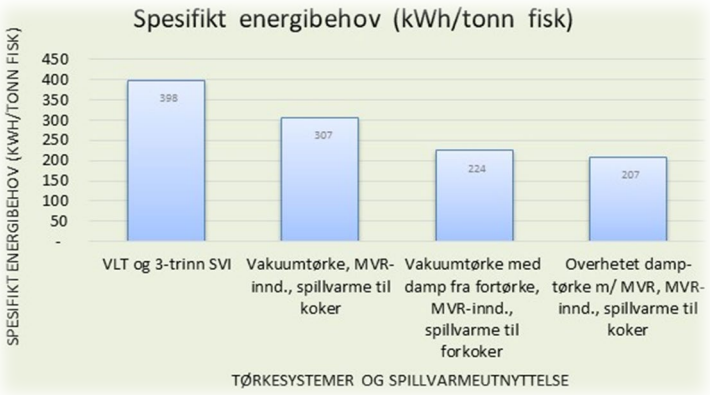
# Faglig sluttrapport
# Energieffektiv vannfjerningsteknologi for fremstilling av fiskemel av høy kvalitet

FHF-prosjekt 901900



# Faglig sluttrapport
# Energieffektiv vannfjerningsteknologi for fremstilling av fiskemel av høy kvalitet

FHF-prosjekt 901900

Ola Flesland[1], Alette Løbø Viken[2] og Tor Andreas Samuelsen[2]

[1]Pelagia, FEED Division, Bradbenken 1, 5003 Bergen

[2]Nofima, Ernæring og fôrteknologi, Postboks 1425 Oasen, NO-5844, Bergen.

Bergen, 26.06.2026

## Innhold

Forord ..... 3
1 Sammendrag ..... 4
2 Innledning ..... 4
2.1 Prosjektorganisering – samarbeidspartnere ..... 5
2.1.1 Prosjektgruppe: ..... 6
2.1.2 Referansegruppe ..... 6
3 Målsetting ..... 6
4 Prosjektgjennomføring – materialer og metoder ..... 7
4.1 Forstudium og valg av tekniske løsninger (AP1) ..... 7
4.1.1 Beskrivelse av valgte teknologier ..... 7
4.2 Pilot- og fullskalatester (AP2) ..... 9
4.3 Produktkvalitet og tekniske egenskaper (AP3) ..... 10
4.3.1 Metoder for fysiske egenskaper ..... 10
4.3.2 Metoder proteinfordøyelighet målt med ilder ..... 13
4.3.3 Kjemisk sammensetning ..... 14
4.4 Datagrunnlag for oppskalering (AP4) ..... 14
5 Resultater ..... 14
5.1 Energieffektivitet og miljøpåvirkning ..... 14
5.1.1 Energiberegninger ..... 15

5.1.2 Tørking av fiskemel med overhetet damp og relevans til BAT-krav ..... 17
5.2 Produktkvalitet ..... 17
5.2.1 Proteinfordøyelighet ..... 17
5.2.2 Kjemiske og tekniske egenskaper av et utvalg fiskemel ..... 20
5.3 Sammenligning med eksisterende teknologi ..... 29
5.4 Beslutningsgrunnlag for oppskalering ..... 29
6 Diskusjon og vurdering ..... 29
6.1 Kjemisk og teknisk produktkvalitet ..... 29
6.1.1 Bulktetthet ..... 29
6.1.2 Viskositet ..... 30
6.1.3 Flytegenskaper ..... 31
6.1.4 Cohesion index (CI) ..... 31
6.1.5 Flow stability (FI) ..... 32
6.1.6 Caking ..... 32
6.2 Proteinfordøyelighet som markør ..... 33
6.3 Miljø og energibruk ..... 33
6.4 Industriell implementering ..... 33
7 Hovedfunn ..... 33
8 Leveranser ..... 33
9 Konklusjoner og anbefalinger ..... 34
10 Referanser ..... 35
11 Vedlegg 1 ..... 37

# Forord

Prosjektet, som er av typen *Prosjekt i bedrift,* er delfinansiert av FHF. Utstyrsleverandørene Swedish Exergy AB, og Fjell Technology Group AS, har levert pilotanlegg og deltatt med installasjon og testkjøringer ved Pelagia Karmsund Fiskemel. Nofima har bidratt med kjemiske analyser og analyser av teknisk kvalitet som er relevant for fôrproduksjon, lagring og transport av fiskemel. Biologiske studier av proteinfordøyelighet, med mink og ilder, er gjennomført ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).

# 1 Sammendrag

Prosjektet har vist at tørketeknologiene pneumatisk tørking med overhetet damp og vakuumtørking har betydelig potensial for å redusere energiforbruk og klimagassutslipp i produksjon av høykvalitets fiskemel. Beregninger og tester viser at energibruken kan reduseres med rundt 50 %, særlig når teknologiene kombineres med effektiv utnyttelse av spillvarme, høytemperatur varmepumper og MVR-løsninger.

Samtidig viser resultatene at produktkvaliteten kan opprettholdes på nivå med dagens LT-mel. Proteinfordøyeligheten er bevart gjennom skånsomme tørkebetingelser, enten gjennom svært korte tørketider (overhetet damp) eller lav temperatur (vakuumtørking).

Begge teknologiene gir et mer fibrig produkt med lavere bulktetthet, noe som kan gi utfordringer knyttet til lagring og transport. Samtidig kan denne strukturen gi forbedrede egenskaper i ekstruderingsprosesser ved fôrproduksjon. Resultatene viser at slike egenskaper kan optimaliseres gjennom justering av prosessbetingelser eller ved etterfølgende pelletering.

Prosjektet gir grunnlag for industriell implementering. Vakuumtørking representerer kjent teknologi for fiskemelindustrien, om ikke som sluttørke, og bør være klar for implementering. Hurtig tørking med overhetet damp er industrialisert i annen industri, men foreløpig ikke i fiskemelindustrien, og anbefales derfor testet i større pilotskala for å dokumentere driftssikkerhet og produktkvalitet over tid, og med variasjon i råstoffegenskaper.

# 2 Innledning

Prosjektet *«Energieffektiv vannfjerningsteknologi for fremstilling av fiskemel av høy kvalitet»* (FHF-prosjekt nr. 901900) er et Prosjekt i Bedrift (PIB) initiert av Pelagia AS, med mål om å utvikle og teste alternative tørketeknologier som kan redusere energibruk og miljøbelastning ved produksjon av høykvalitets fiskemel. Prosjektet har vært gjennomført i samarbeid med teknologileverandørene Swedish Exergy AB og Fjell Technology Group AS, samt forskningsinstitusjonen Nofima AS.

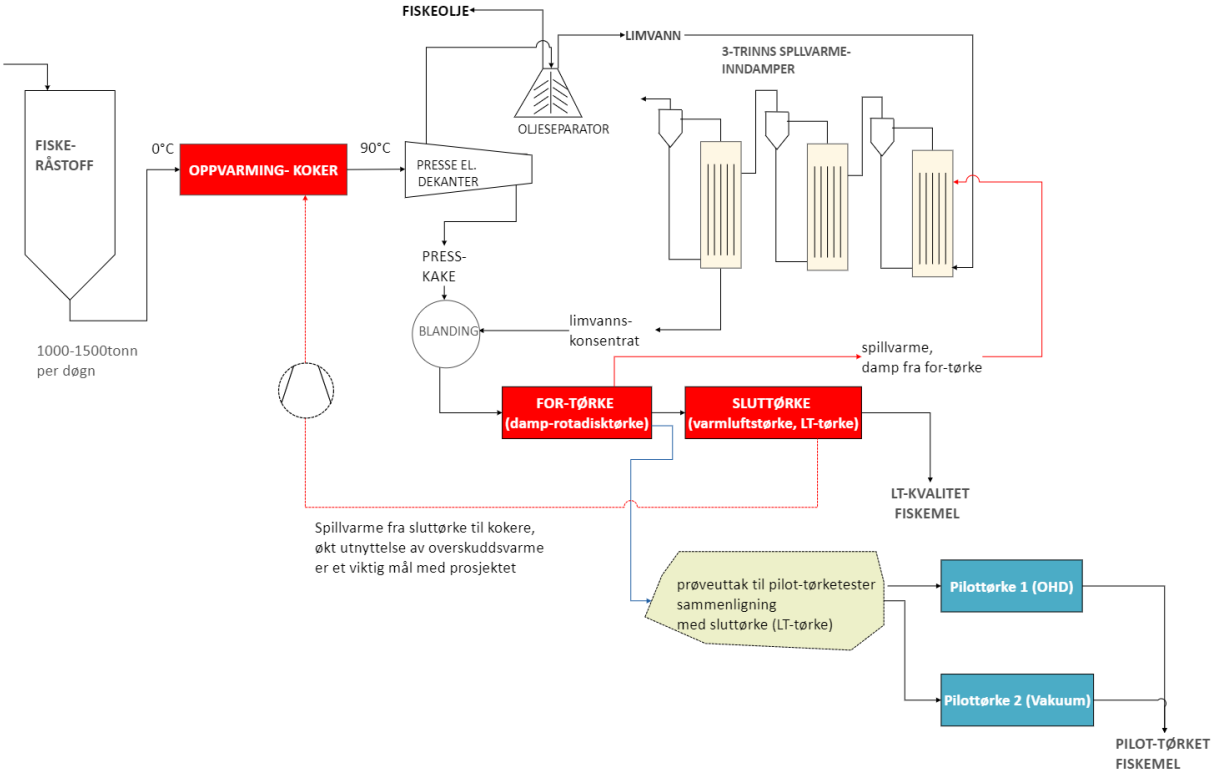
Bakgrunnen for prosjektet er et økende behov for mer bærekraftige produksjonsprosesser i fiskemelindustrien, der energiforbruk og utslipp av $CO_2$ og NOx er sentrale utfordringer. Samtidig er det avgjørende å bevare produktkvaliteten, spesielt med tanke på proteinfordøyelighet og fiskemelets tekniske egenskaper som påvirker videre bruk i fiskefôrproduksjon.

Prosjektet har hatt søkelys på testing av tørketeknologier basert på overhetet damp og vakuum, med mål om å dokumentere både energieffektivitet og produktkvalitet. Det er gjennomført pilotstudier ved en av Pelagias fabrikker, og resultatene er sammenlignet med dagens produksjon av LT-mel.

Figur 2.1 illustrerer en typisk fiskemelprosess med oppvarming av fiskeråstoff (koking), pressing og separering av olje, presskake og limvann. Limvannet dampes inn med spillvarmeinndamper, og blandes deretter med presskaken før blandingen tørkes til fiskemel i to trinn. Totrinns tørking er et kompromiss mellom energieffektivitet og produktkvalitet, hvor det siste tørketrinnet er såpass skånsomt at en kan minimere tap av proteinfordøyelighet og dermed oppnå den beste kvaliteten (LT-mel). Som også vist i

Figur 2.1, tar en ut fortørket mel og tester sluttørking med to typer pilottørker med mål om å finne frem til energieffektive erstatninger til dagens varmluftstørker. Varmluftstørkene (LT-tørker) kjøres parallelt med pilottestene, og en får da tatt ut referanseprøver fortløpende til sammenligning med prøvene fra pilottørkene.

Prosjektperioden har vært fra 01.01.2024 til 31.12.2025, og sluttrapporten oppsummerer gjennomføring, resultater, vurderinger og anbefalinger for videre implementering.




*Figur 2.1 Forenklet flytskjema for fiskemelprosess. Røde bokser indikerer de operasjonene som krever mest energitilførsel. Illustrerer også serietørking for bedre kvalitet og spillvarmeutnyttelse. I prosjektet undersøker en alternativer til sluttørke, for ytterligere utnyttelse av overskuddsvarme (spillvarme).*

## 2.1 Prosjektorganisering – samarbeidspartnere

Samarbeidspartnere: Pelagia AS, Swedish Exergy AB, Fjell Technology Group AS og Nofima AS

### 2.1.1 Prosjektgruppe:

| Bedrift | Navn | Stilling |
|---|---|---|
| Pelagia AS | Ola Flesland, Prosjektleder | Senior Innovation Manager |
| | Bent Inge Ulseth | Technical Manager, Pelagia Egersund Sildoljefabrikk |
| | Tord Midtseter | Project Manager |
| | Arnt-Ove Blytt-Tøsdal Kolås | COO, Pleagia FEED |
| | Lars Helge Wold | Facatory Manager, Pelagia Karmsund Fiskemel |
| Nofima AS | Tor Andreas Samuelsen | Senior Scientist |
| | Alette Løbø Viken | Scientist |
| | Åge Oterhals | Senior Scientist |
| Swedish Exergy AB | Prem Verma | CEO |
| | Maria Fransson | Sales Manager |
| | Manish Verma | Business Development Director |
| | Jonas Nyström | Project Manager |
| | Sune Hilbert | Processingeniør |
| Fjell Technology AS | Asbjørn Strand | CTO |
| | Halvard Madsen | CEO |

### 2.1.2 Referansegruppe

- Rasmus Simensen, Business Developer, Pelagia FEED
- Lars Helge Wold, Plant Manager, Pelagia Karmsund Fiskemel,
- Souhila Dif, HSEQ Manager, Pelagia Feed
- Bent Inge Ulseth, Technical Manager, Pelagia Egersund Sildolje
- Lars R. Lovund, FHF**,** Fagsjef Pelagisk industri og havbruk

# 3 Målsetting

Prosjektets overordnede mål har vært å utvikle og teste nye eller eksisterende tørketeknologier for mer energieffektiv og miljøvennlig produksjon av høykvalitets fiskemel fra pelagisk råstoff. Dette innebærer å redusere energibruk, $CO_2$-avtrykk og NOx-utslipp, samtidig som produktkvaliteten opprettholdes eller forbedres.

**Delmål:**

- Delmål1: Kartlegging og forstudium av eksisterende metoder for vannfjerning og tørking
- Delmål 2: Valg av teknologiske løsninger for pilotstudier, målinger og analyser
- Delmål 3: Optimalisering av prosessparametere for produktkvalitet og energieffektivitet gjennom fysiske tester
- Delmål 4: Dokumentasjon av miljøeffekter, inkludert redusert $CO_2$-avtrykk, NOx-utslipp og energiforbruk sammenlignet med dagens teknologi. Dette videreføres i nytt FHF-prosjekt
- Delmål 5: Beregning av produksjonskapasitet ved bruk av ny teknologi
- Delmål 6: Dokumentasjon av produktkvalitet, med søkelys på proteinfordøyelighet og tekniske egenskaper tilpasset lagring, transport og fôrproduksjon
- Delmål 7: Utvikling av beslutningsgrunnlag for oppskalering og industriell implementering.

# 4 Prosjektgjennomføring – materialer og metoder

Prosjektet har vært organisert i fire arbeidspakker (AP1–AP4), og gjennomført i samarbeid mellom Pelagia, teknologileverandørene Swedish Exergy AB og Fjell Technology Group AS, samt FoU-partneren Nofima.

Prosjektets omfang har blitt noe endret på grunn av uforutsette hendelser som transportskader på pilotanlegg, og variable sesonger for fiskeri, som man er avhengig av for å kunne fremstille relevant prøvemateriale til pilottørkene.

På tross av dette har en lykkes med å få frem et datagrunnlag som er relevant for å kunne vurdere oppskalering til industrielle anvendelser.

## 4.1 Forstudium og valg av tekniske løsninger (AP1)

I denne fasen ble dagens produksjonsprosesser kartlagt, og potensialet for energireduksjon og forbedret spillvarmeutnyttelse identifisert. Kunnskapsstatus for tørking av marint råstoff med overhetet damp er beskrevet i rapport fra et tidligere FHF-støttet prosjekt, i Samuelsen et al. (2015). Valg av tørketeknologi for fremstilling av fiskemel med hensyn til produktkvalitet og energieffektivitet er tidligere diskutert av Flesland et al. (2000). Høstmark et al. (2002) viste at ved hurtig tørking av fiskemel med overhetet damp i mølletørke, kunne proteinkvaliteten bevares på tross av høyere produkttemperatur enn ved varmluftstørking. Tørketiden i mølletørke er meget kort, omkring 5-10 sekunder, og dette gjorde at en kunne bruke inngående damptemperaturer på omkring 250$^{o}$C og allikevel unngå tap av proteinfordøyelighet. Proteinfordøyelighet målt med mink, ble brukt som markør for varmebelastning på proteinet, og sammenlignet med LT-kvalitet fiskemel.

Indirekte oppvarmede rotadisktørker som opereres med et visst undertrykk i tørkekammeret, er også vist å kunne fremstille LT-kvalitet (Nygård et al. (1988)). I dette prosjektet ser en etter energieffektive erstatninger for varmluftstørker, med rotadisktørker som fortørker. Fjell Technology Group har patentert en energieffektiv fiskemelproduksjon, hvor vakuumtørke som sluttørke er en sentral del.

