX har vært vanskelig å oppdrive, da det er lite og gammel litteratur om temaet. Derfor ble det valgt å beregne anlegget for LOX med atm. trykk. Påfølgende regning viste seg å være vanskelig, da en tofasesituasjoner oppstår i fordamperen for både oksygen og propan. Dette fører til forandring av trykk, hastighet, og redusert ledningsevne.

Fordelen med å bruke en ORV er at beregningen trolig er mer kjent da denne fordamperen er mye brukt i gass industrien. Svakheten er at den vil fryse og at to parallelle fordampere må installeres for å sikre kontinuerlig drift.

Beregningene i oppgaven ser bort fra tofasesituasjoner, dette medfører at beregningene gir lave størrelser på fordamperen. Det er jobbet med å estimere en verdi som tar hensyn til tofase tilstander. For mer nøyaktige beregninger anbefales det å sette et gitt areal på rør og endre innstrøms hastigheten til mediet. Innstrøms hastigheten må reguleres slik at faseforandringen gir en strøm ut fra røret med en hastighet på 30 m/s. Her vil en god løsning være å beregne med mol inn er lik mol ut. Ledningsevnen vil fortsatt være en utfordring. Rørene vil da ha en konstant størrelse, dette gjør at når LOX sendes inn vil en ukjent del av væsken være i kontakt med rørveggen. Når væsken fordamper vil dette føre til at kontaktflaten mellom rørvegg og væsken vil reduseres. Dermed må det utarbeides en likning for hvordan varmeledningen vil forandre seg. Denne likningen vil være avhengig av mange faktorer som tverrsnittsarealet til røret, temperatur differanser etc. Dette har vært hovedutfordringen ved beregningene, at det er for mange ukjente faktorer. Dermed anbefales det å kontakte regassifiseringsbransjen om mulig utviklet programvarer for dimensjonering av fordampere.

En annen mulighet er å gjøre beregningene med ett mellommedium. Dette vil være å lage et fiktivt medium som er en blanding av mediet i gass og væske fasen. Dermed benytte dette mediet og utvikle mer nøyaktige beregningsmetoder for Nusselts og Reynolds tall. Dette vil kunne gi bedre estimater ved håndberegning.

En tredje mulighet er å gjennomføre tester empirisk for å skaffe data til dimensjonering.

Det er i oppgaven fokusert på beregning og dimensjonering av rørvarmeveksler, dette skyldes at platevarmevekslere er noe mer komplekse å beregne og de er mer sensitive for begroing og trykk. For anlegget vil en platevarmeveksler være mer kompakt og gi en høyere effektivitet

enn en rørvarmeveksler. En platevarmeveksler kan lettere bygges ut og tilpasses en varierende produksjon. Derfor anbefales det ved videre utvikling også å teste et slikt system.

For innløser systemet er det valg å benytte en mikroboble diffusor. Boblestørrelsen vil påvirke stigningshastigheten og absorpsjonshastigheten til boblene. Større bobler vil ha mindre totalt overflate areal og stige raskere, dette gir en dårligere absorpsjonseffekt og større tap til luft. Derfor er diffusoren plassert på 16 m dyp for å gi en god effektivitet, men ved bruk av mikrobobler er det vanskelig å regulere hvilke vannmasser som blir oksygenert.

I motsetning til mikrobobler vil nanobobler ha mindre oppdrift og stige saktere i vann. Ved diffusor på ulike dyp vil det være lettere å oksygenere de områdene som er under mettet. Vannet vil ikke trekke til seg oksygen hvis det er 100% mettet og ingen forandring i trykket. Dermed kan nanoboblene trolig holdes lagret i vannet. Dette er en metode som kan benyttes når det er behov for høy kapasitet, for eksempel ved rask algeoppblomstring. Det kan genereres bobler som lagres i vannmassene. Når oksygendropp oppstår vil de lagrede boblene absorberes og metningsgraden holdes oppe.

Teorien om nanobobler er svært spennende. Fremtids muligheter kan være at ulike kjemikalier kan bygges inn i boblene slik at behandling kan gis uten at laksen må trenes sammen eller flyttes. Dette kan muligens forhindre stress og føre til mindre tap av fisk ved for eksempel luse behandling. Det er forskjellige meninger om hvor lenge nanobobler vil kunne ligge lagret i vannet. Dette er en ny forskning som har behov for videre undersøkelser.