Basert på tidligere erfaringer og forprosjekter ble to tørketeknologier valgt for videre testing:

- Pneumatisk tørke med overhetet damp (Swedish Exergy)
- Vakuum disktørke (Fjell Technology Group)

Det ble planlagt tilpasninger og installasjon av pilotanlegg ved en av Pelagias fiskemelfabrikker.

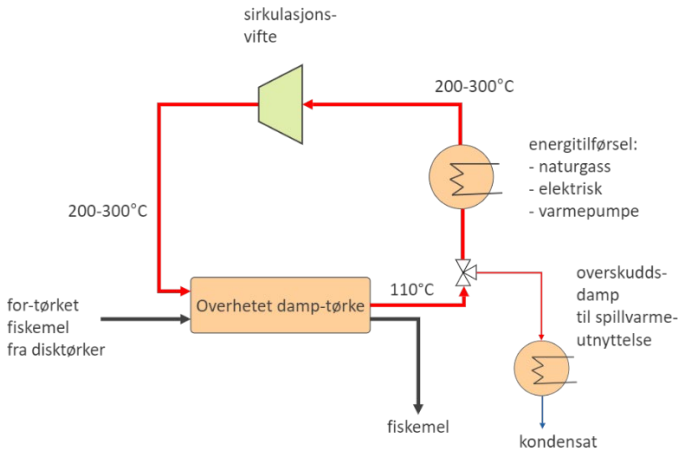
### 4.1.1 Beskrivelse av valgte teknologier

Pneumatisk tørke med overhetet damp er valgt på grunn av at det er en robust teknologi for storskala produksjon, og den korte tørketiden (ca. 20 sekunder), som kan sammenlignes med det en oppnår i mølletørker. Vakuumtørke ble valgt fordi en ønsket å få denne verifisert som sluttørke, særlig med hensyn til produktkvalitet.

#### *4.1.1.1 Overhetet damptørke*

Kunnskapsstatus for tørking av marint råstoff med overhetet damp er beskrevet i rapport fra et tidligere FHF-støttet prosjekt, i Samuelsen et.al. (2015). Tørketeknologien er illustrert skjematisk i Figur 4.1

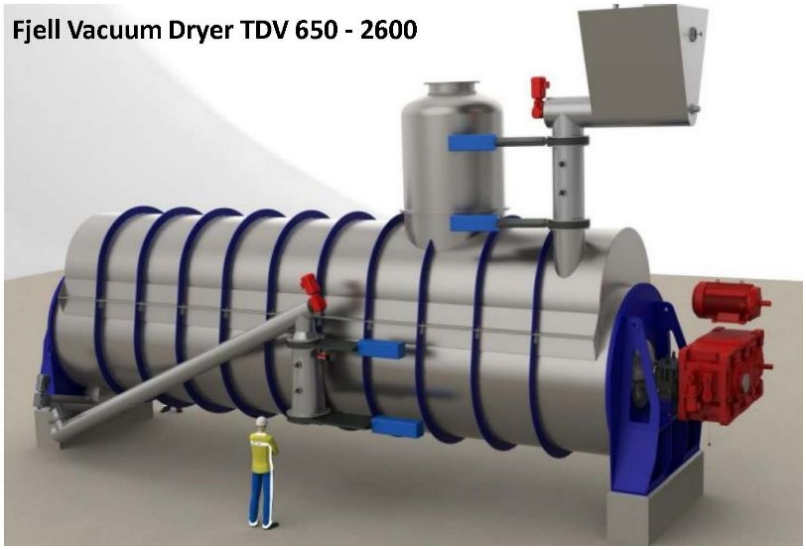
Dampen som er overhetet, sirkuleres med vifter og fungerer som en tørkegass. Oppvarming skjer via varmevekslere, og varmekilde vil være naturgass eller elektrisk. MVR-løsninger er også aktuelle, dvs. at en komprimerer overskuddsdampen med hjelp av dampkompressorer.




*Figur 4.1 Prinsippskisse for tørke med overhetet damp.*

### *4.1.1.2 Vakuumtørke*

I prosjektet har en studert vakuumtørke fra Fjell Technology Group, som består av en rotadisktørke indirekte oppvarmet med damp, og hvor trykket i tørken vil være omkring 0,3 bar absolutt trykk. Fordampningstemperaturen er da 70$^{o}$C og det gir en mer skånsom tørking enn ved atmosfærisk trykk i tørken, og det er mulig å bevare proteinkvaliteten (fordøyelighet) tilsvarende det en oppnår ved dagens varmluftstørker. Vakuumtørke er illustrert i Figur 4.2. Fjell Technology har vist at en kan redusere energibehovet til en fiskemelproduksjon med omkring 50% sammenlignet med tradisjonell LT-produksjon. Det forutsetter et oppsett med atmosfærisk disktørke som fortørke og effektiv utnyttelse av spillvarme til drift av vakuumtørken og til drift av forkoker. Systemet er patentert av Fjell Technology Group.




*Figur 4.2 Illustrasjon av Fjell vakuumtørke*

## 4.2 Pilot- og fullskalatester (AP2)

Pilotanleggene ble installert ved Pelagias fabrikk i Karmsund. Testene ble gjennomført med kolmule, sild og brisling. I pilottestene har en analysert produktkvalitet, og vurdert driftssikkerhet og egnethet for tørking av fiskemel. Spillvarmeutnyttelse og energibruk er beregnet basert på teoretiske verdier, testresultater og tall fra produsentene. Parallelt ble det produsert LT-mel i fullskala med dagens teknologi, for sammenligning. To tørketeknologier ble testet under realistiske produksjonsforhold:

- Pneumatisk tørke med overhetet damp fra Swedish Exergy AB
- Vakuumdisktørke fra Fjell Technology Group AS

Begge teknologiene ble installert som pilotanlegg ved Pelagias fabrikker og testet med ulike typer pelagisk råstoff. Bilder av installasjon er vist i Figur 4.3 og Figur 4.4.

*Figur 4.3 Pilot vakuumtørke fra Fjell Technology Group, montert i Pelagias fiskemelfabrikk i Karmsund. Transportskruer er montert mellom fortørke i fiskemelfabrikken. En har satt søkelys på sluttørking av fortørket fiskemel, dvs. erstatning for dagens varmluftstørker (LT-tørker).*

*Figur 4.4 Pilottørke fra Swedish Exergy montert i Pelagias fiskemelfabrikk i Karmsund. Pneumatisk flashtørke med overhetet damp. Fortørket mel fra fiskemelfabrikken, tilføres varmt i skruemater.*

## 4.3 Produktkvalitet og tekniske egenskaper (AP3)

Forskere fra Nofima har gjennomført analyser av fiskemel produsert med de nye tørketeknologiene. Det ble målt:

- Fysiske egenskaper (bulktetthet, pulverflyt og partikkelstruktur), relatert til lagring, transport og fôrproduksjon
- Proteinfordøyelighet (mink og ilder som modell)
- Kjemisk sammensetning (protein, fett og vannløselig protein)

### 4.3.1 Metoder for fysiske egenskaper

Målinger av fysiske egenskaper ble utført ved Nofima Aquafeed Technology Centre i Bergen.

#### *4.3.1.1 Bulktetthet*

Bulktettheten ble målt i en målesylinder på 100 ml. Fiskemelsprøven ble drysset gjennom en trakt til melvolumet ble 100 ml og jevnet ut på toppen med en spatel og deretter veid.

#### 4.3.1.2 Viskositet

Et kapillærreometer (GÖTTFERT Werkstoff-Prüfishmealaschinen GmbH, Buchen, Germany; Figur 4.5) ble brukt til å analysere fiskemelenes viskositet ved ulike skjærrater. Reometeret ble oppvarmet til en konstant temperatur på 120°C. Prøvene ble fuktet til et vanninnhold på 25% og tilsatt sylinderen (⌀12 mm) i reometeret. Her ble prøvene plastisert i 10 minutter ved 120 °C før den ble ekstrudert gjennom en 2 mm sirkulær dyse i utløpet av sylinderen.

Skjærstress ($\tau_{app}$) og skjærrate ($\gamma_{app}$) i kapillærreometer blir beregnet ved å bruke følgende formler (Schramm, 1998):

$$\tau_{app} = \Delta P \frac{R}{2L}$$

$$\dot{\gamma}_{app} = Q \frac{4}{\pi R^3}$$

Der $\Delta P$ er trykkdifferansen gjennom kapillæret med en lengde, L, på 0.016 m, R er radiusen på kapillæret (0.001m) og Q er volumetrisk «flow rate» ($m^3/s$). Sistnevnte ble målt ved ulike hastigheter på stempelet, dvs. 4.40, 2.93, 1.47, 0.44, 0.29, 0.15, og 0.04 mm/s. Dette tilsvarer skjærrater på henholdsvis på 990, 660, 330, 99, 66, 33 og 9.9 1/s.

Videre kan vi bruke skjærstress ($\tau_{app}$) og skjærrate ($\gamma_{app}$) til å beregene tilsynelatende (apparent) viskositet ($\eta_{app}$) med følgende formel

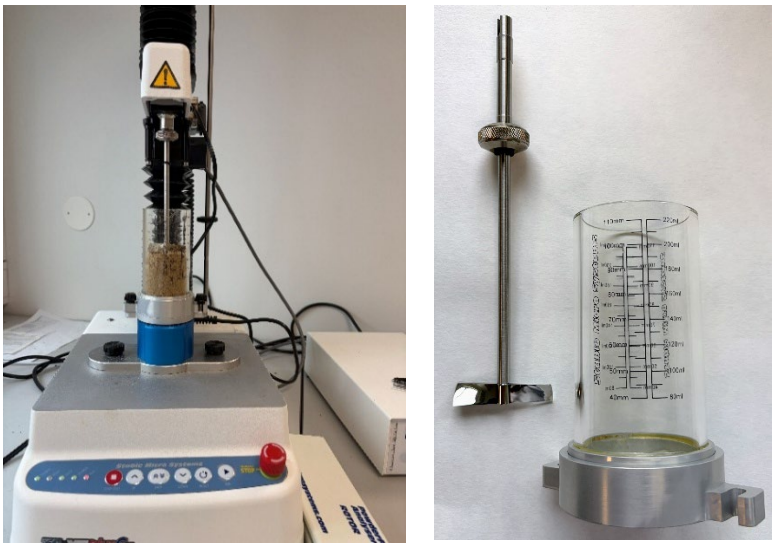
$$\eta_{app} = \frac{\tau_{app}}{\dot{\gamma}_{app}}$$

Alle prøvene ble kjørt som duplikat.

*Figur 4.5 Kapillærreometer, RG50*

#### 4.3.1.3 Pulveregenskaper

Cohesion Index (CI), Powder Flow Speed Dependency (PFSD) og Caking ble målt på en Powder Flow Analyzer (TA.XTplusC, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK; Figur 4.6). For alle tre målinger blir det montert et roterende blad (48 mm diameter og 10 mm høyde) og en beholder (120 mm høyde og 50 mm innvendig diameter) fylt med ca. 70 gram prøve (75 mm høyde i beholderen). Flytegenskapene ble vurdert ved å registrere kraften som bladet bruker for å rotere gjennom pulverprøven inne i beholderen under kontrollerte betingelser. (Benkovic & Bauman, 2009; Landillon et al., 2008)



Figur 4.6 Powder flow analyzer med tilhørende røreblad og beholder (TA.XTplusC)

#### 4.3.1.3.1 Cohesion

Cohesion beskriver pulverpartiklenes tendens til å holde sammen og danne agglomerater. Denne egenskapen måles ved å registrere motstanden på bladet når det løftes gjennom pulveret i kolonnen fra bunn til topp med en roterende bevegelse. Testen innledes med to kondisjoneringssykluser, etterfulgt av tre testsykluser som brukes til å kvantifisere prøvens kohesjonsegenskaper ved en tiphastighet på 50 mm/s for det roterende bladet (Landillon et al, 2008). I testsyklusene blir bladet senket ned med en kuttende bevegelse for å ikke komprimere pulveret i kolonnen før måling. Cohesion coefficient beregnes i programvaren Texture Exponent ved integrering av de negative områdene under kraft-/avstandskurven, som representerer motstanden når pulveret trekkes opp. Cohesion Index (CI) defineres som forholdet mellom Cohesion coefficient og prøvevekten. En lav CI er typisk for ikke kohesive, lettflytende pulver, mens en høy CI indikerer at pulveret er mer kohesivt og vanskeligere å håndtere (Benkovic og Bauman, 2009).

#### *4.3.1.4 Powder flow speed dependency*

PFSD-testen innledes med to kondisjoneringssykluser, etterfulgt av fem sett med to sykluser ved gradvis økende tiphastigheter på bladet (10, 20, 50 og 100 mm/s). Testen avsluttes deretter med to slutt-sykluser på 10 mm/s. I hver syklus komprimerer den nedadgående bevegelsen pulveret og kraften måles mens bladet roterer nedover i pulverkolonnen (Benkovic & Bauman, 2009). For hver kompresjonssyklus beregnes en compaction coefficient (g·mm) ved å integrere de positive områdene under kraft-/avstandskurven. En økning i compaction coefficient med høyere testhastighet indikerer økt motstand mot flyt, i.e. hastighetsavhengig.

#### *4.3.1.5 Flow stability*

Flytstabilitetsindeksen bestemmes som forholdet mellom compaction coefficient målt i den første og siste kompresjonsfasen ved 10 mm/s. En verdi nær 1 indikerer at pulverets egenskaper forblir tilnærmet uendret gjennom testen. En indeks som avviker fra 1 tyder derimot på at pulveret har endret karakter, for eksempel som følge av partikkelslitasje eller nedbrytning av agglomerater.

#### 4.3.1.6 *Caking*

Caking-testen starter med to kondisjonseringssykluser. Det roterende bladet planerer så toppen av pulverkolonnen og måler høyden nøyaktig. Bladet beveger seg deretter ned gjennom kolonnen og komprimerer pulveret til en forhåndsdefinert kraft på 750 g. Når denne kraften oppnås, beregnes høyden på det komprimerte pulveret/kaken under. Bladet beveger seg deretter forsiktig opp av pulverkolonnen, og komprimeringssyklusen gjentas fire ganger til. For hver syklus måles pulverkolonnen nøyaktig (synker for hver komprimering). Den femte gangen 750 g nås, skjærer bladet gjennom den komprimerte pulverkaken som er dannet i bunnen av beholderen og måler kraften. Kakehøyde i gjeldende syklus dividert med total kolonnehøyde registreres og oppgis som cake height ratio for hver syklus. Mean cake strength er gjennomsnittskraften som skal til for å skjære gjennom pulverkaken i bunnen i den femte syklusen. Økende cake height ratio per syklus indikerer at pulveret har økt tendens til caking/komprimering. Høyere mean cake strength er også indikasjon på dette. Et pulver med lite eller ingen tendens til caking/komprimering vil ikke vise endring i høyde på kaken og ha lavere Mean cake strength.

#### 4.3.1.7 *Mikroskopering*

Et Nikon Stereo Mikroskop (Model SMZ1270, Nikon Europe B.V., Amstelveen, The Netherlands; Figur 4.7) ble brukt for visuelt å vurdere forskjellene i struktur hos de ulike fiskemelene (vedlegg 1).

Figur 4.7 Nikon Stereo Mikroskop

### 4.3.2 Metoder proteinfordøyelighet målt med ilder

#### 4.3.2.1 *Protokoller for kvantitativ fordøyelighetsbestemmelse av råprotein og aminosyrer hos ildere*

Fordøyelighetsverdier beregnes basert på resultater for fire hannilder (minimum 6 måneder gamle).

Eksperimentperioden varer i syv dager, inkludert en tredagers tilpasningsperiode og en firedagers periode med kontrollert fôrinntak og kvantitativ innsamling av avføring. Dyrene holdes i individuelle metabolske bur utstyrt for kontrollert fôring og separasjon av avføring og urin. Det eksperimentelle fôret produseres med proteiningrediensen som eneste proteinkilde. Proteininnholdet utgjør omtrent 40 % av tørrstoffet i dietten. De andre ingrediensene er ferdigkokt maisstivelse, cellulosepulver, soyabønneolje og vitamin-/mineralblanding. De tørre ingrediensene blandes med vann for å gi optimal konsistens.

Daglige fôrrasjoner (160 g) for fire dyr på syv dager veies i plastbeholdere og holdes frosne frem til bruk. Dette fôrtilskuddet dekker det omtrentlige daglige vedlikeholdsenergi- og proteinbehovet. Dyrene mates én gang daglig. Dyr har fri tilgang til vann. Eksperimentene utføres i et laboratorium med romtemperatur (18 °C) og kontrollert fotoperiode.

#### 4.3.2.2 *Registreringer og vurderinger av fordøyelighet*

Dyrene veies både i starten og slutten av eksperimentet. Fôrrester og avføring samles daglig.

Avføringen oppbevares dypfrosset i separate bokser etter innsamling. Avføringskonsistenser noteres daglig. Kjemisk analyse av fôr og avføring (frysetørket) utføres ved samme laboratorium (Institutt for dyrevitenskap og akvakulturvitenskap eller Eurofins).

Tilsynelatende fordøyelighet bestemmes som ((**a**-**b**)/**a**)*100, hvor **a** er næringsinntak og **b** er mengden næringsstoff i avføringen. Ekte proteinfordøyelighet bestemmes basert på minkdata hvor endogen proteinfaktor på 278 mg N/100 g tørkestoff brukes (Skrede, 1979). Data fra dyr med mer enn 50 % fôrnektelse vil normalt bli ekskludert fra fordøyelighetsvurderinger. Resultatene vil deretter bli beregnet ut fra data fra tre dyr. Hvis fôringsnektelsen er høy, blandes ingrediensen med en annen proteinkilde, vanligvis et fiskemel som utgjør 50 % av kostholdets protein. Fiskemelet har kjent proteinfordøyelighet. Fordøyeligheten for testingrediensen beregnes deretter ut fra differansen. Den samme prosedyren kan brukes for aminosyrefordøyeligheter.

#### *4.3.2.3 Prøvestørrelse for testingrediens*

Prøven av testingrediensen bør gi 1,5 kg protein, for eksempel hvis proteininnholdet er 50 %, kreves en prøve på 3 kg.

### 4.3.3 Kjemisk sammensetning

Nofima og Mat og Miljølaboratoriet dokumenterer metoder med referanser i analysebevisene for hver enkelt analyse.

## 4.4 Datagrunnlag for oppskalering (AP4)

Det er gjennomført beregninger av energiforbruk og $CO_2$-avtrykk ved implementering av de to tørketeknologiene som er testet og vurdert i prosjektet. Resultater er vist i kap. 5.

# 5 Resultater

## 5.1 Energieffektivitet og miljøpåvirkning

Begge tørketeknologiene har vist potensial for betydelig reduksjon i energiforbruk, sammenlignet med dagens varmluftstørking, ved at energien i overskuddsdamp fra tørkene, kan redusere behovet for friskdamp som produseres med fossil energi (spillvarmeutnyttelse).

En kan oppnå betydelig redusert $CO_2$-avtrykk og NOx-utslipp, spesielt ved utnyttelse av spillvarme fra tørkeprosessen til oppvarming (koking) av fiskeråstoff.

Vakuumtørken fra Fjell Technology Group AS vil kunne bidra til energieffektive løsninger i eksisterende fabrikker og i nye, i kombinasjon med fortørker og forkoker. Energiforbruk til fiskemelproduksjon kan reduseres med ca. 50% ref. Fjell Technology (EFFOP, Skagen, 2022). Dette er også beregnet i prosjektet, og resultater er vist i beregningseksempel (Figur 5.1).

Overhetet damptørke fra Swedish Exergy AB, vil også kunne bidra til mer enn 50% reduksjon av energibehovet til fiskemelproduksjon, ved integrering i fiskemelfabrikk, som vist i beregningseksempel under (Figur 5.1). Overskuddsdampen vil ha atmosfærisk trykk, og være direkte anvendelig, men en må

trolig gå via en dampgenerator og komprimere ren damp til ønsket trykk for eksempel 3 barG til å drive eksisterende kokere og dermed erstatte damp fra gasskjel.

### 5.1.1 Energiberegninger

Begge tørketeknologiene som er testet i prosjektet vil kunne bidra til betydelig reduksjon av energibruk til fiskemelproduksjon sammenlignet med dagens produksjon av høykvalitets fiskemel (LT-mel). En har kun vurdert teknologiene som slutttørker, dvs. at en fortsatt vil ha serietørking med et innledende tørketrinn med disktørker indirekte oppvarmet med damp og atmosfærisk trykk i tørkekammeret.

Både vakuumtørke og overhetet damptørker gir muligheter for kombinasjoner med varmepumper og MVR-teknologier, og dermed muligheter for helt eller delvis elektrifisering av fiskemelproduksjonen.

En har beregnet effekter av å erstatte dagens varmluftstørker (LT-tørker) med overhetet damp med og uten MVR-løsning, vakuumtørke, og utnyttelse av spillvarme til oppvarming av råstoff. Valg av tørketeknologi er også diskutert tidligere i Flesland et al (2000). Potensiell energibesparelse på ca. 50% ved implementering av vakuumtørke som sluttørke og utnyttelse av overskuddsdamp til koking av råstoff, er beregnet og beskrevet av Fjell Technology (patentert prosess).

#### *5.1.1.1 Beregningseksempler*

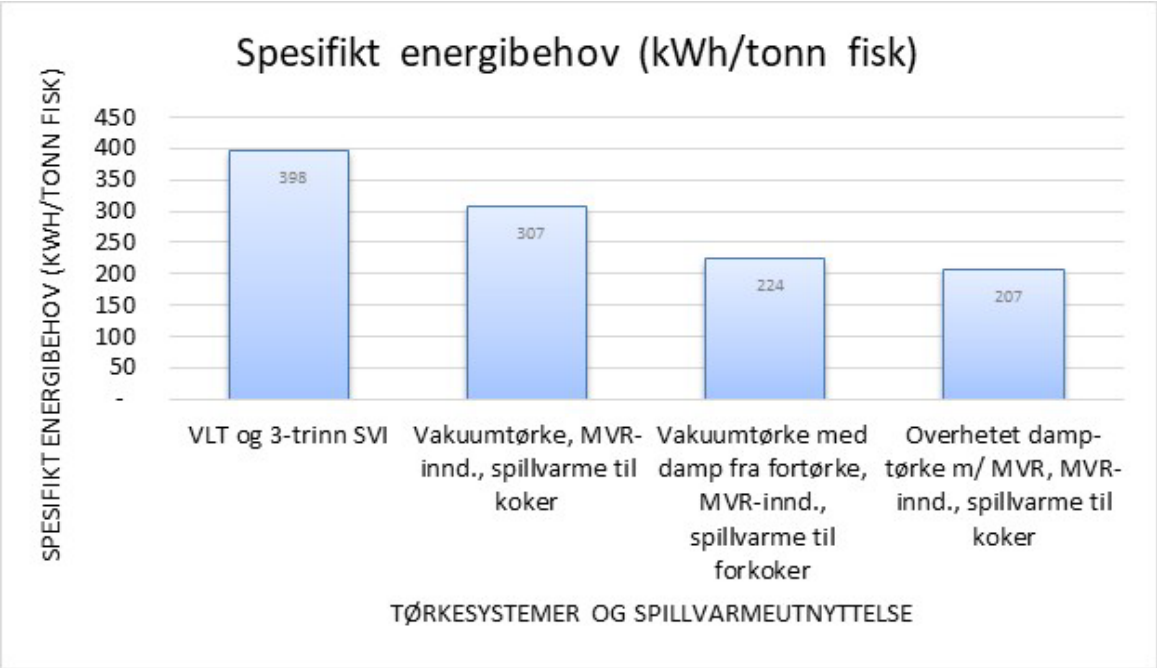
Forutsetninger for beregninger:

- Massebalanse for fiskemelprosess med kapasitet 1000 tonn fiskeråstoff per døgn
- LT-prosess med serietørking benyttes som referanse. Dette er valgt da målet er å kunne fremstille høykvalitets fiskemel mest mulig energieffektivt.

Spesifikt energibehov for de ulike vannfjerningsteknologiene er vist i Tabell 5.1 (Flesland et al 2000).

*Tabell 5.1 Spesifikk energibehov for tørker og inndampere*

| Spesifikk energi (kWh/kg avdamp) | | |
|---|---|---|
| Overhetet damptørke (OHD) | 0,75 | kWh/kg |
| Indirekte damptørke, vakuum og atmosfærisk | 1 | kWh/kg |
| Varmluftstørke | 1,15 | kWh/kg |
| MVR - inndamper | 0,03 | kWh/kg |
| MVR-tørke (OHD) | 0,2 | kWh/kg |




*Figur 5.1 Spesifikt energibehov beregnet for komplett fiskemelprosess, med forskjellige tørkesystemer og spillvarmeutnyttelse. Dagens LT-prosess er brukt som sammenligning, dvs. fortørking med disktørker og sluttørking med varmluftstørker (VLT) og 3-trinns spillvarmeinndampere (SVI). I alle eksemplene har en antatt fortørking med disktørker indirekte oppvarmet med damp.*

Beregningene viser at en kan oppnå omkring 50% reduksjon av energibehovet til fremstilling av fiskemel av LT-kvalitet. En kan oppnå ytterligere besparelse ved helt eller delvis elektrifisering ved implementering av høytemperaturvarmepumper. Det arbeides videre med dette i et nytt FHF-støttet prosjekt.

Kostnadsbesparelsene for en fabrikk med årlig produksjon på 100 000 tonn råstoff, vil være i størrelsesorden 18 mill. NOK, se Tabell 5.2. En vil også kunne redusere CO2-utslipp med ca. 5000 tonn per år for en typisk norsk fiskemelfabrikk (Tabell 5.3)

*Tabell 5.2 Eksempel på mulig energibesparelse for en typisk norsk fiskemelfabrikk*

| **Energitype** | **Spart energi** | **Pris** | **Årlig besparelse** |
|---|---|---|---|
| Gass / propan | 22,5 GWh | 0,70 NOK/kWh | 15,75 MNOK |
| Elektrisitet | 2,5 GWh | 0,80 NOK/kWh | 2,00 MNOK |
| **Totalt** | 25 GWh | – | ≈ 17,8 MNOK/år |

*Tabell 5.3 Reduksjon av CO2-utslipp for en typisk norsk fiskemelfabrikk*

| **Kilde** | **Spart energi** | **$CO_2$-faktor** | **Reduksjon** |
|---|---|---|---|
| Gass/propan | 22,5 GWh | 0,22 kg/kWh | 4 950 tonn $CO_2$ |
| Elektrisitet | 2,5 GWh | 0,03 kg/kWh | 75 tonn $CO_2$ |
| **Totalt** | 25 GWh | – | ≈ 5 025 tonn $CO_2$/år |

### 5.1.2 Tørking av fiskemel med overhetet damp og relevans til BAT-krav

Indirekte varmluftstørker brukt i produksjon av LT-fiskemel, avviker fra BAT-kriteriene på flere vesentlige punkter. Tørkesystemene opererer med høyt luftoverskudd (typisk 8–12 % $O_2$) for håndtering av luktforbrenning og for å begrense temperaturer i varmevekslere. Dette gir en lufttilførsel som ligger betydelig over nivåene som anses BAT-kompatible i EU-regelverket for forbrenningsanlegg (om lag 3 % $O_2$), og medfører økt termisk NOx-dannelse. I tillegg bidrar forbrenning av lukt- og prosessgasser samt resirkulasjon av røykgass til økt flammebelastning, volumstrøm og samlet NOx-utslipp. Disse forholdene gjør det krevende for varmluftstørker å operere innenfor de utslippsnivåene som legges til grunn i EU-BREF-ene.

Ved bruk av tørketeknologi basert på overhetet damp skjer tørkingen i en lukket krets uten lufttilførsel, uten luktforbrenning og uten behov for høyt luftoverskudd. Dette er i tråd med BAT-konklusjonenes generelle prinsipper for utslippsbegrensning i industrielle tørkeprosesser, der lave NOx-nivåer oppnås gjennom fravær av forbrenning, begrenset luftinnblanding og effektiv varmegjenvinning.

Selv om dampen i et overhetet damptørkesystem varmes opp via varmeveksler, og teknologien derfor ikke gir automatisk NOx-reduksjon i energiforsyningen, er det spesifikke energiforbruket typisk 20–25 % lavere enn for varmluftstørker, selv uten utnyttelse av spillvarme. I tillegg gir teknologien gode muligheter for utnyttelse av overskuddsdamp som høyverdig spillvarme. Samlet gir overhetet damptørking et betydelig bedre grunnlag for å oppfylle BAT-kravene til både energieffektivitet og reduserte totale utslipp [effop.org].

## 5.2 Produktkvalitet

### 5.2.1 Proteinfordøyelighet

Proteinfordøyelighet brukes her som en indirekte metode for å måle eventuell varmeskade som følge av temperatur og oppholdstid under tørking, og for å sammenligne tørketeknologiene.

Proteinfordøyelighet ble målt i biologiske forsøk med ilder ved NMBU. Ilder (eng. ferret) er et nytt forsøksdyr til analyse av proteinfordøyelighet, og erstatter mink ved NMBU. Tester har vist god korrelasjon med mink. Både fortørket mel fra disktørker og ferdig LT-mel er benyttet som referanser til mel som er sluttørket i overhetet damp og på vakuumdisktørken. Resultatene er oppsummert i Tabellene 5.4 og 5.5 og figurene 5.2 og 5.3 for de ulike tørketeknologiene.

På grunn av utfordringer knyttet til installasjon og igangkjøring av pilotanleggene har det ikke vært mulig å gjennomføre testingen så systematisk som opprinnelig planlagt. Det er likevel gjennomført tester innenfor de mest relevante områdene, som gir grunnlag for å vurdere oppskalering til industriell skala. En mulig videreføring er etablering av en fullskala pilot ved en av Pelagias fiskemelfabrikker, med hensikt å opparbeide relevant driftserfaring over tid.

Tabell 5.4 oppsummerer kjøreparametere og fordøyelighetstall for pilottester med Swedish Exergys overhetet damptørke sammenlignet med fortørket og LT-tørket mel for brisling. Den overhetede damptørken ble kjørt med noe overtrykk for å kunne ta ut melet ved en temperatur over 100°C. Dette

for å hindre kondensasjon i utløpet av tørken. En ser fra tabellen at ulike overtrykk og utløpstemperaturer ikke har medført redusert fordøyelighet sammenlignet med referansene (fortørket og LT-tørket mel).

*Tabell 5.4 Pilottester med Swedish Exergys overhetet damptørke, tørking av brisling*

| Tørke-metode | Damp-trykk i tørken, P (barG) | Metnings-temperatur i tørken $T_{sat}$(P) (°C) | Innløps-temperatur (°C) | Utløps-temperatur (°C) | Vann-innhold inn (%) | Vann-innhold ut (%) | Midlere sann protein-fordøyelighet (%) | Standard error of the mean |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| For-tørket 01.09.25 (referanse) | 1 | 100 | 100* | 100* | 60%* | 34,9 % | 86,9 | 0,57 |
| Exergy pilot 01.09.25 | 0,6 | 113,3 | 194,5 | 151,1 | 34,9 % | 9,3 % | 87,2 | 0,69 |
| For-tørket 02.09.25 (referanse) | 1 | 100 | 100* | 100* | 60 % | 42,5 % | 88,2 | 0,47 |
| LT-tørket 02.09.25 (referanse) | atm | luft | 350* | 80* | 42,5 % | 6 % | 87,8 | 0,79 |
| Exergy pilot 02.09.25 | 0,53 | 111,9 | 190,2 | 132,4 | 42,5 % | 11,0 % | 87,9 | 0,41 |
| LT-tørket 01.10.25 (referanse) | atm | luft | 350* | 80* | 48,8 % | 7,4 % | 87,9 | 0,74 |
| Exergy pilot 01.10.25 | 0,42 | 109,7 | 187,8 | 138,3 | 48,8 % | 9,9 % | 87,9 | 0,78 |

* Basert på erfaringstall, ikke målt her.

Figur 5.2 oppsummerer fordøyelighet på forsøk både utført på brisling og sild.

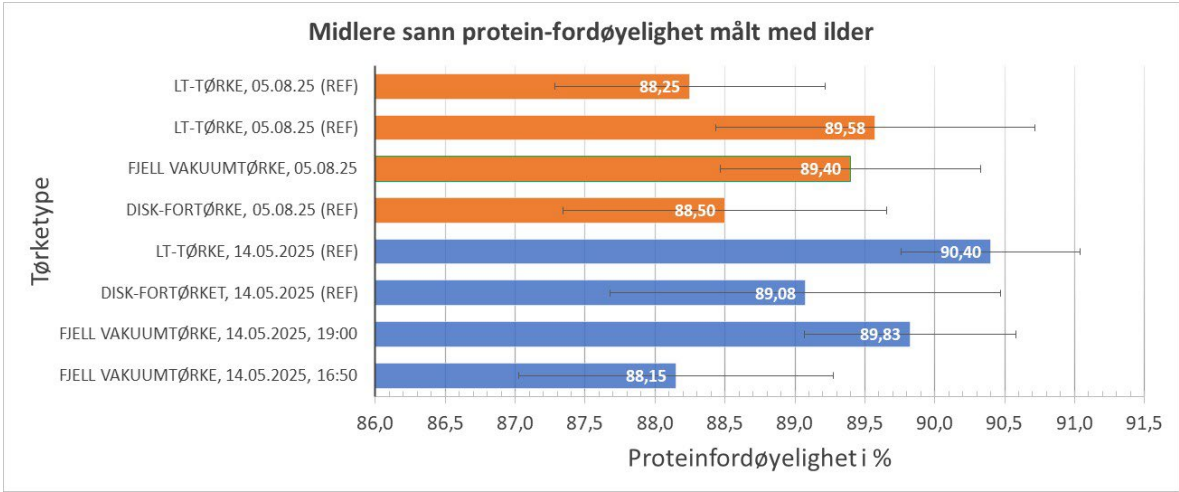
*Figur 5.2 Biologisk proteinfordøyelighet målt med ilder, for pilottørke med overhetet damp, sammenlignet med LT-tørket fiskemel. Samme farge viser tester kjørt samme dag med samme batch med råstoff.*

For de ulike seriene ble det utført ènveis ANOVA (n=4), etterfulgt av Tukeys post hoc test for å bestemme eventuelt signifikante forskjeller. Det ble ikke funnet signifikante forskjeller mellom referansemelene og mel tørket med overhetet damp for seriene vist i Tabell 5.4 og Figur 5.2. Dette viser potensialet for å produsere LT-kvalitet med overhetet damptørke som sluttørke.