## 8. Konklusjon

Hovedmålet med oppgaven var å dimensjonere et kompakt oksygeneringssystem for delvis lukkede merder. For beregningene av oksygenforbruket til laks er det sett bort fra påvirkninger fra ytre faktorer. Det er beregnet at en stående biomasse tilsvarende 1 MTB (angitt som 780 000 individer på 1 kg i denne oppgaven) vil konsumere 184,78 kgO<sub>2</sub>/time. Forbruket er satt som et mål på kapasiteten til oksygeneringssystemet. Beregningene i oppgaven har fokus på beregning av fordampere. Det er valgt å benytte en IFV. Det gjøres beregninger for varmeledning i en rørvarmeveksler for å finne den antatte størrelsen. En begrensning i beregningene er at det ses bort fra tofase situasjoner. Dette vil påvirke størrelsen til fordampningssystemet. Det er sett på andre fordampere og anslått en størrelse på 4 m<sup>3</sup>. Det anbefales videre å gjøre empiriske tester av fordampere. Det er i anlegget ikke tatt hensyn til tilførsel og tap av oksygen fra miljøfaktorer, dette vil antagelig redusere oksygenbehovet. Gjennom arbeidet med denne oppgaven anbefales det å gjøre tester med oksygenering i delvis lukkede merder.

### ***Videre arbeid:***

Arbeid som anbefales å jobbe videre med:

- Empiriske forsøk av fordampere.
- Tester på reelt forbruk av oksygen i merder.
- Det anbefales å kontakte LNG bransjen om utviklete dataprogrammer.
- Det anbefales å se på muligheten for benyttelse av nanoboble teknologi.

## Referanser

- AADLAND, C. 2015. *Alt du trenger å vite om lakselus* [Online]. sysla.no. Available: <http://sysla.no/fisk/alt-du-trenger-a-vite-om-lakselus/> [Accessed 11.05 2017].
- AKVAGROUP. 2016. *Plastmerder* [Online]. akvagroup.com. Available: <http://www.akvagroup.com/Products/Cage%20farming%20aquaculture%20products/Plastic%20Cages/Cage%20models/cage-models-diagram.jpg?w=1280&upscale=false> [Accessed].
- AUDUN, I., HERMANSEN, Ø., ANDREASSEN, O. N. A., BRANDVIK, R. K., MARTHINUSSEN, A. & NYSTØYL, R. K. A. A. 2015. *Kostnadsdrivere i lakseoppdrett* [Online]. Kontali.no: Nofima. Available: [http://www.kontali.no/%5Cpublic\\_files%5Cdocs%5CRapport\\_nr\\_41-2015\\_-\\_Kostnadsdrivere\\_i\\_lakseoppdrett.pdf](http://www.kontali.no/%5Cpublic_files%5Cdocs%5CRapport_nr_41-2015_-_Kostnadsdrivere_i_lakseoppdrett.pdf) [Accessed 01.02.2017 2017].
- B GRISDALE-HELLAND, B. R., G ROSENLUND, A OBACH, S.J HELLAND, M.G SANDBERG, H STANDAL, C RØSJØ 2002. Influence of high contents of dietary soybean oil on growth, feed utilization, tissue fatty acid composition, heart histology and standard oxygen consumption of Atlantic salmon (*Salmo salar*) raised at two temperatures. 325.
- BERG, A., DANIELSBERG, A., SELAND, A. & SIGHOLT, T. 1993. *Fish farming technology*, google books.
- BERGE, A. 2014. *Pionérene: Ove og Sivert Grøntvedt* [Online]. iLaks. Available: <http://ilaks.no/pionerene-ove-og-sivert-grontvedt/> [Accessed].
- BØHLE, J. E. Ø. O. K. 2013. *Osmoregulering hos vannlevende dyr* [Online]. ndla.no: ndla. Available: <http://ndla.no/nb/node/126029?fag=52234> [Accessed 09.05 2017].
- CALANUS 2013. Luseskjørt. *Fluidpermeabelt beskyttelsesnett mot påslag av lakselus og begroing av oppdrettsnøter*. lusedata.no.
- CHAPLIN, M. 2017. nanobubbles (ultrafine bubbles).
- CHEMICAL ENGINEERING, U. O. M. Steam Stripping Columns General Information. [https://lh3.googleusercontent.com/ZFVngEbogehKQu1tA0C95QpA6y6ah\\_iNWLELkLt\\_zrb1syYILArtPwH35GOwaUaoIrmznnxYLhFqiAUXfYeJT8dWI2TycGXcVuAgW6RJV\\_cx936YECeLVERLYxEzgIlmIDflXu\\_2IQ](https://lh3.googleusercontent.com/ZFVngEbogehKQu1tA0C95QpA6y6ah_iNWLELkLt_zrb1syYILArtPwH35GOwaUaoIrmznnxYLhFqiAUXfYeJT8dWI2TycGXcVuAgW6RJV_cx936YECeLVERLYxEzgIlmIDflXu_2IQ).
- EGERSUNDGROUP 2017. Notposer til fiskeoppdrett. <http://www.egersundgroup.no/Produkter/RT-1.jpg?w=604&h=0&bg=ffffff>. Egersund Group.
- ENVIRONMENTAL, A. Scrubber Tower Packing & Accessories. <https://static1.squarespace.com/static/534128c3e4b063017f7afdd3/5355271ce4b0ae193f8acee2/5355271de4b0ae193f8acee4/1398090596842/?format=750w>.
- ERVIK, A. F. O., GEIR LASSE TARANGER, KARIN KROON BOXASPEN, TOM HANSEN, ØYSTEIN SKAALA. 2008. *Lakseoppdrett* [Online]. <http://www.imr.no/temasider/akvakultur/lakseoppdrett/nb-no>: Havforskningsinstituttet, institute if marine research. Available: <http://www.imr.no/temasider/akvakultur/lakseoppdrett/nb-no> [Accessed 25.04 2014].
- FERGUSON DNV 2.7-1 Offshore 10ft Cryogenic Tanks. [http://perfectionservicesltd.com/perfectionservices/wp-content/uploads/2016/07/10ft\\_Cryogenic\\_Tank\\_DIMS.jpg](http://perfectionservicesltd.com/perfectionservices/wp-content/uploads/2016/07/10ft_Cryogenic_Tank_DIMS.jpg). <http://www.perfectionservicesltd.com>.
- FRANK, K. & LIEN, A. M. 2015. Permaskjørt og merdmiljø. <https://www.sintef.no/en/publications/publication/?pubid=SINTEF+A26686>.