Tabell 5.5 oppsummerer kjøreparametere og fordøyelighetstall for pilottester med vakuumdisktørken sammenlignet med fortørket og LT-tørket mel fra kolmule og sild+brisling. Vakuumtørken ble kjørt med 0,3 bars damptrykk og utløpstemperatur på 70°C for å kunne i.e. skånsom sluttørking.

*Tabell 5.5 Pilottester med vakuumtørke fra Fjell Technology. Temperaturer for fortørke (disktørke) og LT-tørke (varmluftstørke) er anslått ut fra erfaring.*

| Tørkemetode | Råstoff | Damp-trykk i disker (barA) | Damp-trykk i tørke-kammer (bar A) | Innløps-temperatur (°C) | Utløps-temperatur (°C) | Vann-innhold inn (%) | Vann-innhold ut (%) | Midlere sann protein-for-døyelighet | Standard error of the mean |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fjell Vakuumtørke, 14.05.2025, 16:50 | kolmule | 2 | 0,3 | 70 | 70 | 44,5 % | 2,9 % | 88,15 | 0,56 |
| Fjell Vakuumtørke, 14.05.2025, 19:00 | kolmule | 2 | 0,3 | 70 | 70 | 44,5 % | 6,7 % | 89,83 | 0,38 |
| Disk-fortørket, 14.05.2025 (ref) | kolmule | 5 | 1 | 100 | 100 | 60,0 % | 44,5 % | 89,08 | 0,70 |
| LT-tørke, 14.05.2025 (ref) | kolmule | | atm | 350 | 80 | 44,5 % | 6,0 % | 90,40 | 0,32 |
| Disk-fortørke, 05.08.25 (ref) | sild+ brisling | 5 | 1 | 100 | 100 | 60,0 % | 40,0 % | 88,50 | 0,58 |
| Fjell vakuumtørke, 05.08.25 | sild+ brisling | 2 | 0,3 | 70 | 70 | 40,0 % | 10,0 % | 89,40 | 0,47 |
| LT-tørke, 05.08.25 (ref) | sild+ brisling | | atm | 350 | 80 | 40,0 % | 8,0 % | 89,58 | 0,57 |
| LT-tørke, 05.08.25 (ref) | sild+ brisling | | atm | 350 | 80 | 40,0 % | 8,0 % | 88,25 | 0,48 |




*Figur 5.3 Biologisk proteinfordøyelighet målt med ilder, for pilot vakuumtørke. Viser muligheter for LT-kvalitet med vakuumtørke som sluttørke. Samme farge er kjørt samme dag med samme batch med råstoff.*

For de 2 seriene ble det utført ènveis ANOVA på dataene fra tester med Fjell Technologys vakuumtørke (n=4), etterfulgt av Tukeys post hoc test for å bestemme eventuelt signifikante forskjeller. Det ble kun funnet signifikant forskjell ($P < 0,05$) mellom LT-tørke 14.05.2025 og Fjell vakuumtørke 14.05.2025 (mel med lavest verdi), ellers ingen signifikante forskjeller for data vist i *Tabell 5.5* og *Figur 5.3*. Dette viser potensial for å produsere LT-kvalitet med vakuumtørke som sluttørke.

Oppsummert viser resultatene at sluttørking med overhetet damp og vakuumtørking kan gi like god eller bedre kvalitet enn LT-mel, forutsatt optimalisering av tørketid og temperatur.

.

## 5.2.2 Kjemiske og tekniske egenskaper av et utvalg fiskemel

Kjemiske og tekniske egenskaper ble analysert for et utvalg fiskemel sluttørket med de to ulike teknologiene, overhetet damp og vakuum. Resultatene ble sammenlignet med referansemel produsert kommersielt med lufttørke som sluttørke (LT-mel).

På Swedish Exergy sin pilottørke (overhetet damp) ble det gjennomført forsøk på brisling (to referanseprøver og to testprøver) og nordsjøsild (én referanseprøve og to testprøver). For vakuumtørken ble to forsøksserier gjennomført på kolmule, hhv. i 2024 og 2025. I vurderingen av kjemiske og tekniske egenskaper er prøvene behandlet samlet, dvs. tre referansemel og tre testmel.

Fysiske egenskaper, inkludert bulktetthet, pulverflyt og partikkelstruktur, ble karakterisert og vurdert med hensyn til implikasjoner for lagring og transport. For å evaluere eventuelle endringer i egenskaper ved pelletering ble et brislingmel pelletert ved bruk av et kapillærreometer (RG50; GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen, Germany). De resulterende dataene ble benyttet til å vurdere om pelletering kan bidra til å øke bulktetthet og redusere fiberstrukturen til melet.

Ingrediensenes viskositetsbidrag har betydning for ekstruderens kokeeffektivitet og for den resulterende fysiske kvaliteten på ferdig fôr. Alle melprøver, med unntak av det pelleterte melet (begrenset av prøvevolum), ble analysert for viskositet ved varierende skjærbelastning ved bruk av samme kapillærreometer (RG50).

### *5.2.2.1 Swedish Exergy pilottørke*

#### 5.2.2.1.1 Brisling

For brisling ble fire prøver analysert, hvorav to prøver var sluttørket under ulike prosessbetingelser i pilottørken og sammenlignet med to referanseprøver (LT-mel). Prøve A1 ble i tillegg pelletert og formalt for å undersøke hvordan pelletering påvirket de fysiske egenskapene.

De kjemiske analysene (Tabell 5.6) viser at de pilottørkede prøvene hadde noe høyere vanninnhold enn referansemelene, med høyest verdi for A1 pelletert. Dette som resultat av at noe vann ble tilsatt under pelletering. For vannløselig protein ble det observert noe variasjon mellom prøvene, hvor A2 hadde høyest innhold. Fettinnholdet viste også noe variasjon, hvor A3 hadde høyest verdi.

*Tabell 5.6 Kjemisk sammensetning av fiskemelsprøver fra Brisling inklusiv pelletert mel av A1 (kun vann)*

| | A1-Exergy pilottørke (02.09.25) | A1 - pelletert | A2-LT mel (02.09.25) | A3-LT referanseprøve 25/002 (01.10.25) | A4-Swedish Exergy pilottørke 25/006 |
|---|---|---|---|---|---|
| Totalt flyktig nitrogen (%) | 0,14 | - | 0,15 | <0,10 | <0,10 |
| Vann (%) | 10,4 | 12,2 | 5,9 | 7,4 | 9,9 |
| Tørrstoffbasis: | | | | | |
| Råprotein (%) | 78,1 | | 77,8 | 78,9 | 79,8 |
| Vannløselig råprotein (% av protein) | 27,1 | - | 32,3 | 25,5 | 24,5 |
| Fett | 8,6 | | 9,6 | 10,4 | 9,9 |
| Aske | 14,0 | | 13,6 | 14,0 | 13,5 |

*Tabell 5.7.* viser resultater fra analyser av bulktetthet, viskositet, flytegenskaper samt vurderinger av signifikante forskjeller mellom prøvene. For å muliggjøre en visuell sammenligning mellom meltypene er viskositetsprofiler, PFSD data og caking-kurver presentert i Figur 5.4-5.6.

Det ble observert signifikante forskjeller i bulktetthet, der de laveste verdiene ble analysert for melene sluttørket på pilottørken. Det ble ikke påvist statistiske forskjeller mellom de to pilottørkede melene, og heller ikke mellom de to referansemelene. Pelletert og deretter formalt mel (A1 pellet) hadde derimot en signifikant økning i bulktetthet sammenlignet med A1, og verdien nærmet seg nivået som ble observert for referansemelene.

For viskositetsmålingene var det kun referansemel, A2, som skilte seg signifikant fra de øvrige prøvene, med lavest viskositet ved alle målte skjærkrefter (Figur 5.4). De øvrige melene hadde sammenlignbare viskositetsprofiler.

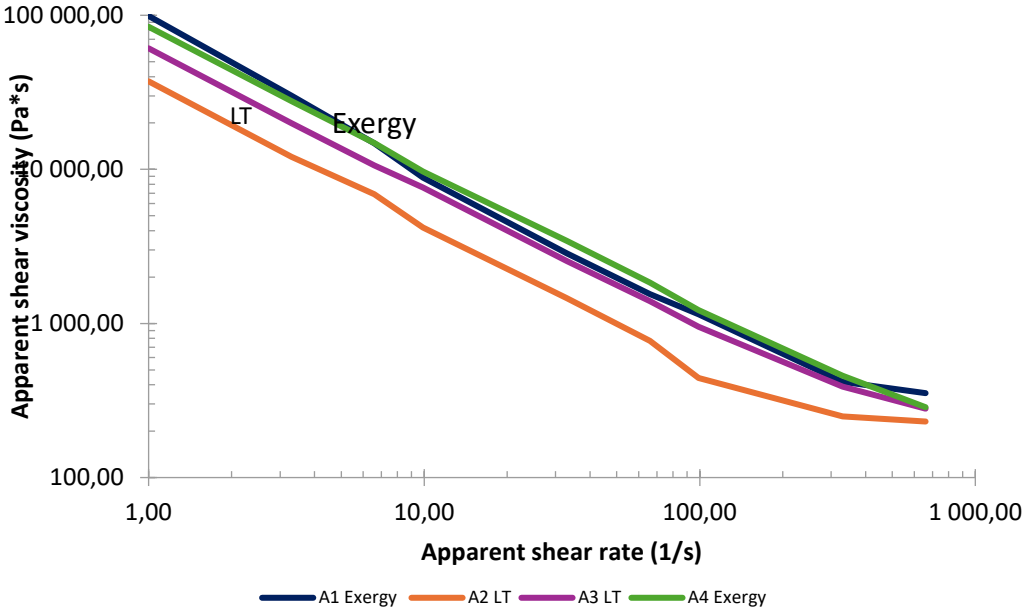
Når det gjelder Cohesion index, hadde referansemelene de signifikant laveste verdiene, mens A1 pellet og A4 viste de høyeste. PFSD grafene (Figur 5.5) viser at de pilottørkede melene endrer flyteegenskaper ved økende skjærkrefter, mens referansemelene viser mer stabile profiler. Ved lave skjærkrefter fremstår de pilottørkede melene relativt like som referansemelene. A1 pellet skiller seg ut med en høy og flatere kurve gjennom hele testforløpet.

Det ble ikke funnet signifikante forskjeller mellom melene med hensyn til Flow stability. For caking-analysene (Mean cake strength og kurveforløp, Tabell 5.7 og Figur 5.6) ser en at det pilottørkede A1-melet hadde de største tendensene til caking. Pilottørket mel, A4, viste egenskaper som ligger nærmere referansemel A3. For pelletert og deretter formalt mel (A1-pellet) var caking-tendensene eliminert. Resultatene er konsistente og gyldige i hele måleområdet (Figur 5.6).

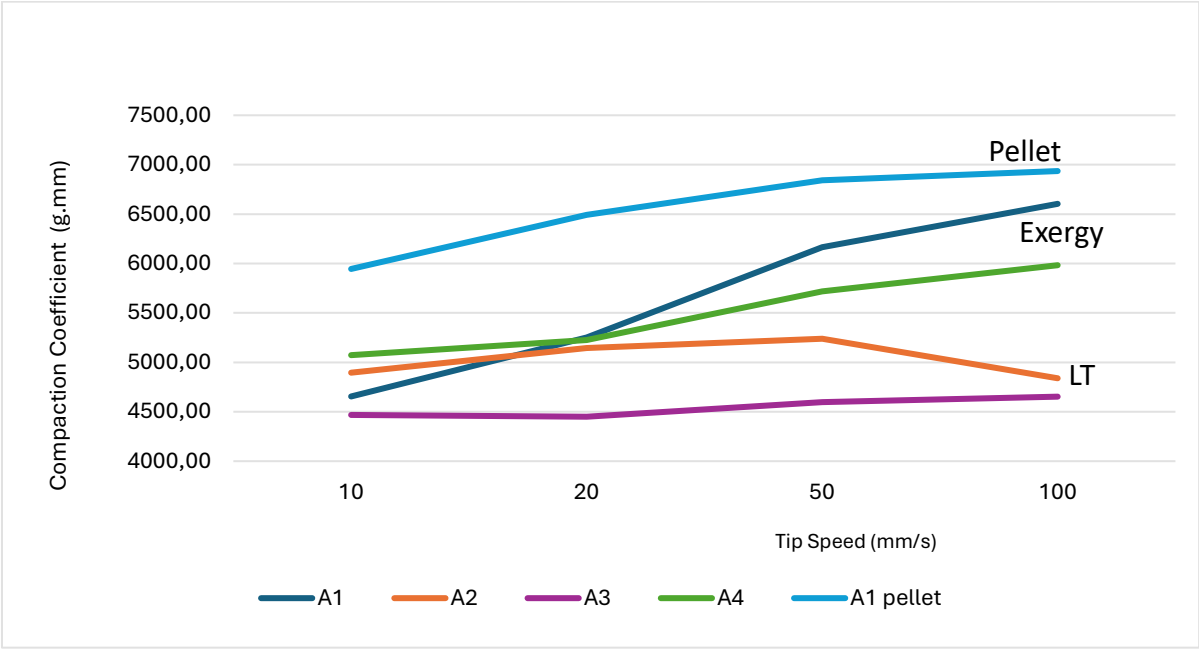
*Tabell 5.7 Bulktetthet (n=3), Viskositet ved 330 $s^{-1}$ (n=2), Cohesion index (n=3) Flow stability (n=3) and Mean cake strength (n=3; Mean ± S.E.M.) for fiskemelsprøver fra Brisling inklusiv pelletert mel av A1.*

| | A1-Exergy pilottørke (02.09.25) | A1 - pellet | A2-LT mel (02.09.25) | A3-LT referanseprøve 25/002 (01.10.25) | A4-Swedish Exergy pilottørke 25/006 | *p*-verdi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bulktetthet (g/L) | 412 ± 6$^{a}$ | 527 ± 8$^{b}$ | 565 ± 20$^{c}$ | 580 ± 3$^{c}$ | 427 ± 6$^{a}$ | <0,0001 |
| Viskositet (Pa s) | 418 ± 20$^{b}$ | - | 249 ± 43$^{a}$ | 389 ± 31$^{b}$ | 457 ± 19$^{b}$ | 0,008 |
| Cohesion index (CI) | 16,4 ± 0,9$^{b}$ | 20,0 ± 1,3$^{c}$ | 13,8 ± 0,2$^{a}$ | 12,8 ± 0,2$^{a}$ | 20,1 ± 0,1$^{c}$ | <0,0001 |
| Flow stability | 1,03 ± 0,01 | 1,13 ± 0,14 | 1,04 ± 0,01 | 1,08 ± 0,02 | 0,95 ± 0,04 | 0,08 |
| Mean cake strength (g) | 322 ± 15$^{d}$ | 37,9 ± 2,5$^{a}$ | 121 ± 7$^{b}$ | 170 ± 39$^{bc}$ | 226 ± 23$^{c}$ | <0,0001 |

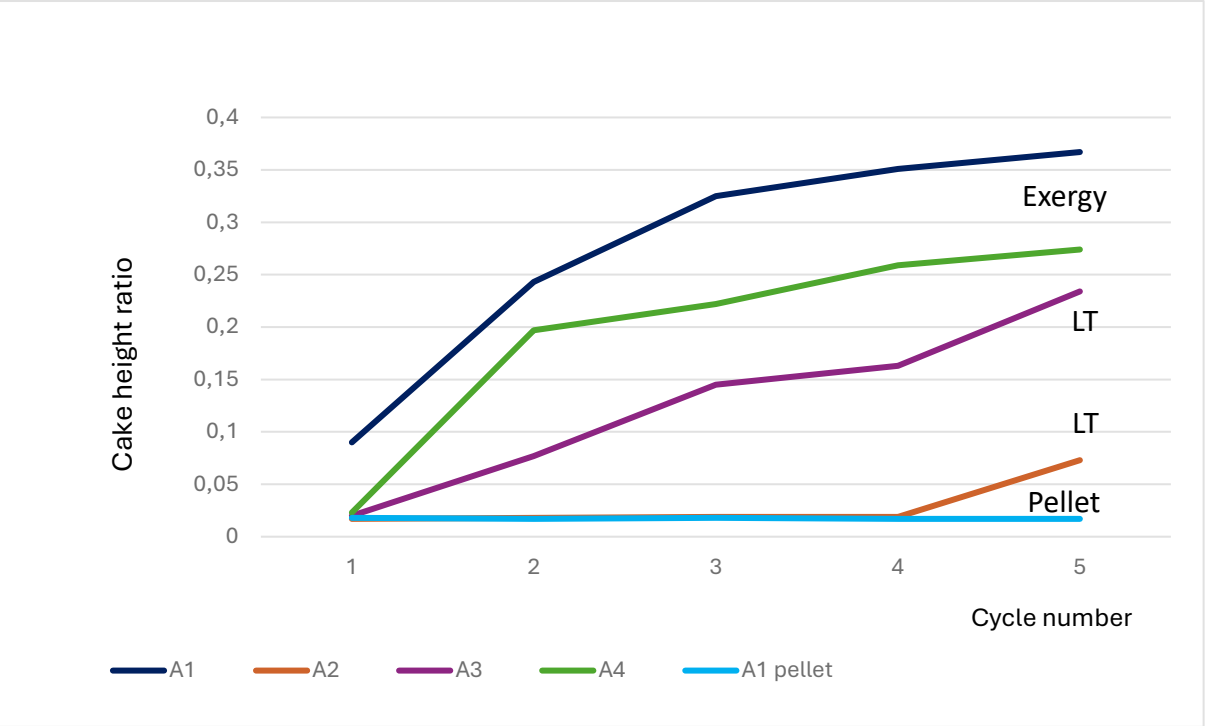
Énveis ANOVA. Verdier som ikke deler like bokstavindekser (superskripter) er signifikant forskjellige (P < 0,05), bestemt ved ANOVA etterfulgt av Tukeys post hoc test.




*Figur 5.4 Viskositetsprofiler for mel fra Brisling*




*Figur 5.5 Powder Flow Speed Dependency (PFSD) test for mel fra Brisling inkludert pelletert mel*




*Figur 5.6 Caking-test for mel fra Brisling inkludert pelletert mel*

#### 5.2.2.1.2 Nordsjøsild

For nordsjøsild ble tre prøver analysert, hvorav to var sluttørket under ulike prosessbetingelser i pilottørken og sammenlignet med ett referansemel (LT-mel). De kjemiske analysene (*Tabell 5.8*) viser at de pilottørkede prøvene hadde noe høyere vanninnhold enn referansen, med høyest verdi i prøve B3. Askeinnhold ble ikke bestemt for B3, men for øvrige parametere fremstår den kjemiske sammensetningen som relativt lik mellom de tre melene.

*Tabell 5.8 Kjemisk sammensetning av fiskemelsprøver fra Nordsjøsild*

| | B1- Ref LT 25/002 | B2 – Exergy 25/010 | B3 – Exergy S.test 25/011 |
|---|---|---|---|
| Totalt flyktig nitrogen (%) | 0,13 | 0,13 | 0,14 |
| Vann (%) | 6,1 | 9,4 | 12,2 |
| Tørrstoff | | | |
| Råprotein (%) | 78,8 | 80,7 | 80,6 |
| Vannløselig råprotein (% av protein) | 25,6 | 21,5 | 23,4 |
| Fett | 10,6 | 9,9 | 9,9 |
| Aske | 12,9 | 11,5 | - |

Tabell 5.9 viser resultater fra analyser av bulktetthet, viskositet, flytegenskaper og statistiske sammenligninger mellom meltypene. For visuell vurdering av forskjellene er viskositetsprofiler, PFSD data og caking-kurver presentert i Figur 5.7-5.9.

Det ble observert signifikante forskjeller i bulktetthet, der det pilottørkede melet, B3, viste lavest verdi og referansemel, B1, høyest. Pilottørket mel, B2, viste en intermediær verdi.

For viskositetsmålingene var det kun det det pilottørkede melet, B3, som skilte seg signifikant fra de øvrige prøvene, med høyest viskositet. De andre melene fremstod som relativt like, og dette mønsteret var gjennomgående i hele måleområdet med unntak av de høyeste skjærkreftene (Figur 5.7).

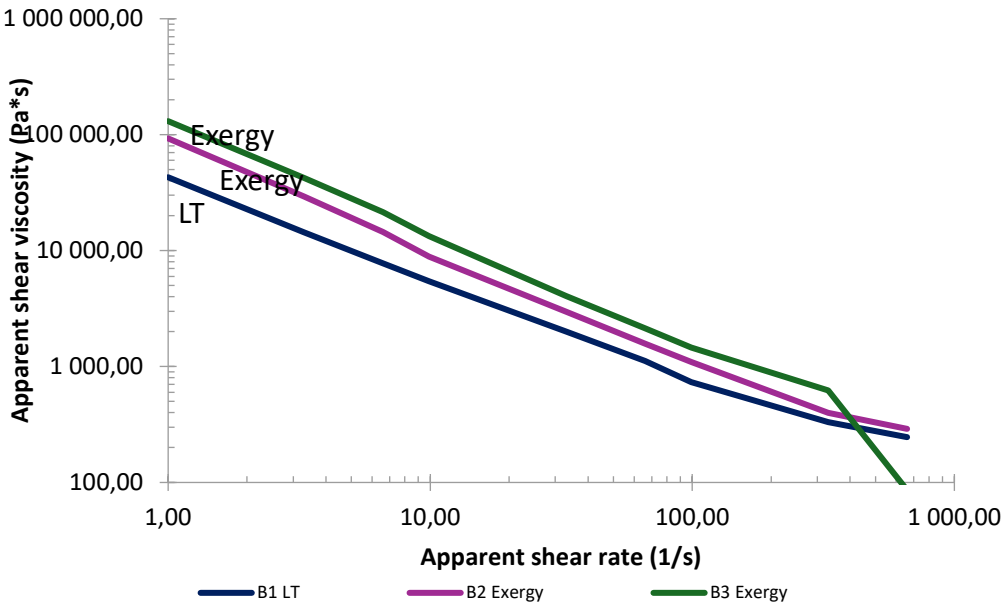
Når det gjelder Cohesion index, hadde referansemelet den signifikant laveste verdien, mens det ikke var statistiske forskjeller mellom de pilottørkede melene. PFSD forløpene viser at pilottørket mel, B2, ligger under referansemelet i hele måleområdet.

Flow stability viste ingen signifikante forskjeller mellom meltypene. For caking analysene (Mean cake strength og kurveførløp, Tabell 5.9 og Figur 5.9) var det kun pilottørket mel, B3, som var signifikant forskjellig, med den høyeste verdien. Den grafiske fremstillingen (Figur 5.9) viser at Referansemel, B1, og pilottørket mel, B2, har svært like kurveforløp.

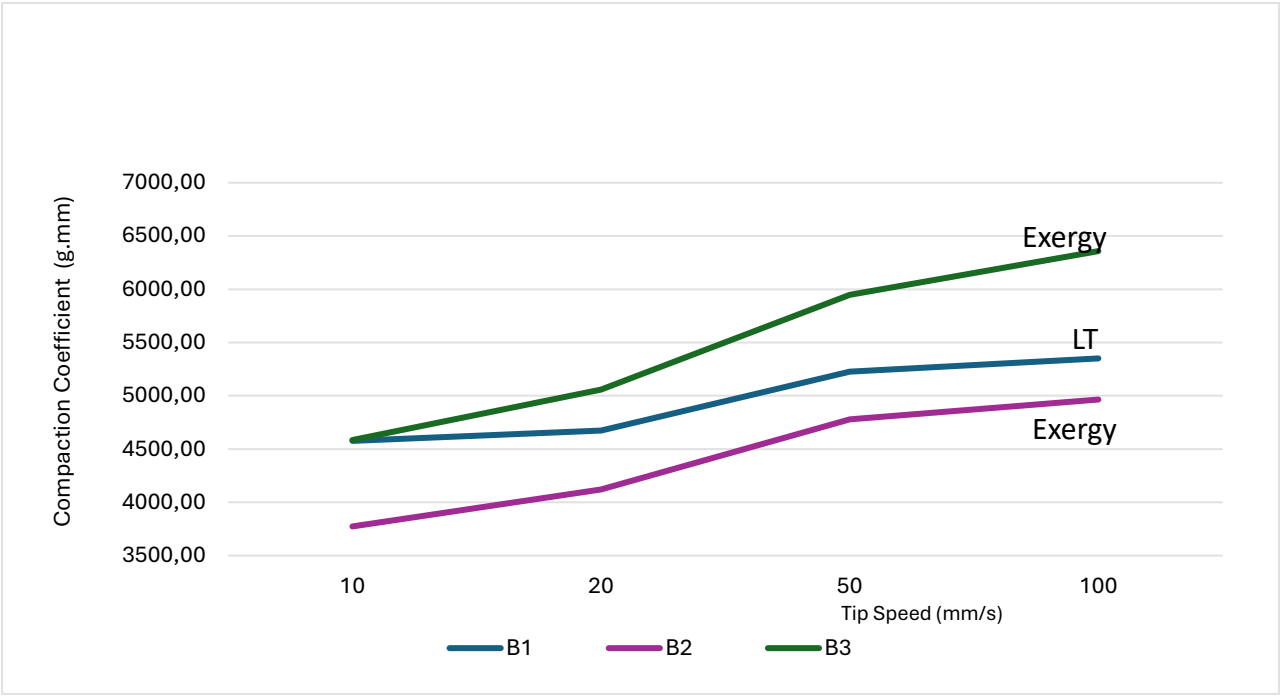
Tabell 5.9 Bulktetthet (n=3), Viskositet ved 330 $s^{-1}$ (n=2), Cohesion index (n=3) Flow stability (n=3) and Mean cake strength (n=3; Mean ± S.E.M.) for fiskemelsprøver fra Nordsjøsild

| | B1- Ref LT 25/002 | B2 – Exergy 25/010 | B3 – S.test 25/011 | *p*-verdi |
|---|---|---|---|---|
| Bulktetthet (g/L) | 592 ± 4$^{c}$ | 451 ± 13$^{b}$ | 396 ± 4$^{a}$ | <0,0001 |
| Viskositet (Pa s) | 331 ± 18$^{a}$ | 399 ± 34$^{a}$ | 622 ± 35$^{b}$ | 0,005 |
| Cohesion index (CI) | 15,0 ± 0,3$^{a}$ | 19,6 ± 1,0$^{b}$ | 18,3 ± 0,8$^{b}$ | <0,001 |
| Flow stability | 1,00 ± 0,02 | 0,99 ± 0,01 | 1,00 ± 0,02 | 0,53 |
| Mean cake strength (g) | 183 ± 25$^{a}$ | 210 ± 4$^{a}$ | 322 ± 15$^{b}$ | <0,001 |

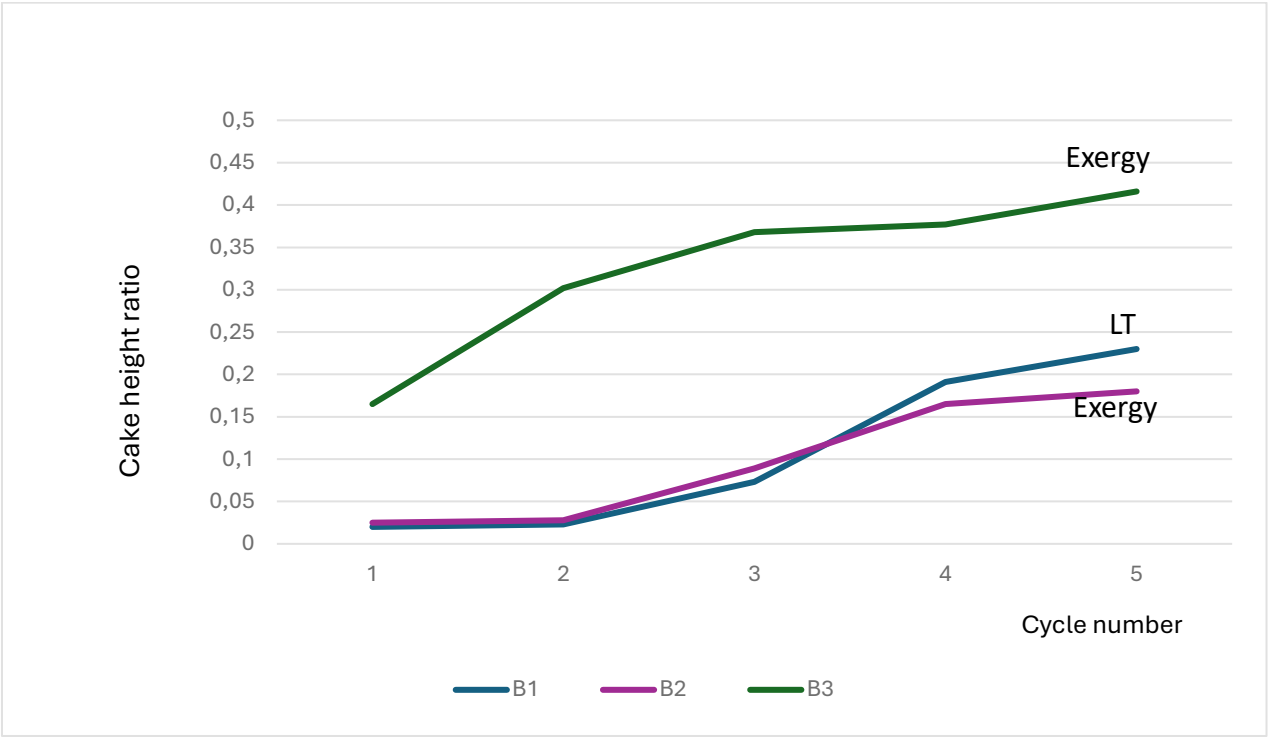
Énveis ANOVA. Verdier som ikke deler like bokstavindekser (superskripter) er signifikant forskjellige (P < 0,05), bestemt ved ANOVA etterfulgt av Tukeys post hoc test.




*Figur 5.7 Viskositetsprofiler for mel fra Nordsjøsild*




*Figur 5.8 Powder Flow Speed Dependency (PFSD) test for mel fra Nordsjøsild*




*Figur 5.9: Caking-test for mel fra Nordsjøsild*

### *5.2.2.2 Vakuumtørke*

#### 5.2.2.2.1 Kolmule

For kolmule ble totalt syv prøver analysert. Dette inkluderte én prøveserie fra 2025 (C1–C3), der to prøver var sluttørket under ulike prosessbetingelser i vakuumtørken (C2 og C3) og sammenlignet med et LT referansemel (C1). I tillegg ble fire melprøver fra 2024 analysert (prøve 1, 2, 6 og 7), hvor prøvene 2 og 6 er referanser og 1 og 7 sluttørket i vakuumtørken ved ulike betingelser.

Det ble observert tydelige forskjeller i vanninnhold mellom de vakuumtørkede seriene (*Tabell 5.10*). Pilotprøvene fra 2025 (C2 og C3) hadde lavere vanninnhold enn 2024 prøvene (1 og 7). Prøve C3 hadde et vanninnhold som var tilnærmet likt referanseprøvene, mens C2 fremstod noe overtørket. For vannløselig protein var prøvene fra 2025 relativt like og viste høyere verdier enn prøvene fra 2024. Prøve 1 og 7, som begge var vakuumtørket, hadde lavere vannløselig protein enn referansemelene. Askeinnholdet viste også variasjon mellom prøvene.

*Tabell 5.10 Kjemisk sammensetning av fiskemelsprøver fra Kolmule*

| | C1– LT tørket Karmsund (NMBU-merking: 121) | C2- Vakuumtørket (NMBU-merking: 126) | C3- Vakuumtørket (NMBU-merking: 131) | 1., 29.04.24 15:10, Vakuumtørket 2bar/G | 2., 29.04.24 15:30, Varmluftstørket, ikke møllet | 6., 29.04.24 Varmluftstørket, møllet | 7., 25.04.24 Vakuumtørket |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Totalt flyktig nitrogen (%) | - | - | - | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,12 |
| Vann (%) | 6,0 | 2,9 | 6,7 | 11,3 | 6,2 | 6,8 | 11,0 |
| Tørrstoff | | | | | | | |
| Råprotein (%) | 76,6 | 74,0 | 73,6 | 73,3 | 68,9 | 76,5 | 74,5 |
| Vannløselig råprotein (% av protein) | 35,6 | 36,4 | 37,6 | 23,8 | 30,2 | 31,8 | 22,2 |
| Fett | 8,3 | 7,6 | 7,6 | 5,6 | 6,3 | 7,5 | 6,4 |
| Aske | 15,9 | 16,6 | 18,9 | 20,4 | 24,9 | 17,5 | 19,1 |

Tabell 5.11 viser resultater fra analyser av bulktetthet, viskositet og flytegenskaper, samt vurderinger av signifikante forskjeller mellom prøvene. For å muliggjøre en visuell sammenligning er viskositetsprofiler, PFSD data og caking-kurver inkludert i Figur 5.10-5.12.