- GGN 2017. The most important forms of aquaculture, net enclosures.  
<http://www.ggn.org/files/Media/AQUACULTURE/Methodes%20for%20Aquaculture/GGN.ORG%20Aquakultur%20Netzgehege.jpg>.
- GRØN, Ø. H. I. O. O. A. 2011. *brownske bevegelse* [Online]. Store Norske Leksikon. [Accessed 04.05.2017 2017].
- GRØNER, S. Nr. 13. Laks og temperatur - en litteraturgjennomgang. Suldalslågen - miljørapport Nr. 13, 15, 22.
- HOAR, W. S., RANDALL, D. J. & BRATT, J. R. 1979. *Fish physiology*,  
[https://www.academia.edu/699327/Fish\\_Physiology\\_1979\\_Vol\\_08\\_Bioenergetics\\_and\\_Growth](https://www.academia.edu/699327/Fish_Physiology_1979_Vol_08_Bioenergetics_and_Growth), Nguyen Thanh Vu.
- INDUSTIRES, C. TNV automatic direct steam vaporizers. In: INDUSTIRES, C. (ed.).
- IVERSEN, A., HERMANSEN, Ø., ANDREASSEN, O. N. A., BRANDVIK, R. K., MARTHINUSSEN, A. & NYSTØYL, R. K. A. A. 2015. *Kostnadsdrivere i lakseoppdrett* [Online]. Kontali.no: Nofima. Available:  
[http://www.kontali.no/%5Cpublic\\_files%5Cdocs%5CRapport\\_nr\\_41-2015\\_-\\_Kostnadsdrivere\\_i\\_lakseoppdrett.pdf](http://www.kontali.no/%5Cpublic_files%5Cdocs%5CRapport_nr_41-2015_-_Kostnadsdrivere_i_lakseoppdrett.pdf) [Accessed 01.02.2017 2017].
- KISHOR G. NAYAR, M. H. S. O. J. H. L. V. 2016. Seawater thermophysical properties library. In: KISHOR G. NAYAR, M. H. S. O. J. H. L. V. (ed.).
- KOBELCO IFV (Intermediate Fluid Vaporizer).  
[http://www.kobelco.co.jp/english/products/ecmachinery/lng/img/ifv\\_02.jpg](http://www.kobelco.co.jp/english/products/ecmachinery/lng/img/ifv_02.jpg).  
 kobelco.co: kobelco.
- KOSUKE, E., SHI, K., HIRAO, M., HASHIMOTO, J., KAWATO, Y., KANESHIRO, S., MORIMOTO, T., KOIZUMI, K. & YOSHIKAWA, H. 2013. Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the Growth of Plants, Fishes, and Mice.
- KREBS, M. M. 2010. Offshore Gas Cylinder Rack 3D CAD Model. 3D CAD Browser: Mette Marie Krebs.
- LAKS.NO. *Arnes lunsjprat* [Online]. laks.no/lakseeventyret: laks.no. Available:  
<http://laks.no/lakseeventyret/> [Accessed].
- LAVAL, A. Platevarmeveksler.  
<http://www.alfalaval.us/globalassets/images/local/usa/gphe/gphe-parts-illustration.jpg>. <http://www.alfalaval.us/microsites/gphe/tools/how-gphes-work/>.
- LEKANG, O. I. 2007. Aquaculture Engineering.  
[https://cesarom.files.wordpress.com/2013/08/aquaculture-engineering\\_copia.pdf](https://cesarom.files.wordpress.com/2013/08/aquaculture-engineering_copia.pdf).
- LEKANG, O. I. 2013a. *Kompendium (under utarbeidelse) til kurset FYS 251, Varmeoverføring og energi*, Utgitt under FYS 251, Varmeoverføring og energi.
- LEKANG, O. I. 2013b. *Øvelsesheftet for kurset varmeoverføring og energi - FYS 251*.
- LEVINE, K. 1999. Freezing point of sea water.
- LINDE, A. 2012. cryogenic standard tanks LITS 2.
- LOVDATA. 14.6.1985. *Lov om endring i lov 14. juni 1985 nr. 68 om oppdrett av fisk, skaldyr m.v. (vederlag ved tildeling av konsesjoner for matfiskoppdrett av laks og ørret)*. [Online]. <https://lovdata.no/dokument/LTI/lov/2001-06-15-50>: lovdata. Available: <https://lovdata.no/dokument/LTI/lov/2001-06-15-50> [Accessed].
- MARTIN STEINHOLT, M. T., EMIL H. INDSETVIKEN. 2015. *Fire klimautfordringer oppdrettsnæringa kan stå overfor* [Online]. nrk.no. Available:  
<https://www.nrk.no/nordland/fire-klimautfordringer-oppdrettsnaeringa-kan-sta-overfor-1.12674719> [Accessed 25.04 2017].
- MATHISEN, R. 2013. *PID-regulator* [Online]. <http://ndla.no/nb/node/115681?fag=35>: ndla. Available: <http://ndla.no/nb/node/115681?fag=35> [Accessed 25.04 2017].
- MILJØMERKING. 2012. *Algeoppblomstring* [Online].  
<http://www.svanemerket.no/miljo/kjemikalier/algeoppblomstring/>: Svanemerket.