Selv om bulktetthet for 2024 prøvene (1, 2, 6 og 7) kun ble målt én gang per prøve, er disse inkludert i ANOVA analysen for oversiktens skyld. Resultatene viser at de laveste bulktetthetsverdiene forekom i de vakuumtørkede melene fra 2024 serien (1 og 7). Referanseprøve C1 hadde den høyeste bulktettheten, mens de vakuumtørkede melene fra 2025 serien (C2 og C3) hadde verdier som lå nærmere referansemelene fra 2024 serien (prøve 2 og 6).

For viskositetsmålingene hadde prøve 7 (vakuumtørket) den høyeste verdien, etterfulgt av vakuumtørket prøve 6. Den laveste viskositeten ble målt for referansemelet C1. De øvrige melene viste relativt like viskositetsprofiler. Dette mønsteret fremkommer også i Figur 5.10.

For Cohesion index hadde referansemelet C1 den signifikant laveste verdien, mens forskjellene mellom de øvrige prøvene var små. PFSD forløpene (Figur 5.11) viser at alle vakuumtørkede mel ligger noe over referansemelet i hele måleområdet. Prøve C2 skiller seg tydelig ut ved å ha gjennomgående høyere PFSD verdier enn de andre prøvene.

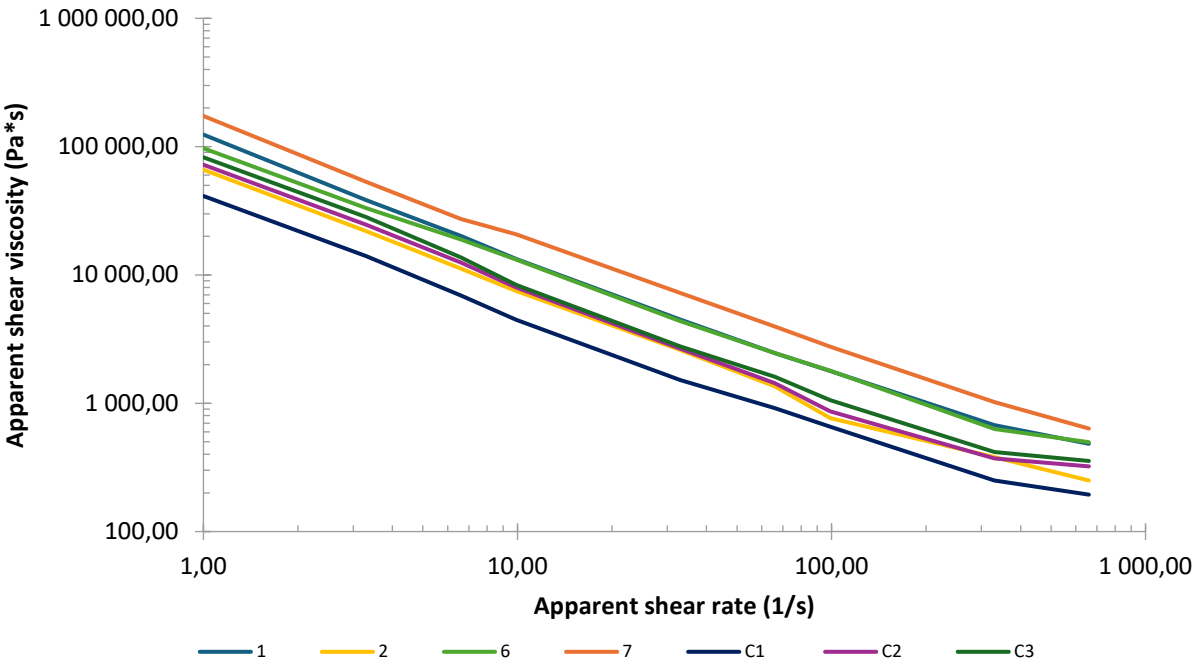
Det ble påvist signifikante forskjeller mellom meltypene når det gjelder flow stability. Varmluftstørket mel, 2, hadde den laveste verdien, mens C2 (vakuumtørket) viste den høyeste. Forskjellene mellom

meltypene er imidlertid små, og alle målingene ligger rundt verdien 1. For caking-egenskaper var forskjellene større, der referansemelene viste ingen tendens til caking (Tabell 5.11 og Figur 5.12).

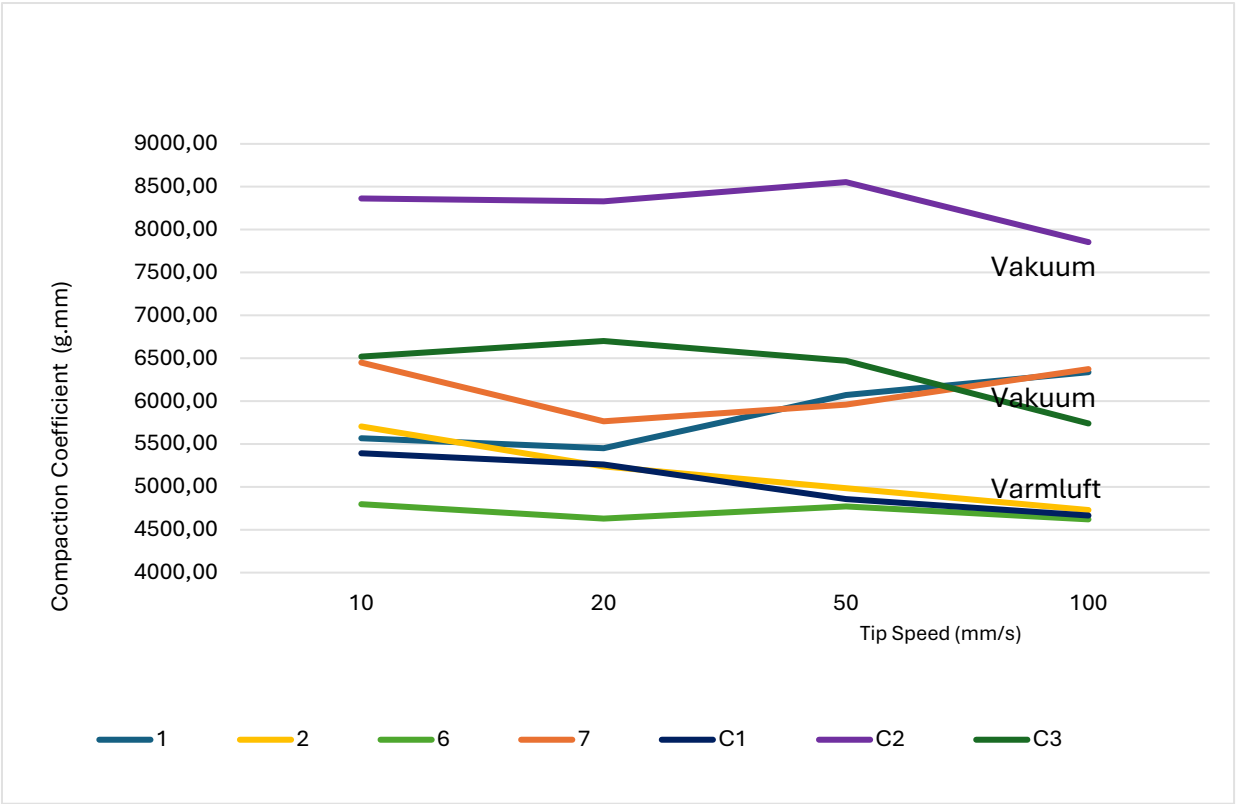
Tabell 5.11 Bulktetthet (n=3*), Viskositet ved 330 $s^{-1}$ (n=2), Cohesion index (n=3) Flow stability (n=3) and Mean cake strength (n=3; Mean ± S.E.M.) for fiskemelsprøver fra Kolmule

| | C1– LT tørket Karmsund (NMBU-merking: 121) | C2- Vakuumtørket (NMBU-merking: 126) | C3- Vakuumtørket (NMBU-merking: 131) | 1., 29.04.24 15:10, Vakuumtørket 2bar/G | 2., 29.04.24 15:30, Varmluftstørket, ikke møllet | 6., 29.04.24 Varmluftstørket, møllet | 7., 25.04.24 Vakuumtørket | *p*-verdi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bulktetthet* (g/L) | 580 ± 4$^{d}$ | 530 ± 5$^{c}$ | 517 ± 7$^{c}$ | 480$^{b}$ | 530$^{c}$ | 510$^{bc}$ | 440$^{a}$ | <0,0001 |
| Viskositet (Pa s) | 250 ± 17$^{a}$ | 372 ± 34$^{ab}$ | 417 ± 70$^{b}$ | 690 ± 1$^{c}$ | 353 ± 46$^{ab}$ | 301 ± 4$^{ab}$ | 1022 ± 15$^{d}$ | <0,0001 |
| Cohesion index (CI) | 12,0 ± 0,3$^{a}$ | 14,4 ± 0,1$^{b}$ | 14,6 ± 0,5$^{b}$ | 14,2 ± 0,7$^{b}$ | 14,2 ± 0,8$^{b}$ | 14,6 ± 0,4$^{b}$ | 14,6 ± 0,4$^{b}$ | <0,001 |
| Flow stability | 1,04 ± 0,03$^{ab}$ | 1,19 ± 0,13$^{b}$ | 1,08 ± 0,06$^{ab}$ | 1,00 ± 0,04$^{a}$ | 0,98 ± 0,03$^{a}$ | 1,01 ± 0,03$^{a}$ | 1,00 ± 0,06$^{a}$ | 0,02 |
| Mean cake strength (g) | 28 ± 5$^{a}$ | 237 ± 21$^{c}$ | 218 ± 8$^{c}$ | 171 ± 9$^{b}$ | 30 ± 3$^{a}$ | 22 ± 4$^{a}$ | 215 ± 9$^{c}$ | <0,0001 |

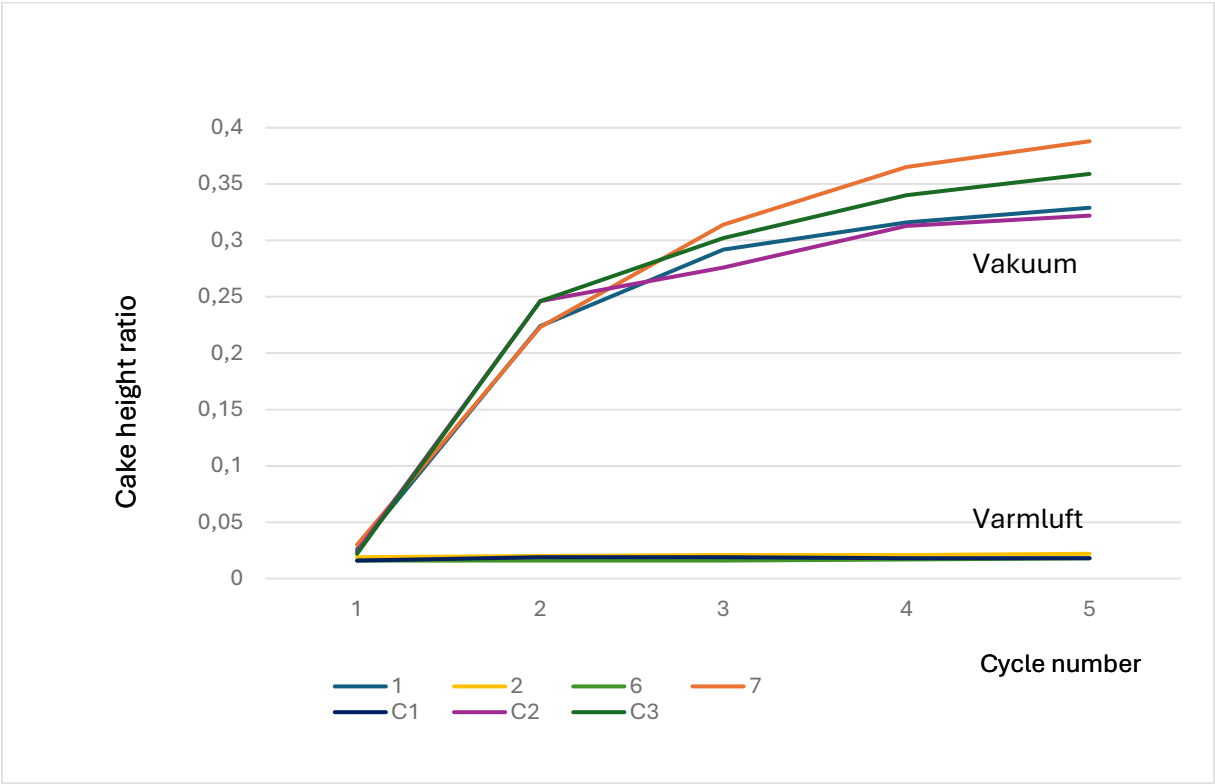
Énveis ANOVA. Verdier som ikke deler like bokstavindekser (superskripter) er signifikant forskjellige (P < 0,05), bestemt ved ANOVA etterfulgt av Tukeys post hoc test (OBS ikke gjentak på 2024 mel)
*Kun en måling på mel fra 2024 (1, 2, 6 og 7)




*Figur 5.10 Viskositetsprofiler for mel fra Kolmule*




*Figur 5.11 Powder Flow Speed Dependency (PFSD) test for mel fra Kolmule*




*Figur 5.12 Caking-test for mel fra Kolmule*

## 5.3 Sammenligning med eksisterende teknologi

- LT-mel produsert med varmluftstørking ble brukt som referanse.
- Ny teknologi viste potensial for bedre hygienisk produksjon, lavere oksidasjon, og redusert risiko for støveksplosjoner grunnet bruk av inert gass (overhetet damp eller vakuum).

## 5.4 Beslutningsgrunnlag for oppskalering

- Resultatene gir et godt grunnlag for vurdering av industriell implementering.
- Det er utarbeidet scenarier for integrering av høytemperatur varmepumper og MVR-teknologi.
- Teknologiene vurderes som aktuelle både for ny fabrikk og for oppgradering av eksisterende anlegg.

# 6 Diskusjon og vurdering

Prosjektet har vist at både flashtørking med overhetet damp og vakuumtørking har betydelig potensial for å forbedre energieffektiviteten i produksjon av høykvalitets fiskemel. Samtidig har det vært viktig å vurdere hvordan disse teknologiene påvirker produktkvaliteten, driftssikkerheten og mulighetene for industriell implementering.

## 6.1 Kjemisk og teknisk produktkvalitet

Den fibrige strukturen som oppstår ved flash- og vakuumtørking kan gi utfordringer ved lagring og transport, men kan også være fordelaktig for ekstruderingsprosessen og fysisk fôrkvalitet. Disse egenskapene kan optimaliseres gjennom pelletering og formaling.

De fysiske egenskapene til et fiskemel er viktige for håndtering, lagring og produksjon av fôr (Flesland et al. 2000; Samuelsen et al., 2013; 2014). Disse egenskapene påvirkes både av art og av valg og kombinasjon av tørketeknologier. Vakuum- og flashtørking er kjent for å gi fiskemel med en mer fibrig struktur og lavere bulktetthet sammenlignet med varmluftstørking (Samuelsen, 2015). Dette kan medføre praktiske utfordringer, blant annet redusert transport- og lagringskapasitet som følge av lav bulktetthet og tendens til «klogging» i transportkjeden grunnet den fibrige strukturen. På den annen side kan den fibrige strukturen gi et gunstig viskositetsbidrag under ekstrudering, noe som kan påvirke den fysiske kvaliteten på fôret positivt (Samuelsen et al., 2013).

Kjemiske variasjoner kan også påvirke de fysiske egenskapene til melene. Økt innhold av vann og vannløselig protein antas å kunne redusere flyteevnen, mens høyere nivåer av fett (innenfor normalområdet til fiskemel) og aske kan gi motsatt effekt. Det er imidlertid usikkert hvor stor betydning disse faktorene har innenfor variasjonsområdet som forekommer i de meltypene som inngår i dette studie, men vi antar at de fysiske egenskapene til melene har den største innvirkning på resultatene.

### 6.1.1 Bulktetthet

Høy bulktetthet i en ingrediens er gunstig for både transport og lagring. Når produktet opptar mindre volum, kan større mengder fraktes per enhet, og silokapasiteten ved en fôrfabrikk utnyttes mer

effektivt. Bulktetthet påvirkes blant annet av tørketeknologi, partikkelstørrelsesfordeling og partikkelform (Samuelsen, 2015). Basert på 25 kommersielle fiskemelprøver fra sild, tobis og kolmule produsert på ulike tørker i Norge, ble det registrert en bulktetthet på 385–610 g/L (gjennomsnitt 508 g/L) (Samuelsen, upubliserte data). Tørketypene rangerte fra lavest til høyest bulktetthet som følger: Hetland indirekte varmluftstørke < Dyno Jet indirekte varmluftstørke < indirekte vakuumtørke < flashtørke. Hetlandtørken ga dermed mel med lavest bulktetthet, mens flashtørking (mølletørke; Samuelsen 2015) ga høyest. Denne sammenhengen var tydelig for sildemel, men for tobis hadde tørketypen mindre å si på melets struktur, dvs. artsbetinget.