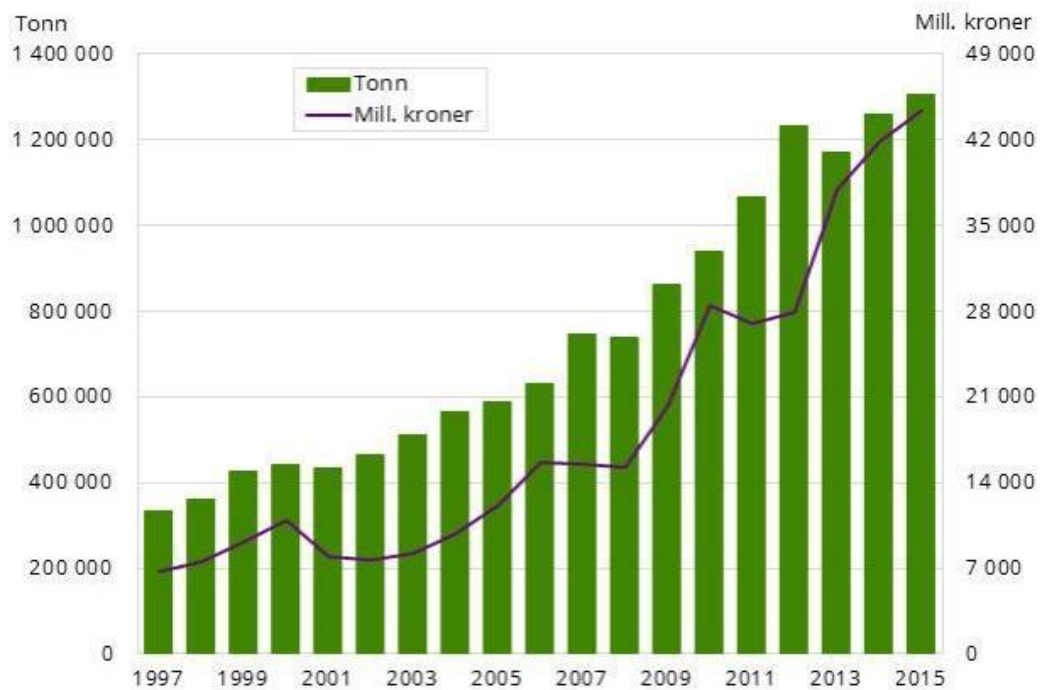
- Available: <http://www.svanemerket.no/miljo/kjemikalier/algeoppblomstring/> [Accessed 08.04.2017].
- MYRSET, O. 2015. Dette må du vite om oppdrettsanlegg på land. sysla.no/fisk: sysla.no.
- NDLA Varmevekslere. <http://cdn-a.ndlap3.seria.net/sites/default/files/imagecache/Fullbredde/images/straight-tube-heat-exchanger-1-pass.png>. <http://ndla.no/nb/node/123365?fag=35>.
- NODLAND, E. 2016. *Beregning på fem milliarder i lusekostnader er bare deler av sannheten* [Online]. ilaks.no. Available: <http://ilaks.no/beregninger-pa-fem-milliarder-i-lusekostnader-er-bare-deler-av-sannheten/> [Accessed 08.05 2017].
- NODLAND, E. 2017. Ønsker raskere utvikling av lukket teknologi: -Hovedkonseptene og ideene er der. *iLaks*. ilaks.no: iLaks.
- NORGE, L. N. S. S. 2016. *NORSK HAVBRUKSHISTORIE* [Online]. Available: <https://laksefakta.no/> [Accessed].
- ODESIE Combined Heat Transfer. <https://www.myodesie.com/images/wiki/2/boilingtransfer28.png>. myodesie.com.
- ODESIE Overall Heat Transfer Coefficient. <https://www.myodesie.com/images/wiki/2/boilingtransfer26.png>. myodesie.com: Odesie.
- OLSEN, M. L. 2013. *Vannkvalitet ved slakting*. masteroppgave 60 stp., Universitet for miljø- og biovitenskap.
- ORMESTAD, H. 2009. Varmeledning. Store Norske Leksikon.
- OSAKA, G. ukjent. Cryogenic power generator. [https://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/\\_icsFiles/afieldfile/2012/10/03/img01\\_7.jpg](https://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/_icsFiles/afieldfile/2012/10/03/img01_7.jpg).
- PATEL, D., MAK, J., RIVERA, D. & ANGTUACO, J. 2013. LNG vaporizer selection based on site ambient conditions. *Proceedings of the LNG*, 17, 16-19.
- PENTAIR Sea Pen Aeration System (SPA).
- PENTAIR 2016. Sea pen aeration solutions (SPA). In: PENTAIR (ed.).
- PORTZ, D. E., WOODLEY, C. M. & CECH, J. J. 2006. Stress-associated impacts of short-term holding on fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 16, 125-170.
- PRAXAIR, T. 2016a. Gass til fiskeoppdrett. Praxair.no: Praxair.
- PRAXAIR, T. 2016b. Oksygen til sjøs. Praxair.no: Praxair.
- PRAXAIR, Y. 2012. Tabell for O<sub>2</sub>-metning i vann. In: VANN, T. O.-L. I. (ed.). <http://lusedata.no/wp-content/uploads/2012/06/Tabell-O2-1%C3%B8selighet-i-vann.pdf>.
- PRAXIAR, T. 2016. Installasjon og drift av leveringssystem for flytende gass. ikke publisert.
- PRODUCTS, T. *About Liquid Oxygen* [Online]. <https://technifab.com/cryogenic-resource-library/cryogenic-fluids/liquid-oxygen/>. Available: <https://technifab.com/cryogenic-resource-library/cryogenic-fluids/liquid-oxygen/> [Accessed 22.04.2017 2017].
- R. AGARWAL, L. R. T. E. A. C. E. U., QUEENSLAND UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, AUSTRALIA. Submerged combustion vaporizers configuration. <http://www.oil-gasportal.com/wp-content/uploads/2016/02/submerged.jpg>. [http://www.oil-gasportal.com/lng-rd-for-the-liquefaction-and-regasification-processes/#\\_ftn13](http://www.oil-gasportal.com/lng-rd-for-the-liquefaction-and-regasification-processes/#_ftn13): Marcello De Falco, Associate Professor, University UCBM – Rome (Italy).
- REGJERINGEN 2009. Økologisk akvakultur. Regjeringen.no.
- REMEN, M., OPPEDAL, F., STIEN, L. H., TORGERSEN, T. & OLSEN, R. E. 2013. Får oppdrettslaks nok oksygen 4-10.