I dette prosjektet ble alle fiskemelene formalt på likt sold på møllen (1 mm) for å standardisere partikkelstørrelsesfordelingen så godt som mulig og de ulike artene ble vurdert separat. Tidligere undersøkelser viser at partikkelformen endres minimalt ved formaling (Samuelsen, upubliserte data). I tråd med tidligere resultater for både flash- og vakuumtørket mel, viste pilottørket mel signifikant lavest bulktetthet for samtlige tre arter i dette studiet. Observasjonen kan tilskrives en mer fibrøs struktur i melet, som vist i vedlegg 1 (visuelt tydeligst for kolmulemelene). Det fremkommer også at bulktettheten kan økes ved å justere prosessbetingelsene i pilottørkene, noe som kan knyttes til en redusert fiberstruktur. Dette illustreres blant annet for nordsjøsild, prøve B2 Tabell 5.9 og for kolmule, prøve C2 (Tabell 5.11).

Det pelleterte melet fra A1–Exergy-pilottørken (02.09.25) hadde en bulktetthet på om lag 650 g/L før formaling. Dette er høyere enn for alle de øvrige målte melene, og indikerer at pelletering etter sluttørking i en fiskemelsfabrikk kan være en gunstig løsning med tanke på både transport og utnyttelse av silokapasitet. Pelletstørrelsen i dette forsøket var imidlertid 12 mm, noe som overstiger det som er vanlig i industrien. Normale pellets ligger typisk i området 3–8 mm, og mindre pellets vil forventes å pakke enda bedre og dermed gi høyere bulktetthet. Ved formaling av det pelleterte melet på 1 mm sold fikk man et produkt med en bulktetthet på 527 g/L, noe som ligger nærmere referansemelenes nivå (Tabell 5.7). Til sammenligning hadde A1-melet før pelletering en bulktetthet på 412 g/L. Dette indikerer at pelletering kan redusere den fibrøse strukturen under nedmaling.

### 6.1.2 Viskositet

Økt viskositetsbidrag er positivt under fôrekstrudering. Høyere viskositet gir økte skjærkrefter i ekstruderen, noe som fører til bedre «koking» og sterkere drivkrefter for ekspansjon når massen ekspanderer over dysene. Etter tørking vil dette resultere i økt oljeopptak under vakuumcoating, samtidig som den fysiske fôrkvaliteten kan forbedres.

Figurene (Figur 5.4,Figur 5.7 og Figur 5.10) viser viskositeten til fiskemelene ved ulike skjærhastigheter. I likhet med andre stivelses- og proteiningredienser viser de en pseudoplastisk oppførsel (shear thinning) som kan beskrives med en power law modell. Dette gir tilnærmet rette linjer i et log–log-plot mellom viskositet og skjærhastighet, slik vi ser for samtlige fiskemelprøver. En tilsvarende oppførsel er tidligere observert for blant annet maisstivelse målt ved 110 °C og 21–33 % fuktighet (Vergnes og Villemarie, 1987) og for soyaproteinisolat ved 120 °C og 25–45 % fuktighet (Bengoechea et al., 2007).

I vårt tilfelle ser vi at linjene ikke krysser hverandre, noe som innebærer at fiskemel med høy viskositet beholder en høyere viskositet enn mel med lavere viskositet ved alle skjærhastigheter. Et unntak er B3-Exergy (Figur 5.7), som viser et markert fall i viskositet ved svært høye skjærrater. Dette kan skyldes

«wall slip», et fenomen som kan oppstå ved høye skjærhastigheter i et reometer. Dette har ingen betydning for vurdering av resultatene i dette studiet.

For å vurdere statistiske forskjeller mellom meltypene ble en skjærhastighet på 330 1/s valgt. Denne ligger nær de skjærhastighetene som typisk måles i dysene på Nofimas pilotekstruder (400–600 1/s). Resultatene i dette studiet bekrefter tidligere funn at mel med mer fibrig struktur gir høyere viskositet enn varmluftstørket mel. Dette mønsteret var gjennomgående for alle tre artene, der signifikant høyest viskositet ble observert i de pilottørkede melene. Dette kan bidra positivt på den termomekaniske bearbeidingen i ekstruderen. De kan nevnes i denne sammenheng at for kolmulemel kan en kombinasjon av høy viskositet, høyt askeinnhold og lavt fett gi prosessbetingelser som medfører for kraftig avflashing i dyseåpningene på en ekstruder, med påfølgende utfelling av kalsiumsalter og blokkering over tid (Oterhals & Garvik 1996). Selv om hovedårsaken til beleggdannelsen ble rapportert å være prosessbetingelsene som ble brukt, kan det ikke utelukkes at en kombinasjon av høy viskositet og høyt askeinnhold kan forsterke problemet. Tilsvarende det som ble sett for bulktetthet, viser resultatene at justering av tørkebetingelser i begge pilottørkene kan redusere fibrigheten til melene. Dette resulterer i viskositetsnivåer som i stor grad samsvarer med referansemelene, som også vist for nordsjøsild, prøve B2 (Tabell 5.9) og kolmule, prøve C2 (Tabell 5.11).

### 6.1.3 Flytegenskaper

### 6.1.4 Cohesion index (CI)

Kohesjon er et mål på den interne motstanden mellom pulverpartiklene, det vil si hvor lett pulveret flyter. Dette påvirkes av partikkelstørrelsesfordeling, form, overflatestruktur, partikkeltetthet, pakkings egenskaper samt innholdet av fuktighet og fett (Benković et al., 2013; Ambrose et al., 2016). Kohesjon skyldes hovedsakelig van der Waals krefter (Benković et al., 2013), altså interaksjoner mellom atomer eller molekyler på partikkelflatene, og er avhengig av avstanden mellom dem. Finere partikler og/eller høyere pakketetthet øker både kontaktoverflaten og van der Waals interaksjonene mellom partiklene. I dette prosjektet ble alle fiskemelene formalt på likt sold på møllen (1 mm) for å standardisere partikkelstørrelse så godt som mulig. Det antas derfor at målingene i vårt tilfelle i stor grad er en effekt av partiklenes struktur. Målt CI (forholdet mellom kohesjonskoeffisienten og prøvevekten) gir en indikasjon på pulverets flyteevne under transport og lagring. Lav indeks indikerer at pulveret er lettflytende og høy indikerer dårlig flyteevne til pulveret. En skala for pulverflyt basert på CI er gjengitt i *Tabell 6.1.* For brisling (Tabell 5.7) fremgår det at referansemelene er karakterisert som lettflytende, mens de pilottørkede melene viser en signifikant overgang til kohesivt og svært kohesivt materiale. For nordsjøsild ble samtlige melprøver klassifisert som kohesivt til svært kohesivt (Tabell 5.9). Forskjellene mellom prøvene var generelt små, men de pilottørkede melene hadde signifikant høyest kohesivitet. Kolmulemelene var hovedsakelig karakterisert som lettflytende til kohesive, med relativt små variasjoner mellom prøvene (Tabell 5.11). Det er lite erfaring om hvordan disse måleverdiene korrelerer med reell pulverflyt for fiskemel, men resultatene indikerer at økt oppmerksomhet bør rettes mot flytegenskaper ved mer fibrøse melstrukturer.

*Tabell 6.1 Pulver flytegenskaper basert på Cohesion Index (CI) (Benkovich and Bauman, 2009)*

| CI | Flytegenskaper |
|---|---|
| 19+ | Ekstremt kohesivt |
| 16-19 | Veldig kohesivt |
| 14-16 | Kohesivt |
| 11-14 | Lettflytende |
| 11 | Frittflytende |

Powder Flow Speed Dependency-testen måler kraften som kreves for å «skru» bladet ned i pulverkolonnen ved ulike hastigheter. Dette gir et mål på hvordan pulverets flyteegenskaper endrer seg når flythastigheten varierer. En økning i Compaction coefficient (g.mm) med stigende testhastighet indikerer at pulveret møter økt motstand mot flyt ved høyere hastigheter. Dersom koeffisienten er stabil eller bare endrer seg svakt, tyder det på at pulverets flytegenskaper i liten grad påvirkes av hastighetsøkning. Tilsvarende som for CI viser de pilottørkede melene de høyeste verdiene, noe som sannsynligvis kan knyttes til den mer fibrøse strukturen (Figur 5.5, Figur 5.8 og Figur 5.12). Videre observeres, i likhet med de foregående analysene, at overhetet damptørket nordsjøsild (prøve B2) har egenskaper som i større grad samsvarer med referansemelet.

Den høye og relativt flate kurven gjennom hele testforløpet for A1 (pelletert) kan skyldes det høye vanninnholdet. Tilsvarende kan de store variasjonene observert for B3 også være et resultat av forskjeller i vanninnhold.

### 6.1.5 Flow stability (FI)

Flow stability beregner forholdet mellom kompaksjonskoeffisienten i den første og siste kompresjonsfasen ved 10 mm/s og hvis den har en verdi nær 1 indikerer at pulverets egenskaper forblir tilnærmet uendret gjennom testen. Et avvik fra 1 tyder på at pulveret har endret karakter underveis, for eksempel som følge av partikkelslitasje eller nedbrytning av agglomerater. I våre forsøk ligger verdiene jevnt rundt 1 og dette indikerer at pulveret holder seg intakt under lagring og transport. Det var kun signifikante forskjeller for kolmule men variasjonen var imidlertid liten, og alle verdier lå rundt 1.

### 6.1.6 Caking

Partikkelbevegelse er nødvendig for at et pulver skal kunne flyte både i siloutløp og under transport. Caking reduserer denne bevegelsesfriheten. Caking innebærer tap av flyteevne fordi det dannes faste broer eller agglomerater mellom partiklene. Høye verdier indikerer kakedannelse og dermed redusert flyteevne etter for eksempel lagring, mens lave verdier viser at pulveret er mer lettflytende og tåler komprimering uten at strukturen «låser seg».

Oppsummert viser resultatene at caking-egenskapene påvirkes av melets fiberstruktur, som igjen er et resultat av valgt tørketeknologi. Samtidig viser målingene at caking-egenskapene kan forbedres ved å justere driftsparameterne i tørkeprosessen som for overhetet damptørket nordsjøsild (prøve B2; Figur 5.9). Caking kan elimineres ved pelletering av melet (*Tabell 5.6* og Figur 5.6), men optimalisering av tørkebetingelsene en mer kostnadseffektiv og en prosessmessig enklere strategi for å oppnå ønsket produktkvalitet.

## 6.2 Proteinfordøyelighet som markør

Resultatene fra Nofimas og NMBUs analyser viser at fiskemel produsert med ny teknologi har god proteinfordøyelighet og tekniske egenskaper som er relevante for fôrproduksjon.

## 6.3 Miljø og energibruk

Prosjektet har vist mulighetene for betydelig reduksjon i energiforbruk og utslipp ved å erstatte dagens varmluftstørker med mer energieffektiv tørketeknologi som vakuumtørker og tørker med overhetet damp. Spillvarme fra tørkeprosessen kan utnyttes direkte til koking av råstoff, noe som gir ytterligere energibesparelser. Dette åpner også for bruk av høytemperatur varmepumper og MVR-teknologi, som kan erstatte tradisjonelle dampkjeler.

## 6.4 Industriell implementering

Teknologiene som er testet er utviklet av leverandører med erfaring fra industriell tørking, og pilotanleggene har vist god driftssikkerhet. Resultatene gir et godt grunnlag for å jobbe videre mot oppskalering, og Pelagia vurderer implementering både i ny fabrikk og ved oppgradering av eksisterende anlegg.

# 7 Hovedfunn

- Begge tørketeknologiene (vakuum og overhetet damp) kan redusere energibehovet i fiskemelproduksjon med rundt 50 % sammenlignet med dagens LT-prosess.
- Teknologiene muliggjør betydelig reduksjon i $CO_2$- og NOx-utslipp, særlig ved effektiv utnyttelse av spillvarme og integrasjon med varmepumper og MVR.
- Produktkvalitet (proteinfordøyelighet) opprettholdes på nivå med LT-mel ved begge teknologier, med ingen signifikante forskjeller i de fleste tester.
- Ny tørketeknologi gir fiskemel med lavere bulktetthet og mer fibrig struktur, som kan gi utfordringer i logistikk, men også forbedre egenskaper i ekstrudering
- Resultatene gir et godt beslutningsgrunnlag for industriell implementering, særlig for vakuumtørking, mens overhetet damp anbefales videre pilotering i større skala.

# 8 Leveranser

15.01.2024 - Referat fra oppstartmøte med referansegruppen med gjennomgang av prosjektplanen
- 30.08.2024 - Referat fra møte i referansegruppen
- 20.08.2024 - Statusrapport 1
- 19.12.2024 - Referat fra møte i referansegruppen
- 20.01.2025 - Statusrapport 2
- 15.06.2025 - Referat fra møte i referansegruppen
- 25.08.2025 - Referat fra møte i referansegruppen
- 20.09.2025 - Statusrapport 3

• 15.06.2026 - Referat fra avslutningsmøte i referansegruppen med gjennomgang av utkast til sluttrapport
• 15.01.2026 - Faktaark og nyhetsbrev (under bearbeding)
• 15.01.2026 - Foredrag på pelagisk arena (aktuelt for januar 2027)
• 15.09.2026 - Administrativ sluttrapport i tråd med FHFs retningslinjer
• 15.09.2026 - Faglig sluttrapport i hht FHFs retningslinjer

# 9 Konklusjoner og anbefalinger

Prosjektet har vist at pneumatisk tørking (flashtørking) med overhetet damp og vakuumtørking kan gi betydelige forbedringer i energieffektivitet og reduksjon av $CO_2$-utslipp ved produksjon av høykvalitets fiskemel.

Ved å utnytte spillvarme fra tørkeprosessen til oppvarming (koking) av fiskeråstoff, samt integrere høytemperatur varmepumper og MVR-teknologi, kan energibruk og utslipp reduseres ytterligere. Prosjektet har også bidratt til økt forståelse av hvordan disse tørketeknologiene påvirker tekniske egenskaper og ekstruderbarhet, som er avgjørende for videre bruk i fiskefôrproduksjon.

Resultatene gir et godt beslutningsgrunnlag for industriell implementering, og teknologiene vurderes som aktuelle både for nye anlegg og for oppgradering av eksisterende fabrikker.

Flash- og vakuumtørking gir fiskemel med en mer fibrig struktur. Dette kan medføre utfordringer knyttet til lagring og transport, men samtidig gi fordeler i ekstruderingsprosessen. Selv om antall tester per råstofftype har vært begrenset, viser resultatene et tydelig potensial for optimalisering mot egenskaper nærmere referansemel (LT). Forsøkene indikerer også at pelletering kan forbedre pulveregenskapene og representerer en mulig strategi for å håndtere strukturrelaterte utfordringer.

De anvendte metodene for analyse av bulktetthet og pulverflyt er effektive og relativt enkle å gjennomføre og dermed godt egnet for å dokumentere effekter av tørketeknologi og prosessbetingelser. Samtidig er det behov for økt kunnskap om hvordan disse parameterne korrelerer med faktisk håndtering i industriell skala. Dette bør følges opp i videre arbeid.

Proteinfordøyelighet målt med mink og ilder ved NMBU er brukt som indikator på varmebelastning under tørking. Selv om overgang til ilder som forsøksdyr har gitt noe lavere absoluttnivåer og større variasjon, viser sammenligninger med LT-mel og tidligere studier at begge de testede teknologiene kan opprettholde høy produktkvalitet.

Pneumatisk tørking med overhetet damp gir svært kort tørketid, noe som bidrar til å bevare proteinfordøyeligheten til tross for høy temperatur. Dette er i tråd med tidligere studier. Vakuumtørking gir også god bevaring av proteinfordøyelighet ved lave temperaturer (ca. 70 °C), og fremstår som en aktuell løsning for energieffektiv produksjon av fiskemel av høy kvalitet.

Samlet sett vurderes begge teknologiene som relevante alternativer til dagens varmluftstørker, med potensial for mer bærekraftig og energieffektiv produksjon.

# 10 Referanser


Ambrose, R.P.K., Jan, S., Siliveru, K. (2016) A review on flow characterization methods for cereal grain-based powders. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 359–364.

Bengoechea, C., Arrachid, A., Guerrero, A., Hill, S.E., Mitchell, J.R. (2007) Relationship between the glass transition temperature and the melt flow behavior for gluten, casein and soya. *Journal of Cereal Science*, 45, 275-284.

Benkovic, M., Bauman, I. (2009) Flow properties of commercial infant formula powders. International Journal of Biological, *Life and Agricultural Sciences*, 3, 332-336.

Benković, M., Srečec, S., Špoljarić, I., Mršić, G., Bauman, I. (2013) Flow properties of commonly used food powders and their mixtures. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 2525–2537.