- REMEN, M., SIEVERS, M., TORGERSEN, T. & OPPEDAL, F. 2016. The oxygen threshold for maximal feed intake of Atlantic salmon post-smolts is highly temperature-dependent. *Aquaculture*, 464, 582-592.
- REYNOLDS, W. C. Thermodynamic Properties in SI  
<http://i20.photobucket.com/albums/b224/Unxious/other/R290-phlog.png>.  
<http://www.xtremesystems.org>.
- RUTH, G., GEIR, E., ERIK, H. & BJØRNAR, E. 1992. *Oppdrettsteknologi Vannkvalitet og vannbehandling i lukkede oppdrettsanlegg*, TAPIR.
- SEAFOOD, E. 2017. *Laksens livssyklus* [Online]. erkoseafood.no: erko seafood. Available: <http://erkoseafood.no/laks/> [Accessed 25.04 2017].
- SENTRALBYRÅ, S. 2016. *Akvakultur, 2015, endelige tall* [Online]. ssb.no/fiskeoppdrett: statistisk sentralbyrå. Available: <https://www.ssb.no/fiskeoppdrett> [Accessed 01.02.2017 2017].
- SNIGDHA KHUNTIA, S. K. M. A. P. G. 2012. microbubble - aided water and wastewater purification.  
[https://www.researchgate.net/profile/Subrata\\_Majumder2/publication/270483031/figure/fig2/AS:392172047224838@1470512510768/Figure-6-Microbubble-generators-A-spiral-liquid-flow-B-venturi-C-ejector-and.png](https://www.researchgate.net/profile/Subrata_Majumder2/publication/270483031/figure/fig2/AS:392172047224838@1470512510768/Figure-6-Microbubble-generators-A-spiral-liquid-flow-B-venturi-C-ejector-and.png). ResearchGate.
- STATKRAFT 2017. Forskning og overvåkning - resultater.  
<http://www.statkraft.no/globalassets/1-statkraft-public/images/research-results-of-hydro-powers-effects-on-salmon.jpg>. statkraft.no: statkraft.
- SVÅSAND, T. 2009. *Lakselus* [Online]. Havforskningsinstituttet. Available: <http://www.imr.no/temasider/parasitter/lus/lakselus/nb-no> [Accessed 08.04 2017].
- SYRSTAD, O. 2009. *Harald Skjervold* [Online]. Norsk Biografisk Leksikon. Available: [https://nbl.snl.no/Harald\\_Skjervold](https://nbl.snl.no/Harald_Skjervold) [Accessed 25.04 2017].
- SØRENSEN, B. R. Varmevekslere, teoretisk grunnlag.  
<http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/tdyn/docs/vv/image22.jpg>. hin.no.
- THERMAX, I. 2010. Cold water Cryogenic Vaporizer.
- THONHAUGEN, M. 2016. Disse prosjektene kan revolusjonere oppdrettsnæringa. nrk.no: NRK.
- THRONDSEN, J. 2015. *Alger* [Online]. snl.no: snl. Available: <https://snl.no/alger> [Accessed 03.02 2017].
- TOOLBOX, T.-E. Sea Water Properties.
- TOOLBOX, T. E. Oxygen. engineeringtoolbox.com: The Engineering ToolBox.
- TOOLBOX, T. E. Propane. The Engineering Toolbox.
- TROND ROSTEN, Å. Å., TORSTEIN KRISTENSEN, BJØRN OLAV ROSSELAND, BJØRN BRAATHEN 2004. Vannkvalitet og dyrevelferd.
- TROØYEN, J. Varmeveksler. In: MEDSTRØMS (ed.) [http://2.bp.blogspot.com/-3DOUgmWe4MQ/VT0JFzyVZwI/AAAAAAAAABw/Hhz1\\_bPS20s/s1600/Varmeveksler%2Bmedstr%C3%B8ms.png](http://2.bp.blogspot.com/-3DOUgmWe4MQ/VT0JFzyVZwI/AAAAAAAAABw/Hhz1_bPS20s/s1600/Varmeveksler%2Bmedstr%C3%B8ms.png). <http://taf14-trooyen.blogspot.no/2015/04/varmevekslere.html>: Jørgen Troøyen.
- UKJENT Submerged combustion vaporizers configuration. <http://www.oil-gasportal.com/wp-content/uploads/2016/02/submerged.jpg>. [http://www.oil-gasportal.com/lng-rd-for-the-liquefaction-and-regasification-processes/#\\_ftn11](http://www.oil-gasportal.com/lng-rd-for-the-liquefaction-and-regasification-processes/#_ftn11): Marcello De Falco, Associate Professor, University UCBM – Rome (Italy).
- ØKSNEVAD, K. 2010. *Estimering av varmeveksler*. Master, University of Stavanger.