Flesland, O, Høstmark, Ø, Samuelsen, TA, Oterhals, Å. (2000) Selecting drying technology for the production of fishmeal, In: Proceedings of the 12th International Drying Symposium, IDS2000 (Kerkof, P.J.A.M., Coumans, W.J. & Mooiweer, G.D. eds.). Professional paper no. 177, pp. 10, Nordwijkerhout, The Netherlands

Høstmark, Ø., Flesland, O., Mjelde, A. (2002) Mill drying of fishmeal in superheated steam. In Drying 2002 - Proceedings of the 13th International Drying Symposium (Cao, C.W., Pan, Y.K., Liu, X.D., Qu, Y.X. eds.) pp. 1550-1555. Vol. C. Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China.

Landillon, V., Cassan, D., Morel, M.H., Cuq, B. (2008) Flowability, cohesive and granulation properties of wheat powders, *Journal of Food Engineering*, 86, 178-193.

Nygård, E., Harald Mundheim, H., Mjelde, A. (1988) Oppsummering av prosjekt 113 «Tørking – vurdering av teknikk og prinsipp for skånsom og økonomisk fiskemeltørking», SSF-rapport H-84.

Oterhals Å., Garvik A. (1996) Beleggdannelse i ekstruder: Kjemisk sammensetning og tentative mekanisme for dannelse. SSF-rapport B-554.

Oterhals, Å., Samuelsen, T.A. (2015) Plasticization effect of solubles in fishmeal. *Food Research International*, 69, 313-321

Samuelsen T.A., Mjøs S.A., Oterhals, Å. (2014) Influence of type of raw material on fishmeal physicochemical properties, the extrusion process, starch gelatinization, and physical quality of fish feed. *Aquaculture Nutrition*, 20, 410-420.

Samuelsen, T.A., Høstmark, Ø., Oterhals, Å. (2015) Tørking av marint råstoff med overhetet damp, Fase 1: Kunnskapsstatus, Nofima rapport nr. 23, 2015. FHF-prosjekt nr.900948.

Samuelsen, T.A. (2015) Fishmeal physicochemical properties – Impact on the fish feed extrusion process, phase transitions and physical pellet quality. PhD thesis, Department of Chemistry, University of Bergen, Norway. ISBN: 978-82-308-2594-5.

Samuelsen, T.A., Høstmark, Ø., Oterhals, Å. (2015) Tørking av marint råstoff med overhetet damp. Fase 1 - Kunnskapsstatus. Nofima rapportserie 23/2015.

Samuelsen, T.A., Mjøs, S.A., Oterhals, Å. (2013) Impact of variability in fishmeal physicochemical properties on the extrusion process, starch gelatinization and pellet durability and hardness. *Animal Feed Science and Technology*, 179, 77-84.

Samuelsen, T.A., Oterhals, Å. (2016) Water-soluble protein level in fishmeal affects extrusion behavior, phase transitions, and physical quality of feed. *Aquaculture Nutrition*, 22, 120-133.

Schramm, G. (2000) A Practical Approach to Rheology and Rheometry. 2nd edn, pp. 291. Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe, Germany.

Skrede, A. (1979) Utilization of fish and animal byproducts in mink nutrition. IV. Fecal excretion and digestibility of nitrogen and amino acids by mink fed cod (Gadus morhua) fillet or meat-and-bone meal. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 29: 241–257

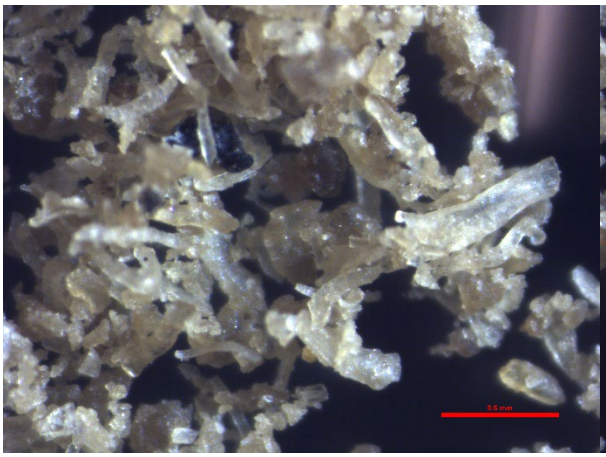
Vergnes, B., Villemaire J.P. (1987) Rheological behaviour of low moisture molten maize starch. *Rheologica Acta*, 26, 570-576.

# 11 Vedlegg 1

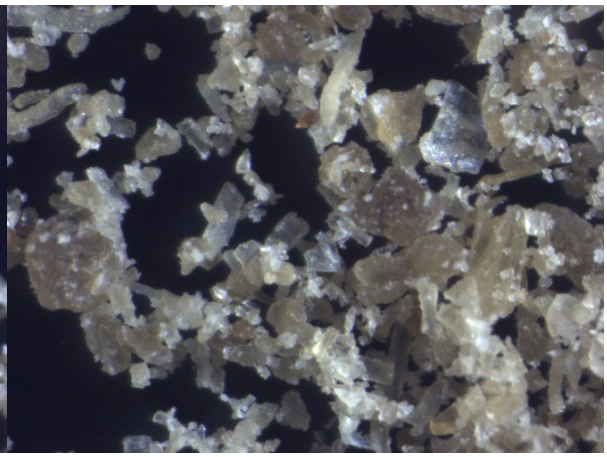
Et Nikon Stereo Mikroskop (Model SMZ1270, Nikon Europe B.V., Amstelveen, The Netherlands ble brukt for visuelt å vurdere forskjellene i struktur hos de ulike fiskemelene. Den røde markeringen på første bilde tilsvarer 0,5 mm. Alle bildene har lik forstørrelse.

Brisling (Exergy overhetet damptørke)

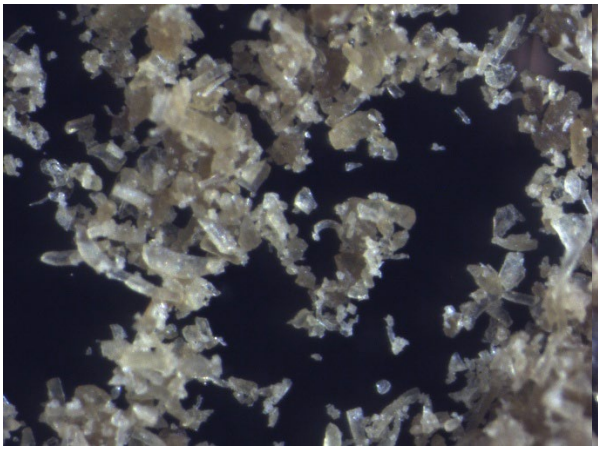
A1-Exergy pilottørke (02.09.25)



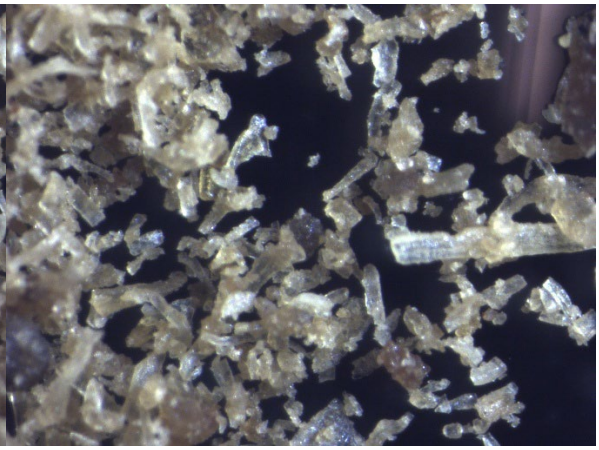
A2-LT mel (02.09.25)



A3-LT-referanseprøve 25/002 (01.10.25)

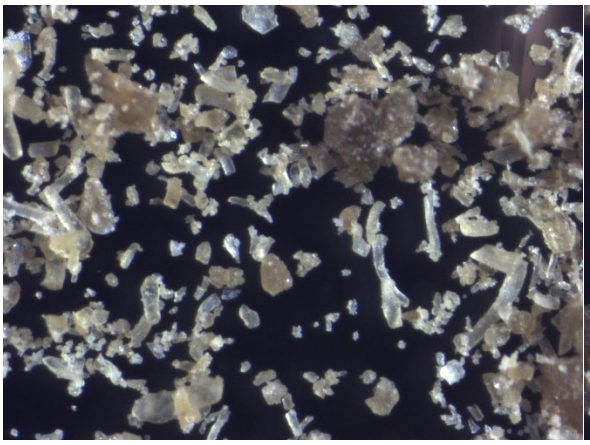


A4-Swedish Exergy pilottørke 25/006

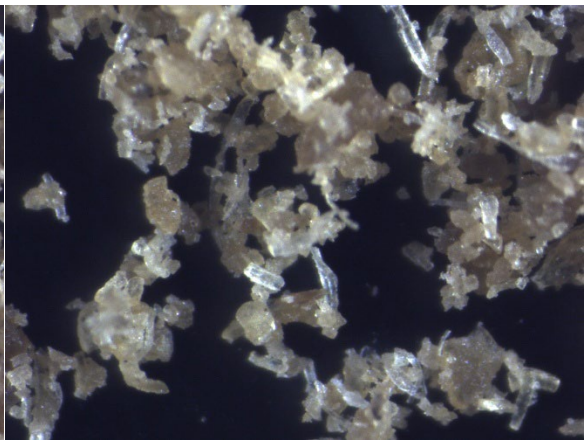


Nordsjøsild (Exergy overhetet damptørke)

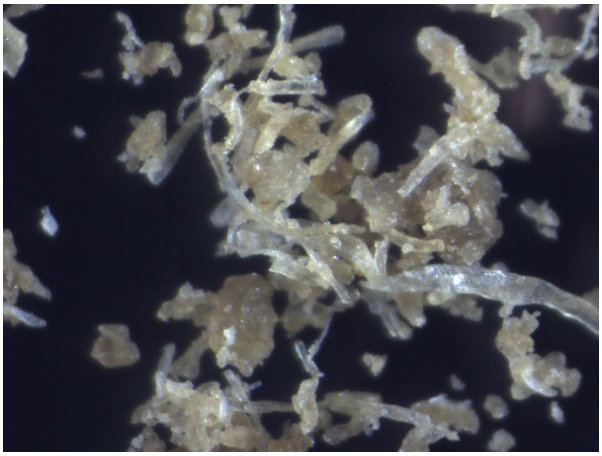
B1- Ref LT 25/002



B2-Exergy 25/010

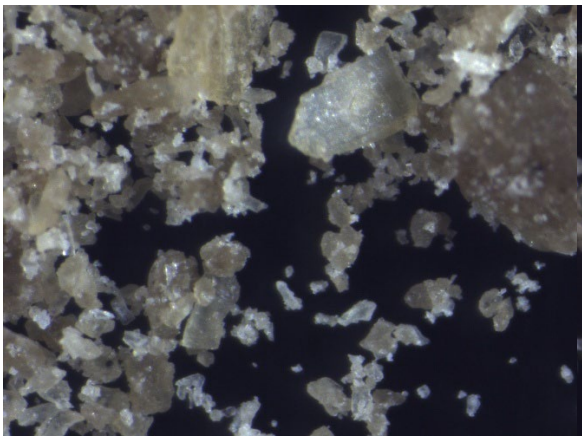


B3-S.test 25/011

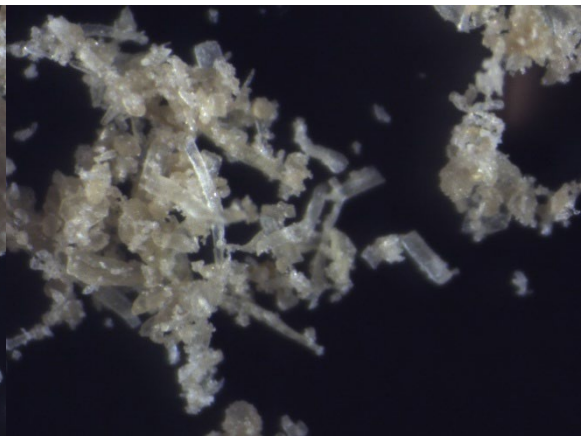


Kolmule (Vakuumdisktørke)

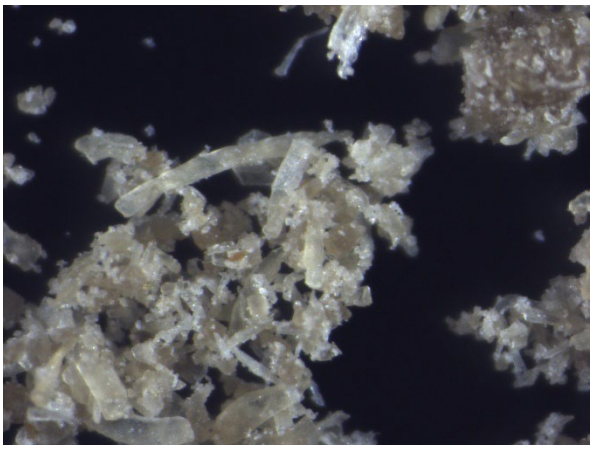
C1-LT tørket Karmsund



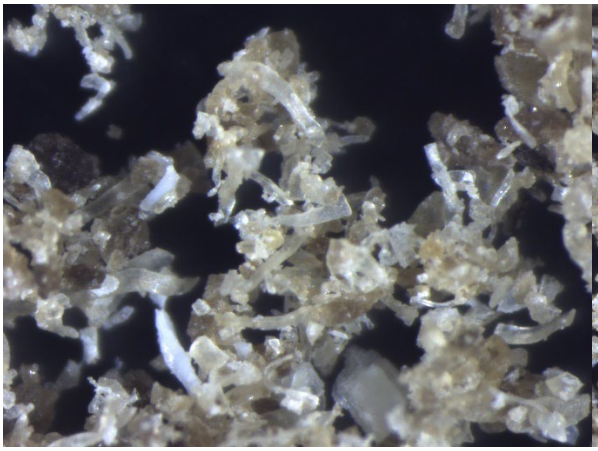
C2-Vakuumtørket



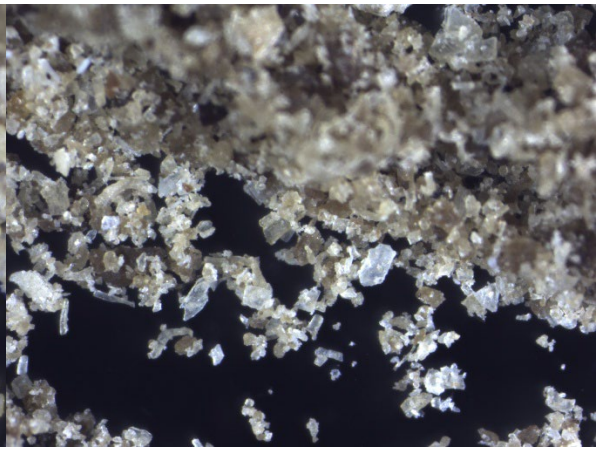
C3-Vakuumtørket



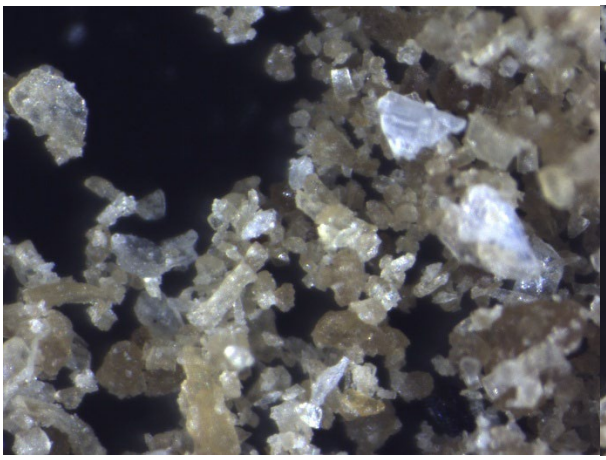
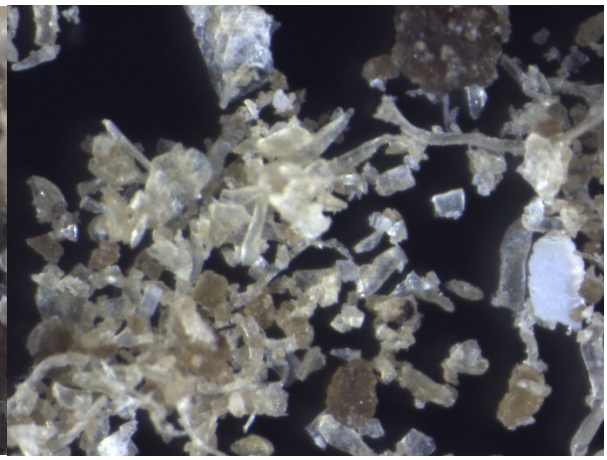
1-29.04.24 15:10, Vakuumtørket 2bar/G



2-29.04.24 15:30, Varmluftstørket, ikke møllet



6-29.04.24 Varmluftstørket, møllet



7-25.04.24 Vakuumtørket