## 9. Vedlegg

Akvakultur					
	Matfisk (tonn)	Andel	Prosent	Førstehandsverdi	Prosent
			2014 - 2015	(Millioner kr)	2014 - 2015
<b>2015</b>					
I alt	1 380 841	100,0	3,6	46 864	5,7
Laks	1 303 346	94,4	3,6	44 439	6,3
Regnbueørret	73 007	5,3	5,8	2 221	-3,6
Røye	260	0,0	:	16	:
Torsk	:	:	:	:	:
Kveite	1 244	0,1	-1,0	143	25,1
Skalldyr	2 773	0,2	37,5	29	103,2
Andre fiskearter	:	:	:	:	:

Figur 46: Produksjonsmengde akvakultur (sentralbyrå, 2016).

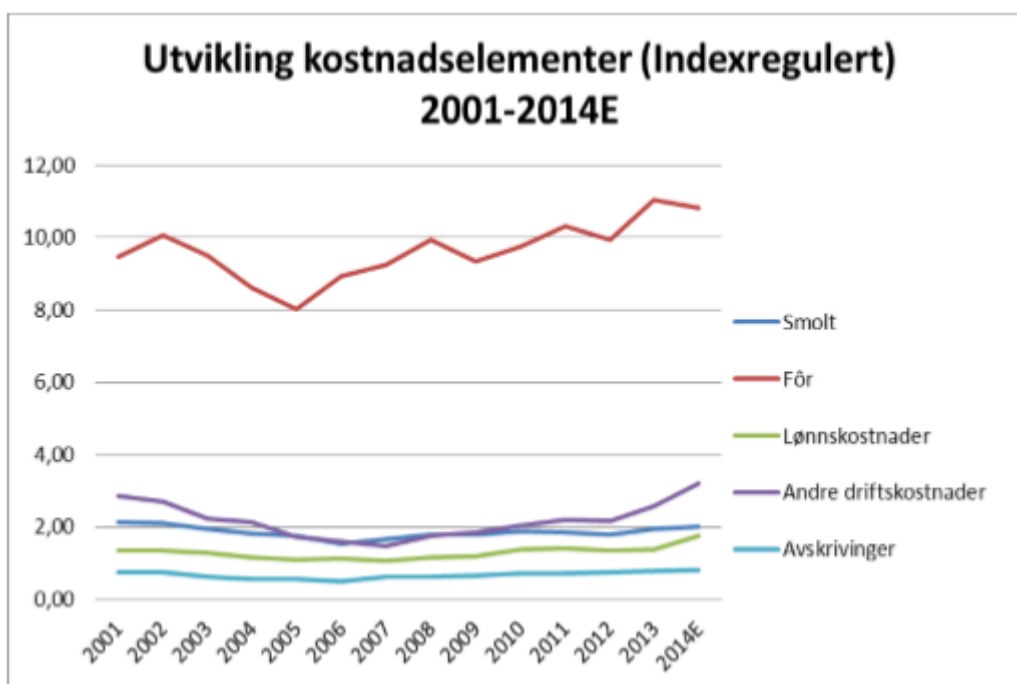


Figur 47: Solgt mengde og førstehandsverdi av laks (sentralbyrå, 2016).





Figur 48: Utvikling i produksjonskostnader fra 2001-2014 (Iversen et al., 2015).



Figur 49: Utviklingen av produksjonskostnader fra 2001-2014 (s.8 (Iversen et al., 2015))

Tabell 6:

Note 1: Kinematic viscosity  $n$  and thermal diffusivity  $a$  can be calculated from their definitions,  $n = \mu/\rho$  and  $a = k/mcp$ . The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressures with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Reiner Tillner-Roth, "Fundamental Equations of State," Shaker, Verlag, Aachen, 1998; B. A. Younglove and J. F. Ely, "Thermophysical Properties of Fluids. II Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane," J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 16, No. 4, 1987; G.R. Somayajulu, "A Generalized Equation for Surface Tension from the Triple-Point to the Critical Point," International Journal of Thermophysics, Vol. 9, No. 4, 1988. cen

**TABLE A-12**

Properties of saturated propane

Temp. <i>T</i> , °C	Saturation Pressure <i>P</i> , kPa	Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>		Enthalpy of Vaporization <i>h<sub>g</sub></i> , kJ/kg	Specific Heat <i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K		Thermal Conductivity <i>k</i> , W/m·K		Dynamic Viscosity $\mu$ , kg/m·s		Prandtl Number <i>Pr</i>		Volume Expansion Coefficient $\beta$ , 1/K	Surface Tension, N/m
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-120	0.4053	664.7	0.01408	498.3	2003	1115	0.1802	0.00589	6.136 × 10 <sup>-4</sup>	4.372 × 10 <sup>-6</sup>	6.820	0.827	0.00153	0.02630
-110	1.157	654.5	0.03776	489.3	2021	1148	0.1738	0.00645	5.054 × 10 <sup>-4</sup>	4.625 × 10 <sup>-6</sup>	5.878	0.822	0.00157	0.02486
-100	2.881	644.2	0.08872	480.4	2044	1183	0.1672	0.00705	4.252 × 10 <sup>-4</sup>	4.881 × 10 <sup>-6</sup>	5.195	0.819	0.00161	0.02344
-90	6.406	633.8	0.1870	471.5	2070	1221	0.1606	0.00769	3.635 × 10 <sup>-4</sup>	5.143 × 10 <sup>-6</sup>	4.686	0.817	0.00166	0.02202
-80	12.97	623.2	0.3602	462.4	2100	1263	0.1539	0.00836	3.149 × 10 <sup>-4</sup>	5.409 × 10 <sup>-6</sup>	4.297	0.817	0.00171	0.02062
-70	24.26	612.5	0.6439	453.1	2134	1308	0.1472	0.00908	2.755 × 10 <sup>-4</sup>	5.680 × 10 <sup>-6</sup>	3.994	0.818	0.00177	0.01923
-60	42.46	601.5	1.081	443.5	2173	1358	0.1407	0.00985	2.430 × 10 <sup>-4</sup>	5.956 × 10 <sup>-6</sup>	3.755	0.821	0.00184	0.01785
-50	70.24	590.3	1.724	433.6	2217	1412	0.1343	0.01067	2.158 × 10 <sup>-4</sup>	6.239 × 10 <sup>-6</sup>	3.563	0.825	0.00192	0.01649
-40	110.7	578.8	2.629	423.1	2258	1471	0.1281	0.01155	1.926 × 10 <sup>-4</sup>	6.529 × 10 <sup>-6</sup>	3.395	0.831	0.00201	0.01515
-30	167.3	567.0	3.864	412.1	2310	1535	0.1221	0.01250	1.726 × 10 <sup>-4</sup>	6.827 × 10 <sup>-6</sup>	3.266	0.839	0.00213	0.01382
-20	243.8	554.7	5.503	400.3	2368	1605	0.1163	0.01351	1.551 × 10 <sup>-4</sup>	7.136 × 10 <sup>-6</sup>	3.158	0.848	0.00226	0.01251
-10	344.4	542.0	7.635	387.8	2433	1682	0.1107	0.01459	1.397 × 10 <sup>-4</sup>	7.457 × 10 <sup>-6</sup>	3.069	0.860	0.00242	0.01122
0	473.3	528.7	10.36	374.2	2507	1768	0.1054	0.01576	1.259 × 10 <sup>-4</sup>	7.794 × 10 <sup>-6</sup>	<b>2.996</b>	0.875	0.00262	0.00996
5	549.8	521.8	11.99	367.0	2547	1814	0.1028	0.01637	1.195 × 10 <sup>-4</sup>	7.970 × 10 <sup>-6</sup>	2.964	0.883	0.00273	0.00934
10	635.1	514.7	13.81	359.5	2590	1864	0.1002	0.01701	1.135 × 10 <sup>-4</sup>	8.151 × 10 <sup>-6</sup>	2.935	0.893	0.00286	0.00872
15	729.8	507.5	15.85	351.7	2637	1917	0.0977	0.01767	1.077 × 10 <sup>-4</sup>	8.339 × 10 <sup>-6</sup>	2.909	0.905	0.00301	0.00811
20	834.4	500.0	18.13	343.4	2688	1974	0.0952	0.01836	1.022 × 10 <sup>-4</sup>	8.534 × 10 <sup>-6</sup>	2.886	0.918	0.00318	0.00751
25	949.7	492.2	20.68	334.8	2742	2036	0.0928	0.01908	9.702 × 10 <sup>-5</sup>	8.738 × 10 <sup>-6</sup>	2.866	0.933	0.00337	0.00691
30	1076	484.2	23.53	325.8	2802	2104	0.0904	0.01982	9.197 × 10 <sup>-5</sup>	8.952 × 10 <sup>-6</sup>	2.850	0.950	0.00358	0.00633
35	1215	475.8	26.72	316.2	2869	2179	0.0881	0.02061	8.710 × 10 <sup>-5</sup>	9.178 × 10 <sup>-6</sup>	2.837	0.971	0.00384	0.00575
40	1366	467.1	30.29	306.1	2943	2264	0.0857	0.02142	8.240 × 10 <sup>-5</sup>	9.417 × 10 <sup>-6</sup>	2.828	0.995	0.00413	0.00518
45	1530	458.0	34.29	295.3	3026	2361	0.0834	0.02228	7.785 × 10 <sup>-5</sup>	9.674 × 10 <sup>-6</sup>	2.824	1.025	0.00448	0.00463
50	1708	448.5	38.79	283.9	3122	2473	0.0811	0.02319	7.343 × 10 <sup>-5</sup>	9.950 × 10 <sup>-6</sup>	2.826	1.061	0.00491	0.00408
60	2110	427.5	49.66	258.4	3283	2769	0.0765	0.02517	6.487 × 10 <sup>-5</sup>	1.058 × 10 <sup>-5</sup>	2.784	1.164	0.00609	0.00303
70	2580	403.2	64.02	228.0	3595	3241	0.0717	0.02746	5.649 × 10 <sup>-5</sup>	1.138 × 10 <sup>-5</sup>	2.834	1.343	0.00811	0.00204
80	3127	373.0	84.28	189.7	4501	4173	0.0663	0.03029	4.790 × 10 <sup>-5</sup>	1.249 × 10 <sup>-5</sup>	3.251	1.722	0.01248	0.00114
90	3769	329.1	118.6	133.2	6977	7239	0.0595	0.03441	3.807 × 10 <sup>-5</sup>	1.448 × 10 <sup>-5</sup>	4.465	3.047	0.02847	0.00037





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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway