

www.sintef.no



**SINTEF Energiforskning AS**

Postadresse: 7465 Trondheim  
Resepsjon: Sem Sælands vei 11  
Telefon: 73 59 72 00  
Telefaks: 73 59 72 50

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:  
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

**Laboratoriemåling med vakuomtørke i Avvanningslaboratoriet**

SAKSBEARBEIDER(E)

Per Magne Walde og Ola Jonassen

OPPDRAKSGIVER(E)

Fiskeri – og Havbruksnæringens Servicekontor - Bacalao Forum

TR NR.

DATO

OPPDRAKSGIVER(E)S REF.

PROSJEKTNR.

\* TRF6610 \*

2007-12-13

Finn-Arne Egeness

16X543.04

ELEKTRONISK ARKIVKODE

PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.)

GRADERING

Ola M. Magnussen *Ola M. Magnussen*

Fortrolig

ISBN NR.

RAPPORTTYPE

FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.)

OPPLAG

SIDER

978-82-594-3345-9

Inge R. Gran *Inge R. Gran*

28

AVDELING

BESØKSADRESSE

LOKAL TELEFAKS

Energiprosesser

Kolbjørn Hejes veg 1D

73593950

RESULTAT (sammendrag)

**Sammendrag:**

Dette forsøket er gjort for å finne ut om tørketiden for klippfisk kan nedkortes i vesentlig grad ved vakuomtørking. Ut fra litteraturdata og enkel modellering ble det i forprosjekt nye tørkesystemer antydnet reduksjon fra 70 til 12 timer for å tørke saltfisk til klippfisk. For å kunne bruke kontinuerlige bandtørker, er det ønskelig med ytterligere reduksjon av tørketiden. Hvorvidt dette er mulig, skal undersøkes i dette forsøket.

Det er skissert tørking ved ulike trykk, 40, 60, 100 og 200 millibar. Mellom 40 og 60 millibar skal effekten av fordampningstørking, dvs. over kokepunktet, testes. Ved 100 og 200 mbar skal effekten av konveksjon, ved viftepåtrykk, testes.

- Kan tørkingen skje så raskt at en bandtørke kan realiseres?
- Hvordan kan en slik tørke evt. bygges?

Liknende tørker tilbys for tre – tørking. Inn – og utmatningssluser er tilgjengelige bl.a. fra vakuums frysetørking av næringsmidler bl.a. kontinuerlig frysetørke fra Convac.

Viftepåtrykk ble funnet å gi merkbar økning i tørkehastigheten.

Det ble funnet at saltfisk kan tørkes på 24 timer ved 40 mbar og 30 – 40 % relativ luftfuktighet.

Teoretisk er det beregnet at tørketiden kan bringes ned mot 12 timer ved mer optimal design.

Ytterligere nedkorting kan bare gjøres ved sterkere vakuumbetning kombinert med nøyaktig temperaturstyring av tørkegodset.

\* Rapporten er åpnet 2008-02-06\*

**STIKKORD**

EGENVALGTE

Klippfisk

Vakuomtørking

Tørkehastighet

Prosessovervåking

## INNHALDSFORTEGNELSE

		Side
1	INNLEDNING.....	4
1.1	Teoretisk bakgrunn.....	4
1.2	Betraktninger omkring luftfuktighet ved vakuum.....	4
2	MÅL:.....	8
2.1	industriell erfaring:.....	8
2.2	Tørkehastighet ved vakuum .....	9
2.3	Tilnærming .....	10
2.4	Valg av forsøksdesign .....	11
3	MATERIALER OG METODER.....	12
4	APPARATOPPSTILLING .....	13
5	FORSØKSPLAN: .....	15
5.1	Prøve 1 .....	15
5.2	Prøve 2 .....	15
5.3	Prøve 3 .....	15
5.4	Prøve 4 .....	15
5.5	Prøve 5 .....	15
6	MÅLEMETODER .....	16
7	RESULTAT OG DISKUSJON.....	17
7.1	prøve 1: 40 mbar med vifte .....	17
7.2	prøve 2: 100 mbar med vifte .....	19
7.3	prøve 3: 100 mbar uten vifte .....	20
7.4	prøve 4: 200 mbar med vifte .....	21
7.5	prøve 5: 200 mbar uten vifte .....	23
7.6	Oppsummering av kjøringene .....	24
8	KONKLUSJON .....	27
	REFERANSER .....	28

## FIGURLISTE

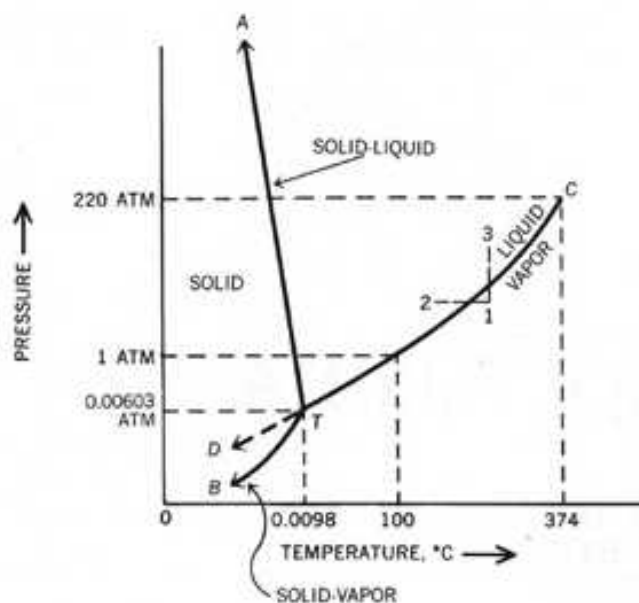
Figur 1 Fasediagram for vann.....	4
Figur 2 Drivende kraft som funksjon av tørkegodsets temperatur ved dampfelletemperatur -100 og -40 °C. Damptrykket i tørkesonen er 76 % av metningstrykket ved den rådende temperatur. 5	
Figur 3 Metningstemperatur for vanddamp som funksjon av trykk.....	6
Figur 4 Grafisk løsning av (7.31) Etter Krischer & Kast, 1978. Den rette linjen b representerer venstre side og parablene a1, a2 og a3 representerer høyre side ved hhv. 1, 0,1 og 0,01 bar. Hovedaksene er tørkehastighet (y) som funksjon av temperatur. ....	7
Figur 5. Konsentrasjon av vann per enhet saltfritt tørrstoff som funksjon av tørketiden i timer. Heltrukket kurve er modell ved 200 mbar, mens punktene er eksperimentelt utledede verdier,	

målt ved atmosfærestrykk. Horisontal linje angir konsentrasjon for ferdig klippfisk, 47% vanninnhold på fuktig basis.....	9
Figur 6 Fasediagram for vann. Trippelpunktet for vann er 6,2 mbar, 0,01 C .....	10
Figur 7 Vakuumbandtørke med varmepumpeprosess .....	11
Figur 8 Analyseverdier for klippfisk som funksjon av vektendring, her vist for et 500 grams stykke med vanninnhold 60 %, saltinnhold 19 % og saltfritt tørrstoff (SFTS) 21 % og de endringene i analyse som følger av vekttapet under tørking. Beregnede verdier under den forutsetning at alt massetap er vann. ....	12
Figur 9 Vakuumbandtørke ved Avvanningslaboratoriet.....	13
Figur 10. Modifikasjoner av vakuumbandtørke ved Avvanningslaboratoriet .....	14
Figur 11 Vakuumbandtørke i % ved 40 mbar, med vifte .....	17
Figur 12 Overflate – og kjernetemperatur, relativ luftfuktighet, lufttemperatur og tørkehastighet ved 40 mbar, med vifte.....	18
Figur 13 Vakuumbandtørke ved 100 mbar med vifte.....	19
Figur 14 Relativ luftfuktighet, temperaturer og tørkehastighet ved 100 mbar, med vifte.....	19
Figur 15 Vakuumbandtørke i % ved 100 mbar uten vifte, over tid i timer. ....	20
Figur 16 Tørkehastighet ved 100 mbar, uten vifte .....	21
Figur 17 Vakuumbandtørke i % ved 200 mbar med vifte over tid i timer. Fall i vakuumbandtørke er forårsaket av uttak av fisk til vektmålinger. ....	21
Figur 18 Relativ luftfuktighet, lufttemperatur og tørkehastighet ved 200 mbar med vifte over tid i timer.....	22
Figur 19 Vakuumbandtørke i % ved 200 mbar uten vifte. Den horisontale linjen viser regulering rundt 200 mbar, avbrutt av manuell vakuumpumpestans, utlikning av trykk og åpning av dør, vist som fall i vakuumbandtørke, eller alternativt trykkstigning til atmosfærestrykk.....	23
Figur 20 Relativ luftfuktighet og lufttemperatur, overflatetemperatur og kjernetemperatur, samt tørkehastighet ved vakuumbandtørke ved 200 mbar uten vifte.0.....	23
Figur 21 Sammenheng mellom maksimal tørkehastighet i g/h, 100g SFTS og trykk i mbar for tørking med og uten vifte, resp. mv og uv.....	24
Figur 22 Vektutvikling ved de ulike tørkeprosessene i forhold til startvekt = 1 .....	25
Figur 23 Oppnådd vanninnhold etter 24 timer i vakuumbandtørke for ulike tørkeforhold. ....	26

## 1 INNLEDNING

### 1.1 TEORETISK BAKGRUNN

Frysetørking under vakuum (lyofilisering) gjøres ved å fryse produktet, sette det under vakuum (lavere enn trippelpunktets trykk 0,0063 atm) og tilføre varme nok til å holde en stabil produkttemperatur på et tilsiktet nivå (-20 C eller lavere). Vanndamp vil da sublimere fra produktet og bli fanget opp av frysefellen. Drivende kraft er vanndampens partialtrykk i produktet minus vanndampens metningstrykk i frysefellen



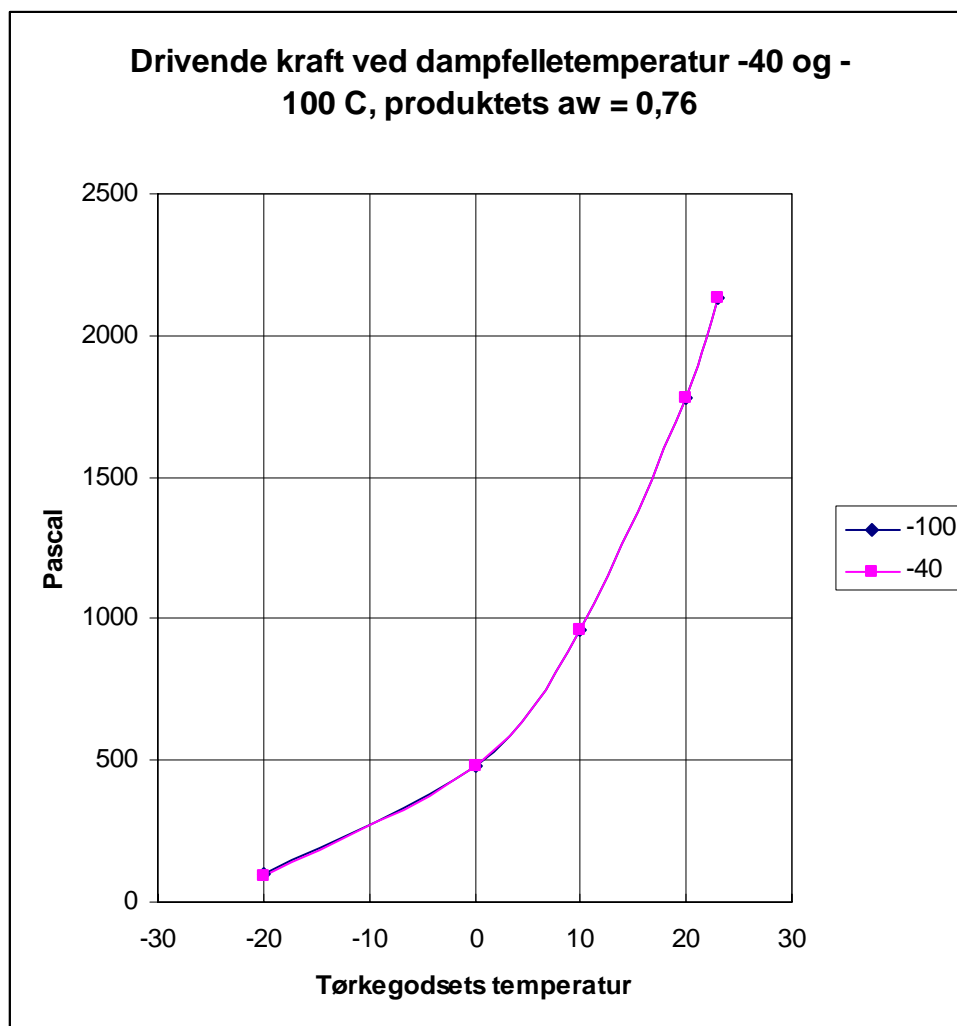
**Figur 1 Fasediagram for vann**

### 1.2 BETRAKTNINGER OMKRING LUFTFUKTIGHET VED VAKUUM

Vanndampens metningstrykk er en funksjon av temperatur (– effekten av trykk er neglisjerbar). Vanndampens partialtrykk kan ikke overstige totaltrykket. Den drivende kraft ved frysetørking kan tilnærmet settes lik (Rindler et al, 1998) differansen mellom vanndamptrykket ved produktoverflaten minus vanndamptrykket i kondensasjonsfellen (metningstrykk ved kondensasjonstemperaturen). Vannaktiviteten til saltfisk og klippfisk er tilnærmet lik 0,76 – derfor settes vanndamptrykket ved overflaten lik metningstrykk ved rådende temperatur ganger 0,76.

**Tabell 1 Vanndamptrykk i Pascal, ved ulike forhold. Etter Vaisala Humidity Calculator.**

Tørkegoods temp. °C	-20	0	10	20	23
Partialtrykk $a_w = 0,76$ , Pa	95,48	481,29	963,68	1778,17	2135,42
Metningstrykk – 40 °C, Pa	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Metningstrykk – 100 °C, Pa	0,00004	0,0004	0,00004	0,00004	0,00004



**Figur 2 Drivende kraft som funksjon av tørkegodsets temperatur ved dampfelletemperatur -100 og -40 °C. Damptrykket i tørkesonen er 76 % av metningstrykket ved den rådende temperatur.**

Den drivende kraft er sterkt avhengig av tørkegodsets temperatur, og knapt influert av dampfellestemperatur

### Vakuumbørking (NTI)

Ved vakuumbørking utnyttes prinsippet om at vannets kokepunkt synker ved avtagende trykk. Fordampning av vann fra trelasten skjer dermed raskere og ved lavere temperatur enn ved konvensjonell tørking.

Det opereres vanligvis med et trykknivå på 5-40 MPa, som gir et kokepunkt for vann på 35 °C til 75 °C. Tørketiden reduseres betydelig i forhold til konvensjonell tørking.

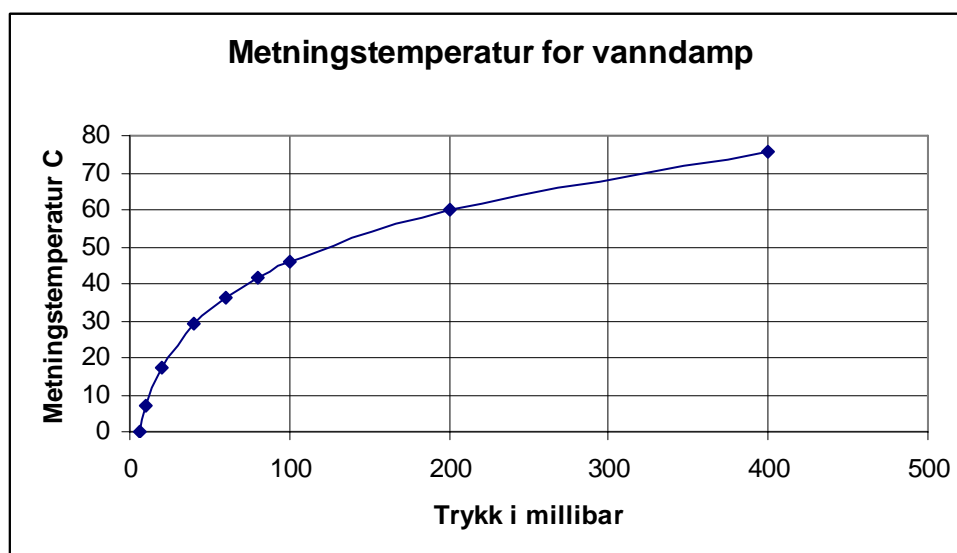
O. Krischer og W. Kast (1978) bruker følgende klassifisering av tørkeprosesser:

Fordunstingstørking er tørking hvor en varmebærer (for eksempel luftstrøm) med temperatur lavere enn kokepunktet passerer produktet. De fleste atmosfæriske tørker er fordunstingstørker.

Fordampingstørking er tørking hvor en varmebærer med temperatur over kokepunktet passerer produktet. Vakuumbørker bygger på dette prinsippet, da kokepunktet reduseres med fallende trykk. Varmetilførselen må gjerne skje med bruk av kontakt eller stråling for å kunne opprettholde fordampingen.

Sublimasjonstørking, ofte kalt "Frysetørking" krever at produktet holdes under sin trippelpunktstilstand, dvs. 0,0098 °C og 6,1 mbar eller 610 Pa. Et fullsaltet produkt som saltfisk inneholder mettet saltlake, og at frysepunktet eller eutektisk temperatur er senket til -21,2 °C. Sublimasjonstørking av saltfisk blir derfor krevende, men på ingen måte umulig. Ventelig vil produktet bli forandret grunnet bortfall av flytende transport, og skorpedannelse på overflaten uteblir. Saltskorpen er til en viss grad en tilsiktet egenskap, og gjør produktet hvitere.

En vil derfor undersøke fordunstnings- og fordampingstørking av saltfisk.

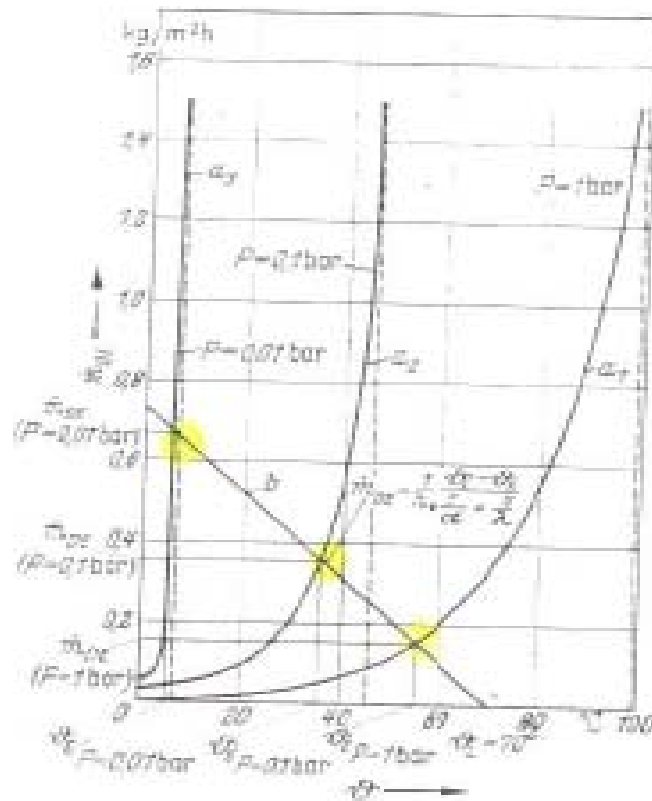


**Figur 3 Metningstemperatur for vanndamp som funksjon av trykk.**

Ut fra ønske om en høy drivende kraft og samtidig hensyn til varmedenaturering av produktet (over 23 °C), velges en temperatur ca 20 °C. Det tilsvarer et trykk i overkant av 20 mbar

Likning 7.3.1 (ibid) uttrykker en massebalanse der venstre side uttrykker ekvivalent fordampingsvarme og høyre side uttrykker motstanden mot den samme massestrømmen gjennom et porøst sjikt med tykkelse  $s$ .

$$\frac{1}{h_v} \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda}} (\vartheta_L - \vartheta_E) = \frac{P}{R_D T} \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{\mu s}{\delta}} \cdot \ln \frac{P - P_{DL}}{P - P_{DE}} \quad (7.31)$$



Figur 4 Grafisk løsning av (7.31) Etter Krischer & Kast, 1978. Den rette linjen b representerer venstre side og parablene a1, a2 og a3 representerer høyre side ved hhv. 1, 0,1 og 0,01 bar. Hovedaksene er tørkehastighet (y) som funksjon av temperatur.



## 2 MÅL:

Viktige mål i prosjektet *Fremtidens klippfiskanlegg* er å redusere bemanningskostnaden og styre tørkeprosessen. En tilnærming er å mekanisere tørkeprosessen og oppnå en lineær tørkeprosess, eksempelvis i form av en båndtørke. For å oppnå en realiserbar lengde på båndet, må tørketiden vesentlig reduseres fra de 3 – 4 døgn som nyttes i dag, helst ned mot 4-5 timer. Vakuamtørking er et alternativ for å øke tørkehastigheten, men det finnes lite eller ingenting av litteratur om vakuamtørking av saltfisk til klippfisk.

Målet med dette arbeidet er å avklare hvorvidt vakuamtørking gir en reduksjon av tørketiden som kan gjøre båndtørke aktuell. Dette kan avleses i form av tørketid for et relevant prøvestykke, fra et typisk råstoff - vanninnhold til et typisk produkt – vanninnhold.

### 2.1 INDUSTRIELL ERFARING:

Opel Vacudry leverer vakuamtørker for trevirke, med trykk i området 60 – 200 mbar, og med indre sirkulasjonsvifter. Trevirke med 30 mm tykkelse tørkes på ca 1 døgn. Disse tørkene er batchtørker, men det finnes også kontinuerlige vakuamtørker, bl.a. fra Atlas (Convac) og Bucher. Kontinuerlige vakuamtørker trenger sluser for inn og utmatning, og disse blir dyrere jo lavere trykket er.

Ademe leverer en kontinuerlig vakuum frysetørke for vogner, med trykkområde fra 10 til 300 Pa (0,1 til 3 mbar), der slusene holder en vogn ved innmatning og en vogn ved utmatning. Tørketid er i området 10 til 72 timer, avhengig av produkt, men da tørkes til en sluttfuktighet mellom 5 og 10 %.

I samråd med oppdragsgiver ble vi enig om å fokusere på området 40 til 200 mbar, og få et innledende bilde av hvilke tørketider som var innen rekkevidde.

#### **Vakuamtørking:**

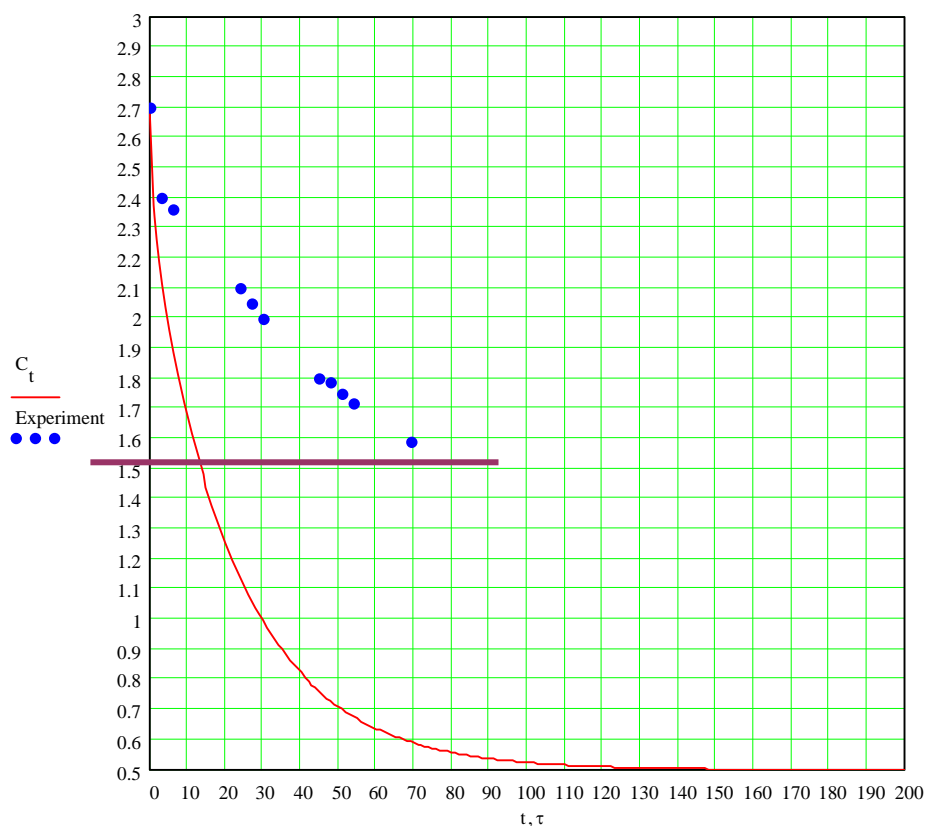
Vakuum frysetørking skjer ved trykk lavere enn 6 mbar (4,6 Torr, som er vannets trippelpunkt). GEA – Niro tilbyr kontinuerlige vakuum frysetørker (Atlas Convac) som kan operere i dette området. Inn og utmatningsteknologi for kontinuerlige vakuamtørker er altså tilgjengelig. En produsent av vakuamtørker (Peter Stette AS) for betongkomponenter med har foreslått å tørke klippfisk i en slik tørke, med bruk av mikrobølgeenergi til varmetilsats. En kontinuerlig variant kan operere rundt 80 % vakuum. Det tilsvarer et absolutt trykk i tørken på rundt 200 mbar, eller 20 kPa. Dette resttrykket er så vidt høyt at begrepet vakuum egentlig ikke er dekkende. Videre er det mulig å operere en konvektiv tørkeprosess under det aktuelle trykket, slik at varmeovergangstill og transportforhold i dampfasen kan forbedres vesentlig.

En søker med andre ord en kombinasjon av vakuamtørkingens høye diffusjonskoeffisient og den konvekative tørkens gode ytre transportforhold

For å verifisere hypotesen ble det kjørt et antall forsøk i laboratoriet ved SINTEF Energiforskning AS. Her ble graden av vakuum variert, og effekten av vifte ble undersøkt ved samme trykk. Vektreduksjon på fiskestykkene ble målt, likedan temperatur i luft og produkt, og relativ luftfuktighet.

## 2.2 TØRKEHASTIGHET VED VAKUUM

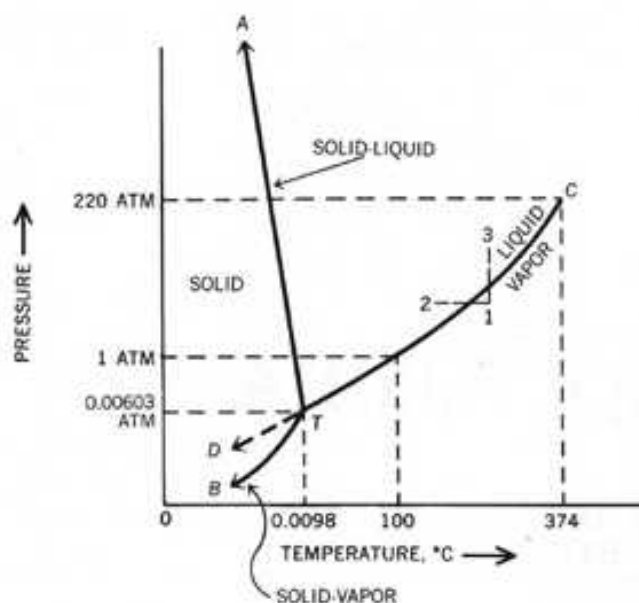
Som det framgår av Figur 3, avtar diffusjonskoeffisienten ved økende trykk. Judson King (1960) har undersøkt frysetørking av kalkun og har målt diffusjonskoeffisienten til å være i størrelsesorden  $0,15-0,19 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  på tvers av fiberretningen, mot 0,5-0,6 på langs av fiberretningen. Diffusjonskoeffisienten vil bli ca. 6 doblet ved trykkfall fra 100 til 20 % av atmosfæretrykket (Målt ved tørking i nitrogen).



**Figur 5. Konsentrasjon av vann per enhet saltfritt tørrstoff som funksjon av tørketiden i timer. Heltrukket kurve er modell ved 200 mbar, mens punktene er eksperimentelt utledede verdier, målt ved atmosfærestrykk. Horisontal linje angir konsentrasjon for ferdig klippfisk, 47% vanninnhold på fuktig basis.**

Konsekvensen av 6 – doblet diffusjonskoeffisient sammenliknet med målte verdier for tørking av saltfilet, er vist i Figur 2 som konsentrasjon av vann per enhet saltfritt tørrstoff (SFTS). Tiden til klippfisk tørrhetsgrad vil bli redusert fra 70 til ca. 12 timer, en reduksjon av vanninnhold fra 58 til 47 % våt basis (2,8 til 1, 57 g/g SFTS).

Som vist i figur 1, vil senking av trykket til 20000 Pa (0,2 Bar, eller om lag 80 % vakuum) redusere tørketiden vesentlig, men ikke nok til at bandtørker blir aktuelle. Innledende forsøk i vakuumblokk har bekreftet dette. Det vil være mulighet for å korte ytterligere inn på tørketiden ved varmetilsats og bruk av dampfelle i kammeret.



**Figur 6 Fasediagram for vann. Trippelpunktet for vann er 6,2 mbar, 0,01 C**

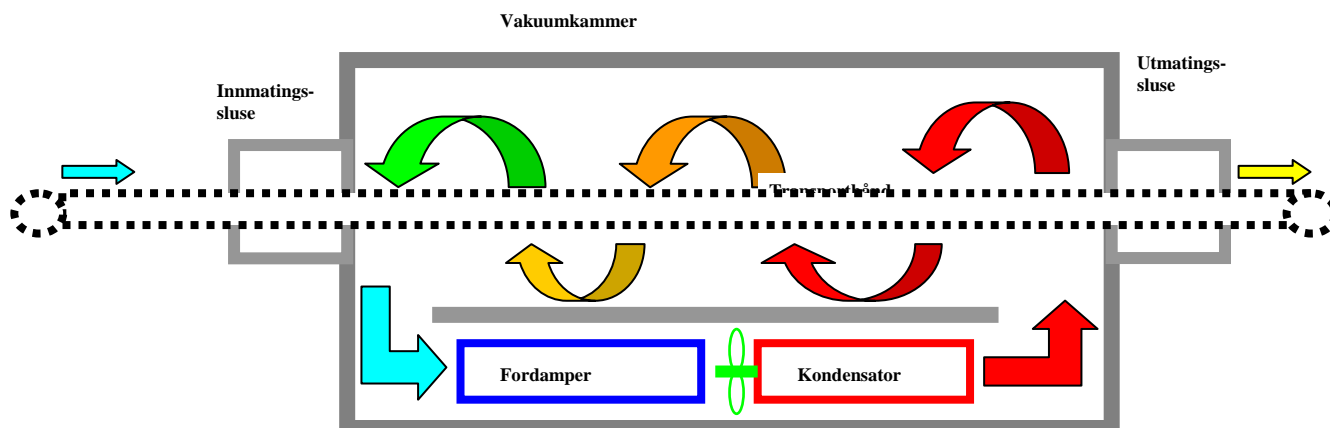
Fra sorpsjonsisotermen for klippfisk (Walde, 2003) har vi at klippfisk ved 25 °C har likevekt med 76 % av metningstrykket for vanndamp (0,04 bar) ved rådende temperatur, dvs. ca 0,03 bar, eller 3 kPa. Ved doggpunkt på -40 °C vil det være mulig å oppnå en teoretisk slutt- fuktighet på 4 % tørr basis, altså en betydelig overtørking. Vakuomtørking er derfor ikke noen betingelse for å oppnå ønsket tørrhetsgrad, men en mulig strategi for akselerert tørkeprosess. Det blir da viktig å ikke tørke for lenge, da dette vil medføre en uønsket høy tørrhetsgrad og dermed utbytte – tap.

### 2.3 TILNÆRMING

**En ønsker å vurdere realisering av følgende konsept:**

*Kontinuerlig prosess på band, akselerert med vakuum (40-200 mbar), med integrert varmepumpeprosess.*

Fordelen med bandtørke, er en lineær produktflyt gjennom produksjonen. En tenker seg automatisk registrering av tørrhetsgrad og kvalitet, og en sorteringsmaskin (grader) som sender produktet til pakking eller omtørking, i respektive handelsklasser / kvaliteter.



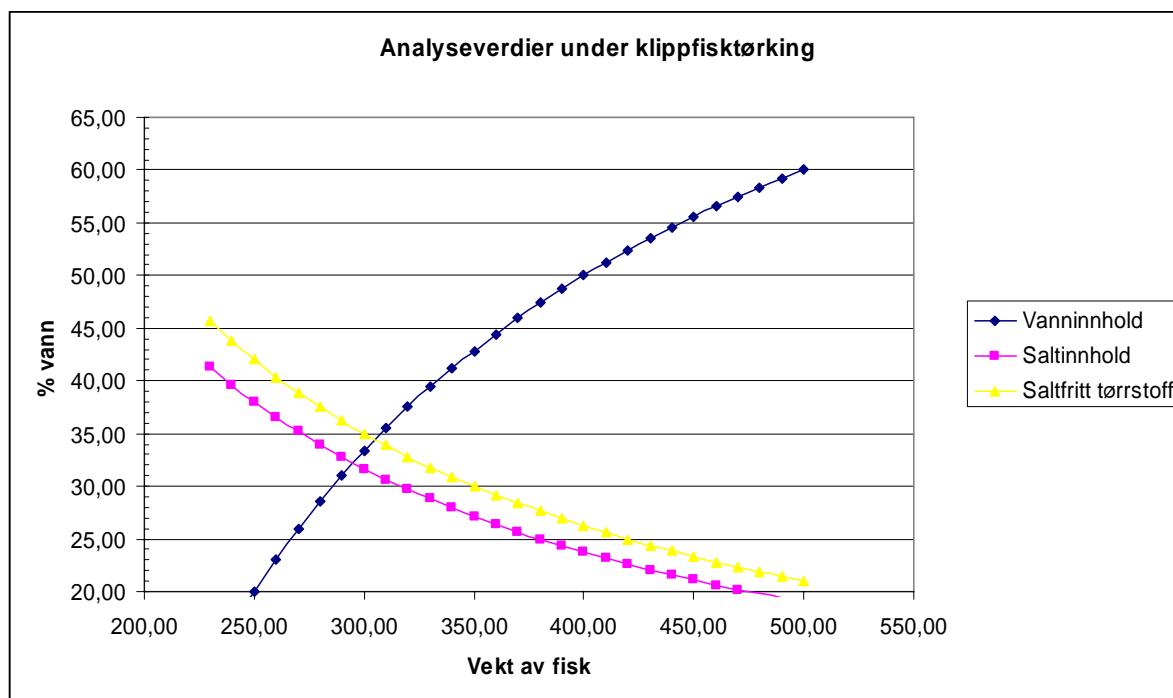
**Figur 7** Vakuum bandtørke med varmepumpeprosess

## 2.4 VALG AV FORSØKSDESIGN

Siden området er lite utforsket, velger vi en eksploratorisk design for å skaffe oversikt over strukturen i området. Vi trenger et visst spenn i verdier, den viktigste ukjente er trykkets innvirkning på tørkehastigheten. Temperaturen i væsken til varmeplatene holdes konstant nær dagens verdi for lufttemperatur i klippfiskproduksjon, for å sikre mot varmedenaturering av produktet. Med en mer eksakt varmestyring, vil det være mulig å øke produkttemperaturen opp mot grenseverdien på rundt 23 C. Effekten av vifte er en annen faktor som er ukjent, bortsett fra at det nyttes i visse tretørker med moderat vakuum. I første omgang blir det forsøk med og uten vifte, og viftehastigheten velges moderat. Dersom forøket er lovende, vil betingelsene bli ytterligere optimalisert, dvs. temperatur og viftehastighet.

### 3 MATERIALER OG METODER

Materiale for tørking er saltfisk med vanninnhold 58 – 60 % Tykkelsen er ca 30 mm, og med skinn. Bredden skal være så nær den naturlige som mulig. Brettene dimensjon er bredde 400 mm og dybde 480 mm, slik at hele saltfisk må beskjæres for å få plass. Større fiskestykker beskjæres slik: Bredden beskjæres ved like avkortninger av bukklapper på begge sider, Lengden beskjæres fra sporden og så langt som nødvendig for å få plass på brettene. 3 stykker tørkes samtidig, en på hvert Brett.



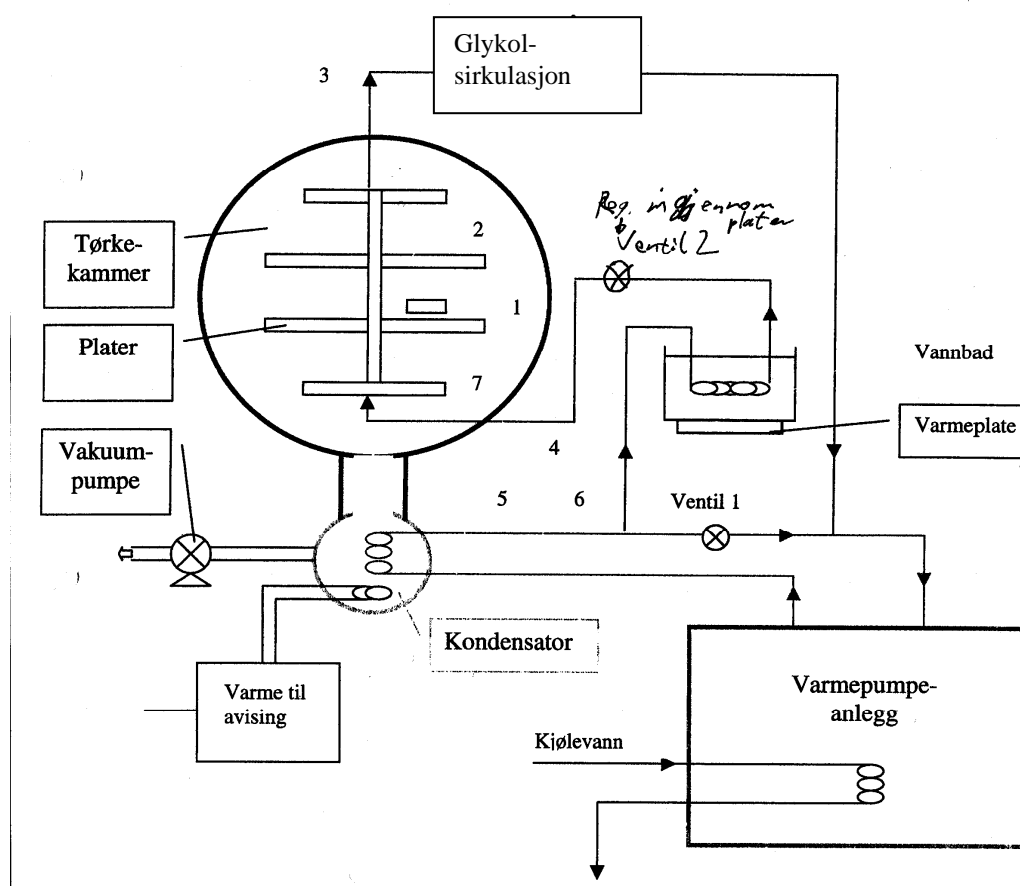
**Figur 8** Analyseverdier for klippfisk som funksjon av vektendring, her vist for et 500 grams stykke med vanninnhold 60 %, saltinnhold 19 % og saltfritt tørrstoff (SFTS) 21 % og de endringene i analyse som følger av vekttapet under tørking. Beregnede verdier under den forutsetning at alt massetap er vann.

## 4 APPARATOPPSTILLING

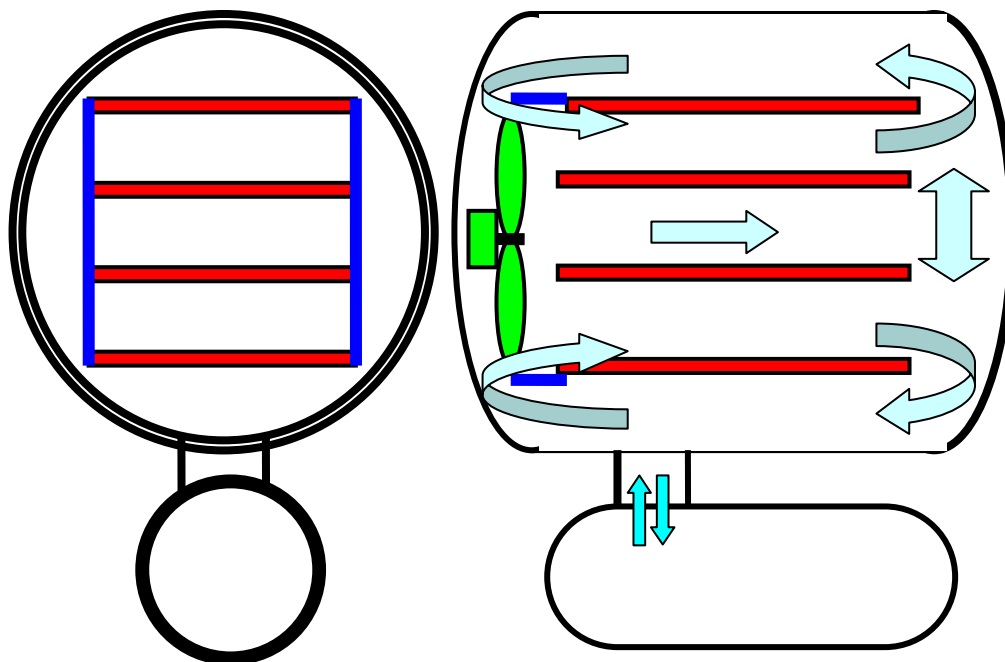
Vakuum frysetørke i Avvanningslaboratoriet (se Figurene 5 og 6) med pressostatstyrt vakuumpumpe, varmetilførsel i plater ved sirkulasjon av vann – glykolblanding med temperaturregulering.

Det installeres en vifte innenfor døråpningen, og sideveggene ved platene tettes. Mellom de 4 heteplatene vil det da dannes 3 strømningskanaler. Strømningsbildet en ønsker å skape er vist i Figur 6.

Effekten av vifte ventes å bli mindre når trykket avtar, ventelig ved lavere trykk enn ca. 100 mbar. Det er også reist tvil om viklingene i viftemotoren vil tåle drift ved sterkt vakuüm. Bruk av vifte ved de sterkeste vakuüm vurderes nærmere.



**Figur 9 Vakuüm frysetørke ved Avvanningslaboratoriet**



**Figur 10. Modifikasjoner av vakuumpfrysørke ved Avvanningslaboratoriet**

## **5 FORSØKSPLAN:**

Hvorfor:

Vakuomtørke i laboratoriet kjøres ved varierende trykk, 40 - 200 mbar, og med platetemp 25 °C). Det tørkes med og uten vifte i tørkekammeret, og det undersøkes hvilke tørketider som kan realiseres innenfor temperaturløansen til et fullverdig produkt.

For å oppnå fordampings effekt, må trykket reduseres til under metningstrykket (Jfr. Fig. 3) for den aktuelle temperatur. Med det relativt lave temperaturområdet som er aktuelt for saltfisk – klippfisk, vil dette medføre sterkere vakuu enn de antydede 0,2 bar absolutt trykk.

Eksempelvis vil 25 °C tilsvare drøyt 95 % vakuu, eller 50 millibar, eller 5 kPa. Hvor viktig er dette for tørkehastigheten? Dette blir et av spørsmålene som søkes besvart i denne forsøksserien.

Ved 100 og 200 mbar skal effekten av konveksjon, ved viftepåtrykk, testes.

Dampfellen (kondensatoren) kjøres ved -40 °C, mens temperaturen i heteplatene varieres, i området 20 -25 °C (via glykolblanding). Viftens turtall reguleres fra 0 til en lufthastighet 4 m/s

### **5.1 PRØVE 1**

Trykk 40 mbar (96% vakuu), og kokepunkt ca 28 °C. Kjøres uten vifte, med platetemperatur 25 °C.

Uttak for vektmåling ved 2, 4, 8 og 24 timer, evt. en måling nær tiden for ferdig klippfisk. Heller ikke ved dette forsøket skal det kunne forventes fordampings effekt.

### **5.2 PRØVE 2**

Trykk 100 mbar (90% vakuu), kokepunkt ca 46 °C. Kjøres uten vifte, med platetemperatur 25 °C.

Uttak for vektmåling ved 2, 4, 8 og 24 timer, evt. en måling nær tiden for ferdig klippfisk. Her vil det ikke kunne forventes en fordampings effekt

### **5.3 PRØVE 3**

Trykk 100 mbar (90% vakuu), kokepunkt ca 46°C. Kjøres med vifte, med platetemperatur 25°C.

Uttak for vektmåling ved 2, 4, 8 og 24 timer, evt. en måling nær tiden for ferdig klippfisk.

### **5.4 PRØVE 4**

Trykk 200 mbar (80% vakuu), kokepunkt ca 60°C. Kjøres uten vifte, med platetemperatur 25°C.

Uttak for vektmåling ved 2, 4, 8 og 24 timer, evt. en måling nær tiden for ferdig klippfisk.

### **5.5 PRØVE 5**

Trykk 200 mbar (80% vakuu), kokepunkt ca 60°C. Kjøres med vifte, med platetemperatur 25°C.

Uttak for vektmåling ved 2, 4, 8 og 24 timer, evt. en måling nær tiden for ferdig klippfisk.



## 6 MÅLEMETODER

### Kontinuerlige målinger: (Logges maskinelt)

#### **Temperaturmåling:**

2 Termoelement stikkes inn i hver av de 3 fiskene i tørken, 1 i kjernen (10 mm fra skinnsiden), og 1 settes 5 mm under overflaten på kjøttssiden. I tillegg måles platetemperaturen i hver plate og lufttemperaturen inne i tørken på 2 steder (se nedenfor).

#### **Relativ luftfuktighet i tørken:**

Luftfuktigheten inne i tørken måles, ved dør - enden og bak heteplatene. Samme sted måles lufttemperaturen i et felles måleinstrument Vaisala HUMICAP HMT 334. Fuktighetsmåleren er basert på kapasitiv måling av adsorbent vannmengde til en tyynn polymer i apparatets giver.

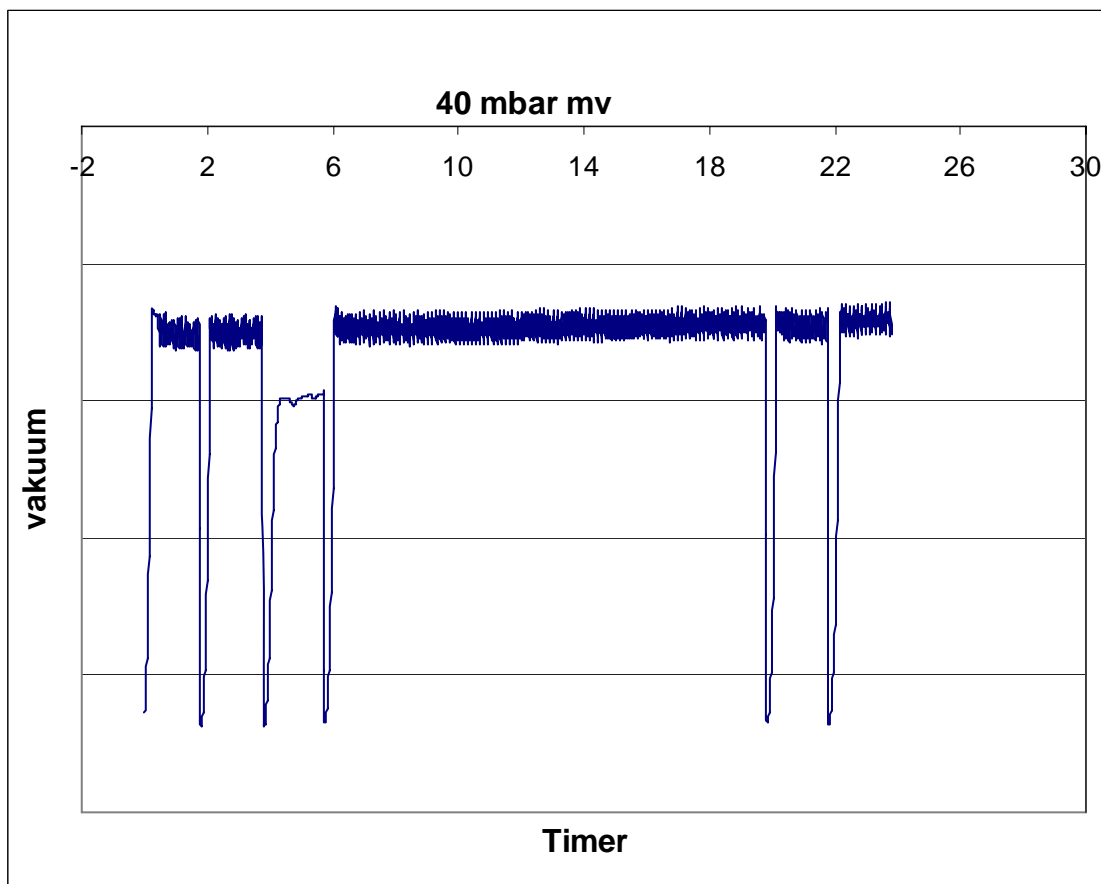
### Diskrete målinger: (Logges manuelt)

#### **Vektmålinger:**

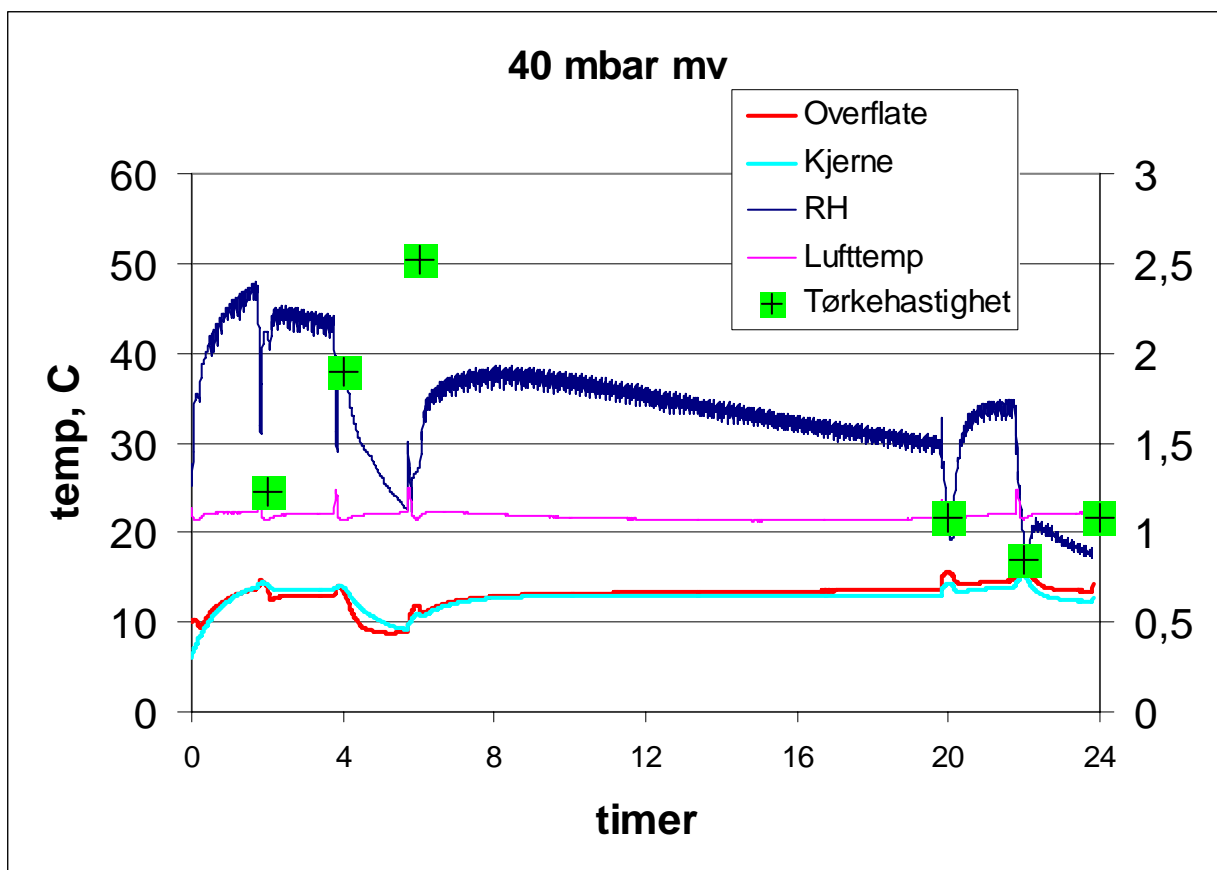
Alle fisker veies manuelt ved uttak iht. kjøreplanen og loggføres ved riktig tidspunkt. Fiskene veies før, under og etter tørkeforsøk.

## 7 RESULTAT OG DISKUSJON

### 7.1 PRØVE 1: 40 MBAR MED VIFTE



**Figur 11 Vakuumforløp i % ved 40 mbar, med vifte**



**Figur 12 Overflate – og kjernetemperatur, relativ luftfuktighet, lufttemperatur og tørkehastighet ved 40 mbar, med vifte.**

Tørkehastigheten blir svært høy i begynnelsen, faller noe fra 8 mot 19 timer, for deretter å øke mot slutten av forløpet.

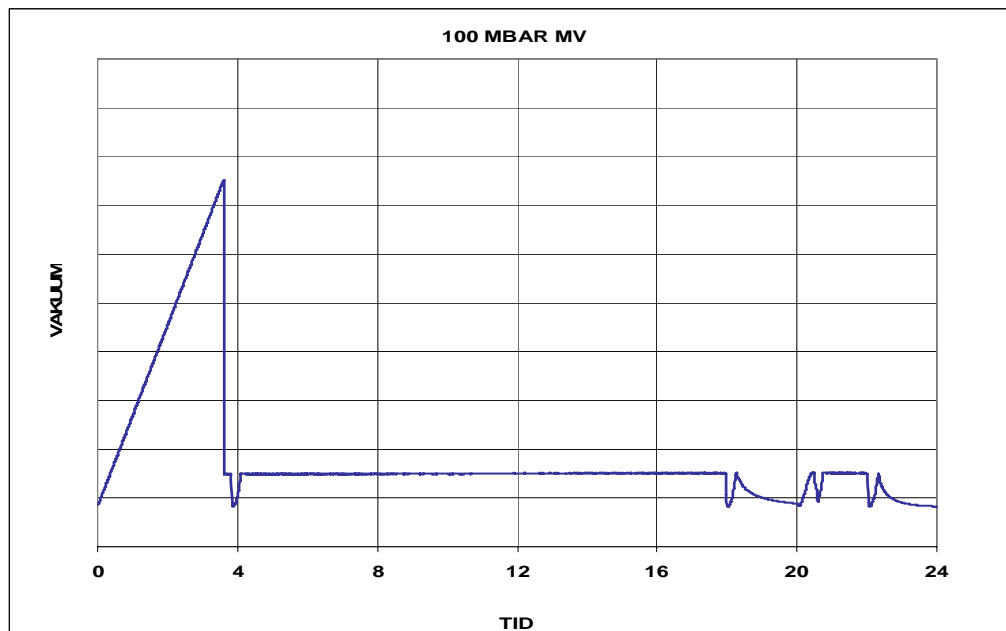
Relativ luftfuktighet starter høyt, men avtar sterkt rundt 5 til 7 timer, deretter stabiliserer det seg på et middels nivå (i underkant av 40 %) og faller utover tørkeforløpet. Når døren åpnes, faller Rh.

Vakuumtrykket reflekterer Rh slik at høyt trykk tilsvarer lav Rh.

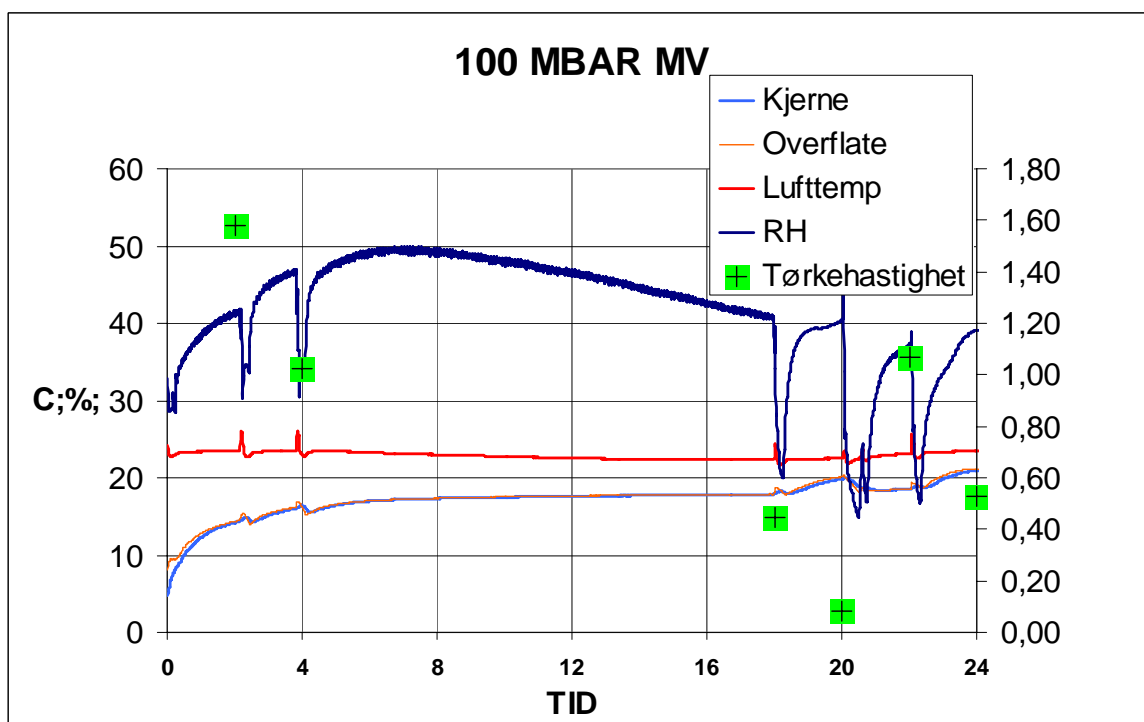
Temperaturen i produktet både overflate og kjerne, avspeiler åpningene slik at overflatetemperatur gjør et hopp når døra åpnes. Først skjer en oppvarming av overflaten deretter med fallende Rh skjer en avkjøling av overflaten. Dette er et tegn på at overflatesonen tørker, og trekker varme ut av kjernen.

Etter hvert (time 6) flytter tørkefronten innover, og varmestrømmen beveger seg gjennom tørrsjiktet mot kjernen.

Videre er det verdt å merke seg at produkttemperaturen er vesentlig lavere enn lufttemperaturen, hvilket indikerer at produktet vanskelig klarer å opprettholde inngående varmestrøm tilsvarende vannfordampingen. Denne prosessen vil derfor kunne akselereres med øket varmetilførsel.

**7.2 PRØVE 2: 100 MBAR MED VIFTE**

**Figur 13 Vakuumforløp ved 100 mbar med vifte**

Figur 11 viser vakuumforløpet i dette forsøket, i de 4 første timene er det en avlesningsfeil, og vi må se bort fra denne delen av kurven. Døren har vært åpnet ved 4, 18, 21 og 22 timer, og vakuumregulatoren har falt ut ved 18 til 20 timer, og fungerer stabilt ellers i forløpet.


**Figur 14 Relativ luftfuktighet, temperaturer og tørkehastighet ved 100 mbar, med vifte**

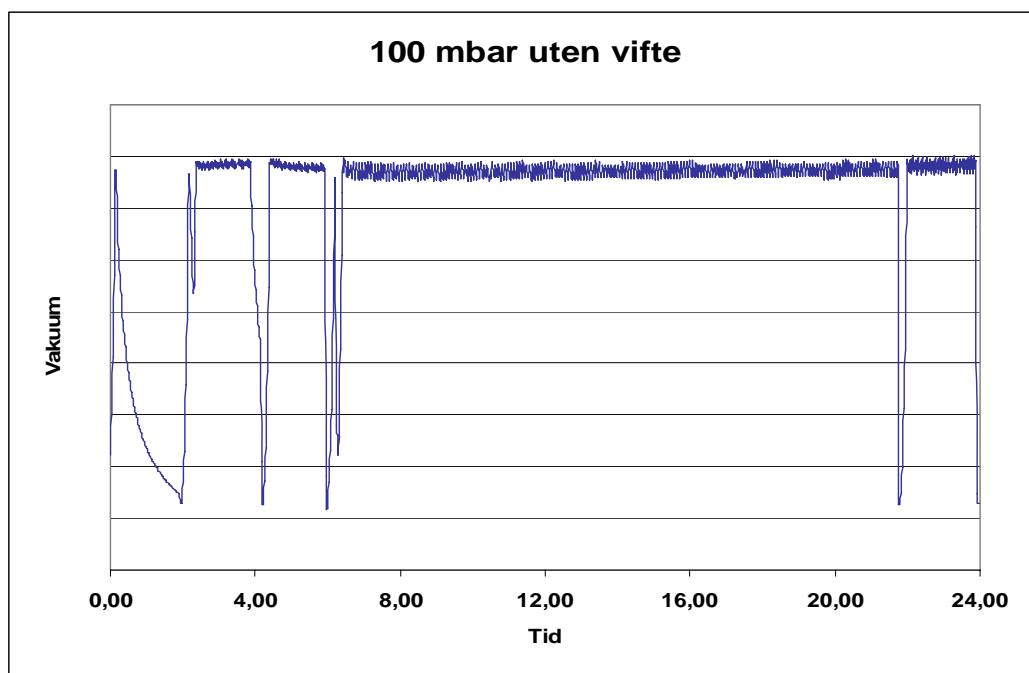
Tørkehastigheten er høy, men raskt avtakende i begynnelsen, deretter lav til time 20 og økende derfra til time 23.

Relativ luftfuktighet var først lav, for så å øke til time 5, deretter flatet den ut og sank mot time 17. Deretter falt den hver gang trykket økte, i to perioder på slutten (22 til 23 timer) slo ikke vakuumpumpens regulator inn, og pumpen måtte startes manuelt. I denne perioden falt RH merkbart.

Temperaturen i produktet gjør et hopp hver gang døra åpnes, samtidig med et fall i relativ luftfuktighet (Rh).

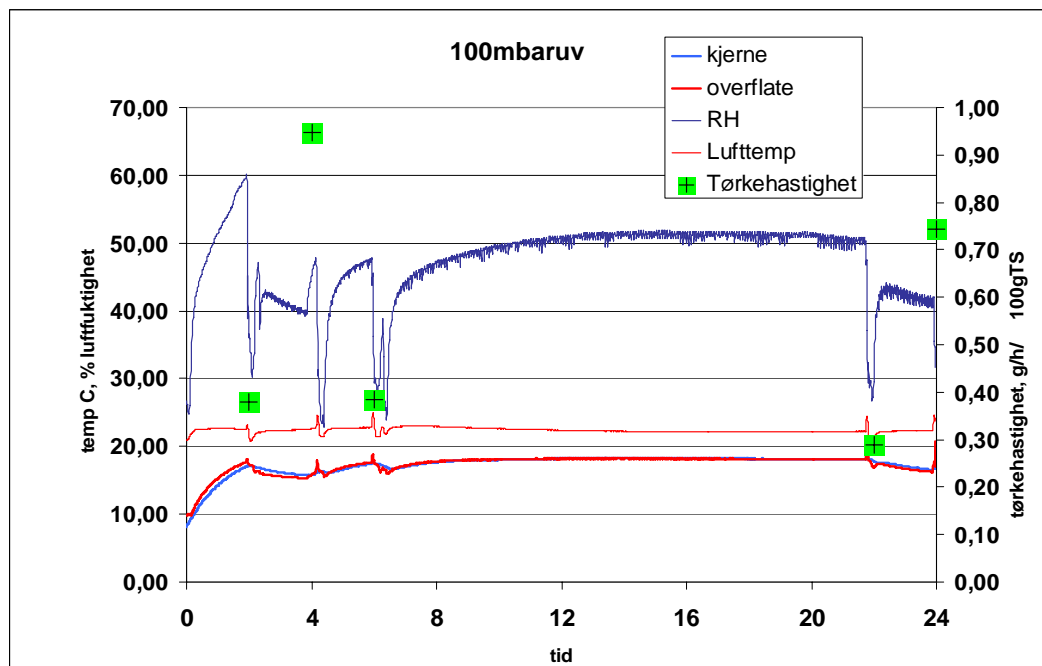
Høyeste tørkehastighet ser ut til å sammenfalle med åpning av dør, og også sviktende innkobling av vakuumpumpen.

### 7.3 PRØVE 3: 100 MBAR UTEN VIFTE



**Figur 15 Vakuuumforløp i % ved 100 mbar uten vifte, over tid i timer.**

Denne figuren viser uregelmessighet i vakuumpumpen fra 0 til 2 timer, deretter jevnt forløp, bare avbrutt av uttak for vektmåling.



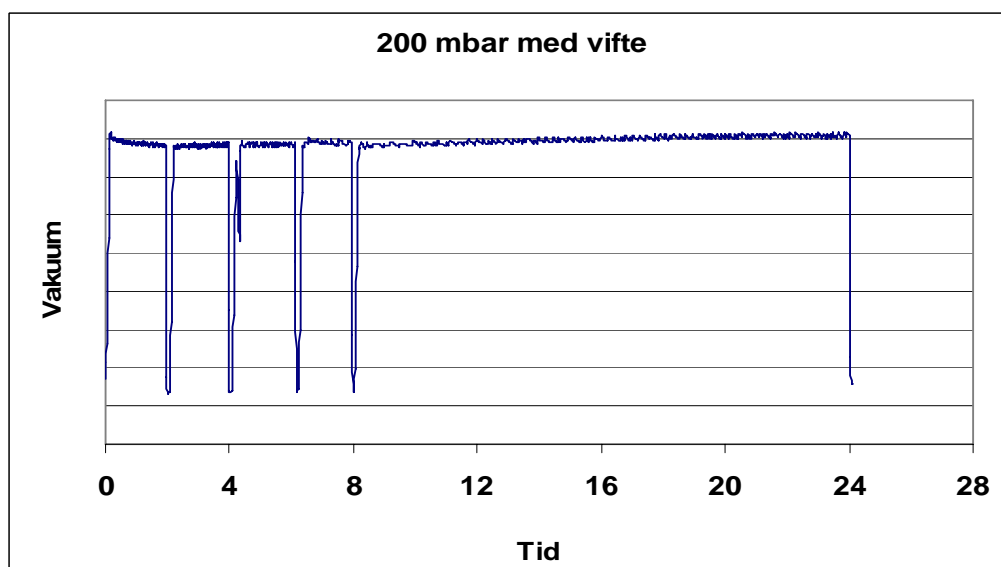
**Figur 16 Tørkehastighet ved 100 m bar, uten vifte**

Det skjer en rask tørking i de første 5 timer, for deretter å ta av til ca. 22 timer, der øker tørkehastigheten mot 24 timer.

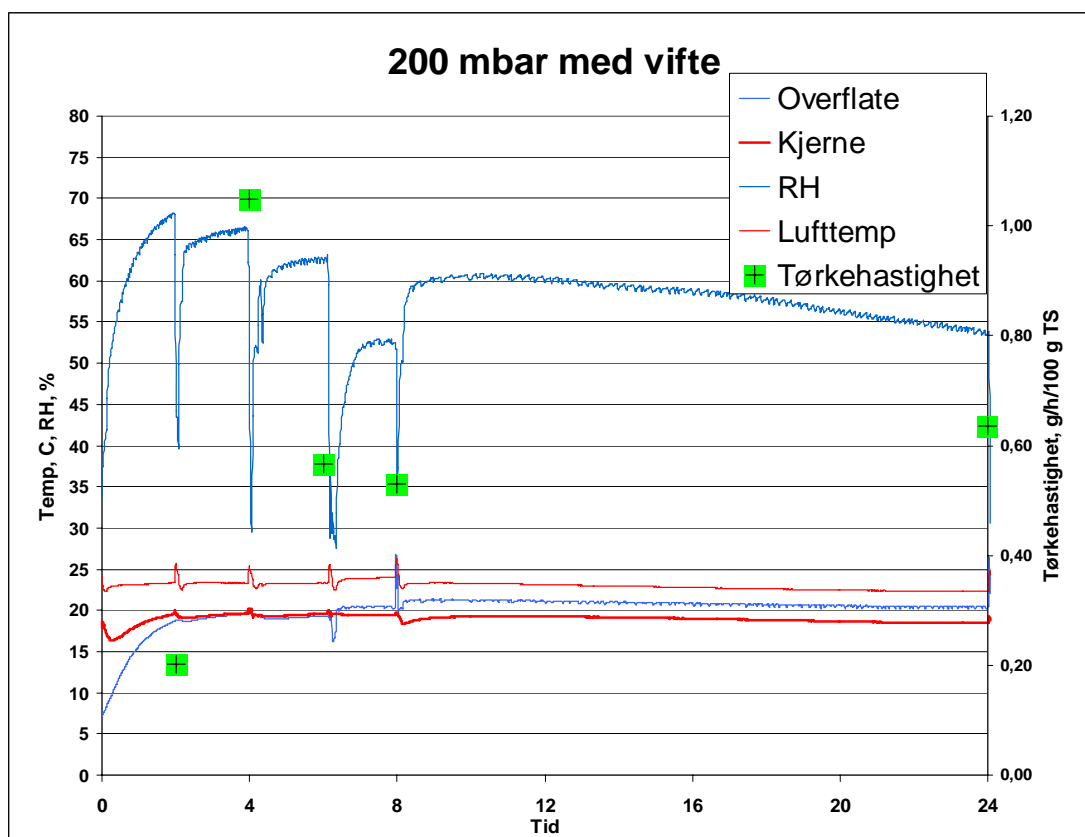
Relativ luftfuktighet faller hver gang døra åpnes, t.o.m. 6 timer. Deretter stiger Rh til ca 50 %, mens anlegget går stabilt, for så å falle i 22 timer men døra åpnes og 24 t.

Temperaturen i produktet kjerne og overflate øker sterkt i de 2 første timene svinger noe med åpning av dørene, men stabiliseres etter ca 7 timer fram til 22 timer. Høyeste tørkehastighet ser ut til å sammenfalle ed regelmessig åpning av dør.

#### 7.4 PRØVE 4: 200 MBAR MED VIFTE



**Figur 17 Vakuumforløp i % ved 200 mbar med vifte over tid i timer. Fall i vakuum er forårsaket av uttak av fisk til vektmålinger.**

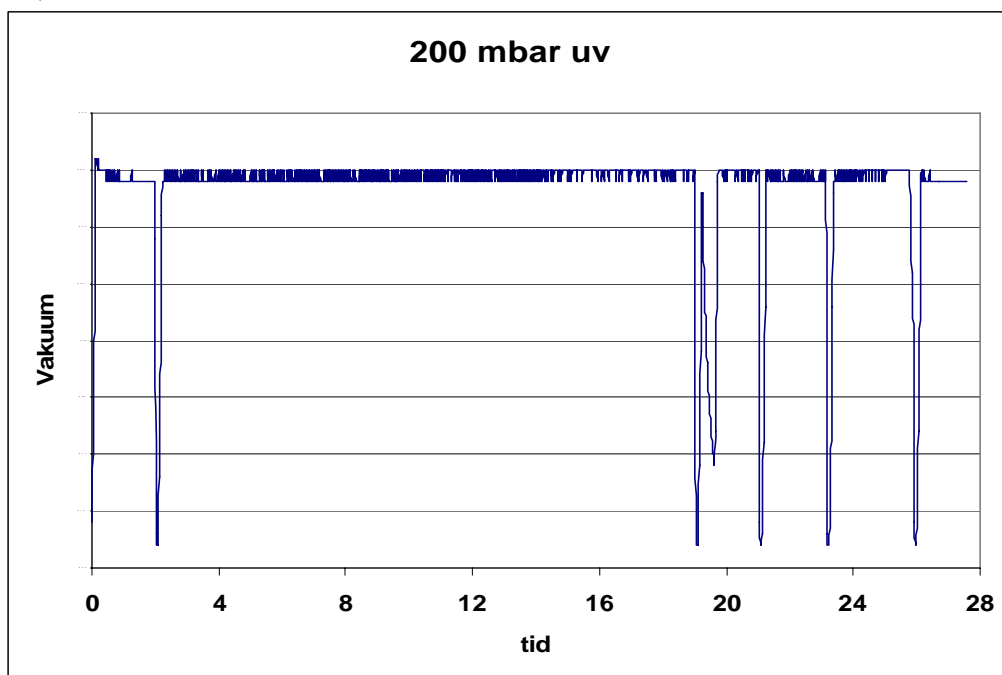


**Figur 18 Relativ luftfuktighet, lufttemperatur og tørkehastighet ved 200 mbar med vifte over tid i timer.**

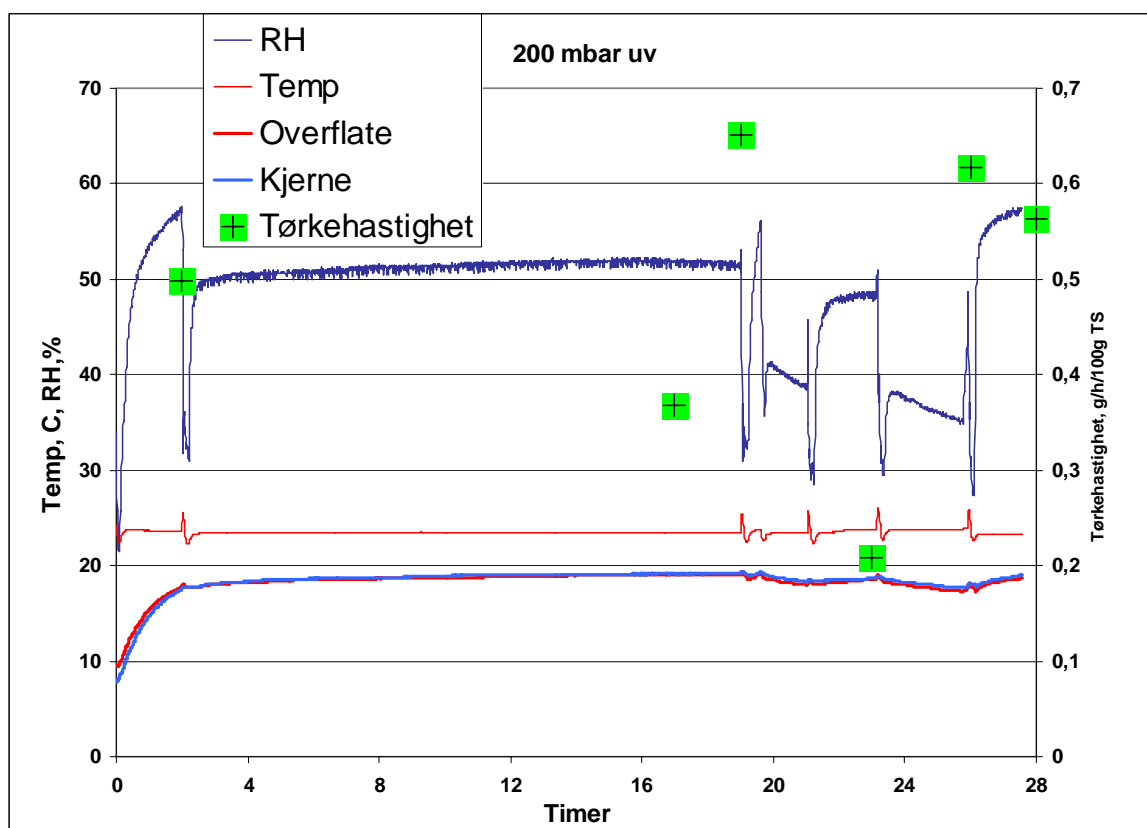
En periode er tørkehastigheten høy, rundt 4-5 timer, deretter jevnt og noe økende tørkehastighet i resten av forløpet. Et fall i relativ luftfuktighet rundt time 6-8 ble ikke registrert i tørkehastighet, da det ikke ble foretatt veiekontroll i dette tidsrommet. Økningen framkommer i stedet som øket middels tørkehastighet i hele intervallet fra time 8 til 24. Vakuumregulatoren har gått ganske stabilt, med et lite opphold i området 8 timer. Dette avleses som senket RH i vedkommende intervall.

Overflate- og kjernetemperaturen er ganske sammenfallende, noe som tyder på liten termisk spenning i produktet – og derav lav vannfordamping. Produkttemperaturen kommer også nær lufttemperaturen, noe som indikerer samme forhold.

Begrenset tørkehastighet har sammenheng med gjennomgående høy relativ luftfuktighet i hele perioden.

**7.5 PRØVE 5: 200 MBAR UTEN VIFTE**


**Figur 19** Vakuumforløp i % ved 200 mbar uten vifte. Den horisontale linjen viser regulering rundt 200 mbar, avbrutt av manuell vakuumpumppestans, utlikning av trykk og åpning av dør, vist som fall i vakuuum, eller alternativt trykkstigning til atmosfærestrykk.



**Figur 20** Relativ luftfuktighet og lufttemperatur, overflatetemperatur og kjernetemperatur, samt tørkehastighet ved vakuomtørking ved 200 mbar uten vifte.0

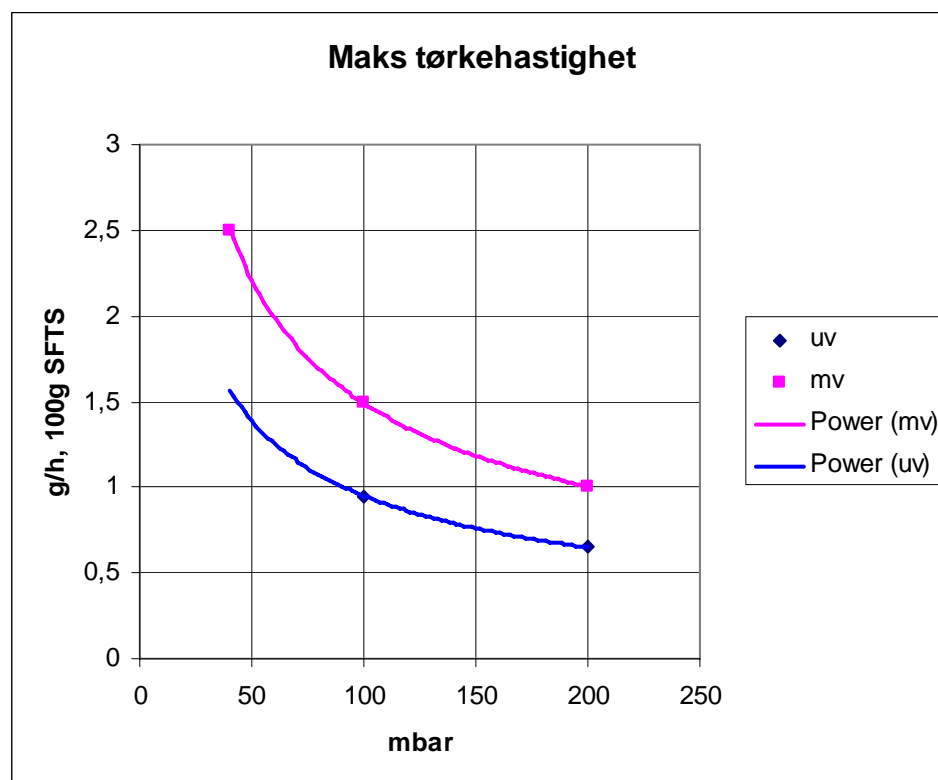


Tørkehastigheten er høy i begynnelsen av forløpet, og faller gradvis. Etter ca 17 timer øker hastigheten, og faller noe etter 20 timer, for deretter igjen å øke.

Relativ luftfuktighet er moderat i de samme intervall som tørkehastigheten øker, noe som igjen avleses som trykkstigning. En viss ustabilitet i vakuumpumpens regulator har gitt trykkstigning - som igjen gir RH fall. Trykkforløpet i Figur 7 viser at døren ble åpnet ved 2 timer, 19, 21, 23 og 26 timer. Det virker som åpning av døren forårsaker fall i relativ luftfuktighet.

## 7.6 OPPSUMMERING AV KJØRINGENE

Bare ved sterkt vakuum og med vifte kommer tørkehastigheten opp mot de verdiene en atmosfærisk tørkeprosess har i startfasen. Imidlertid unngås den sterke reduksjonen i tørkehastighet som inntreer i fasen med fallende tørkehastighet. For å oppnå fordampings effekt, må trykket være under 40 mbar ved 28 °C. Lufttemperaturen er i overkant av 20 °C, men produkttemperaturen er betydelig lavere, 16 – 17 °C slik at det er tvilsomt om flashfordampning skjer inne i produktet. Oppvarming av produktet med 10 – 12 °C ville ventelig framskynde tørkingen vesentlig.



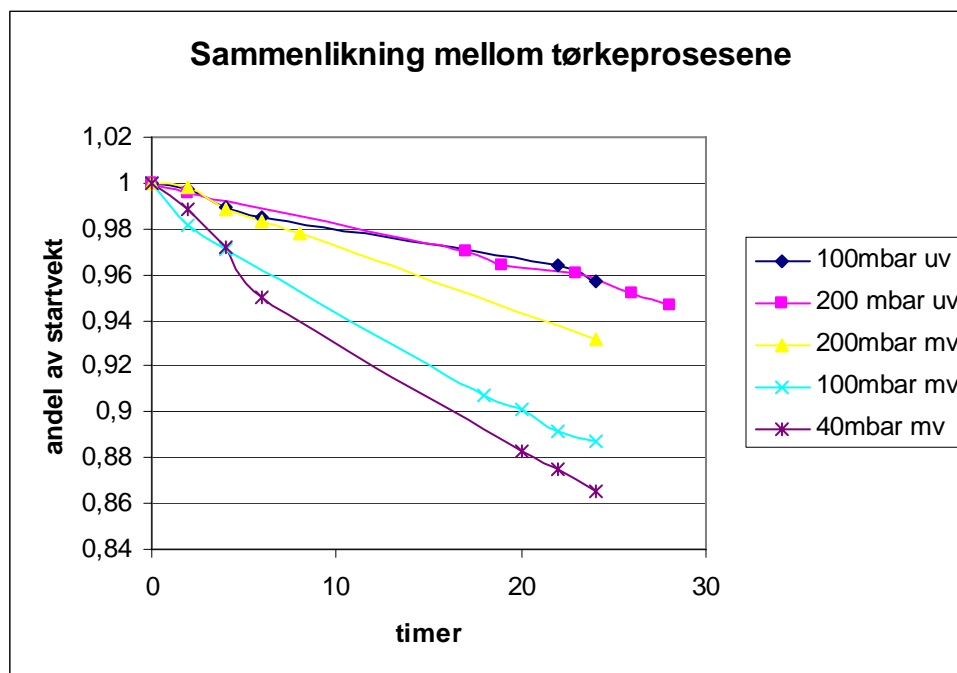
**Figur 21 Sammenheng mellom maksimal tørkehastighet i g/h, 100g SFTS og trykk i mbar for tørking med og uten vifte, resp. mv og uv.**

En eksponentiell regresjonskurve ble utviklet for begge tilfeller, med følgende form og koeffisienter, der y er tørkehastighet og x er trykk i mBar:

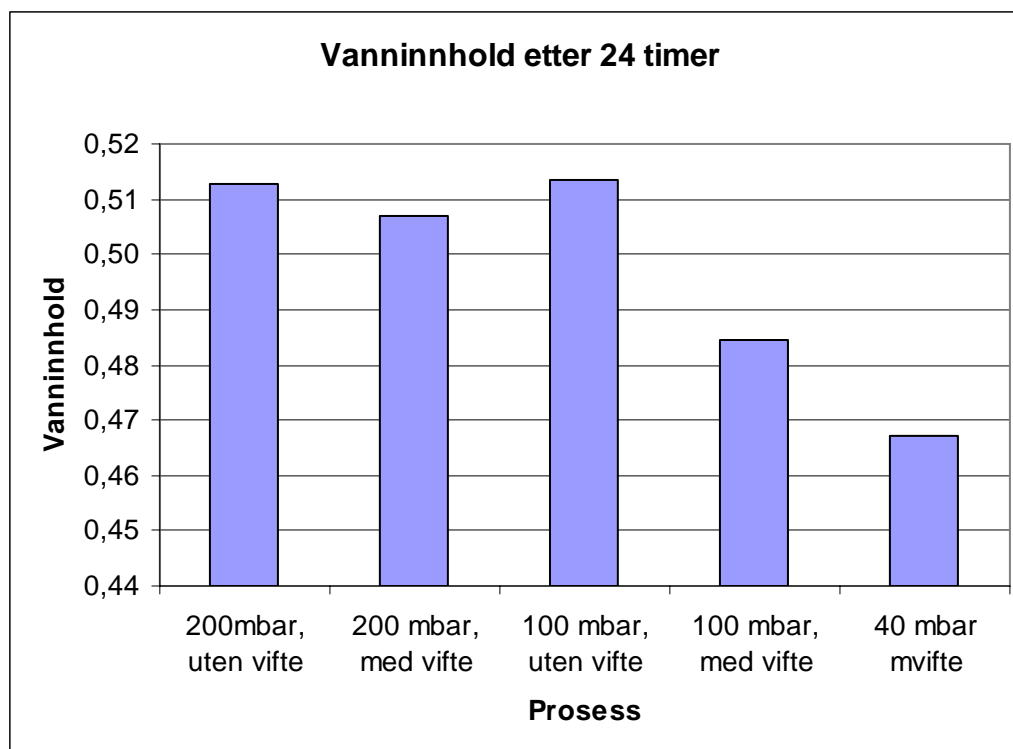
**mv**                       $y = 20,435x^{-0,5687}$                        $R^2 = 0,9998$

$$uv \quad y = 11,822x^{-0,5475} \quad R^2 = 1$$

Figur 15 viser at viften har en klar og forsterkende effekt på tørkeforløpet, og at effekten av viften ikke avtar med fallende trykk, som var ventet. Magnussen (1966) referer også til undersøkelser som viser at konveksjon og ledning i gassen står for et vesentlig bidrag til fordampingsenergien ved vakuumpfrysing.



**Figur 22** Vektutvikling ved de ulike tørkeprosessene i forhold til startvekt = 1



**Figur 23 Oppnådd vanninnhold etter 24 timer i vakuomtørke for ulike tørkeforhold.**

I mange av kjøringene var luftfuktigheten svært høy i begynnelsen. Dette må tilskrives anleggsutformingen, som trolig ikke håndterer store mengder fuktighet. En mer optimal utforming ville ventelig klare å styre luftfuktigheten bedre, og slik bidra til en senket tørketid.

Spesielt gjelder dette styringen av luft til kondensatoren (dampfellen), dessuten ville senking av rørtemperaturen bidra til en mer effektiv vannfjerning.

Et annet særtrekk, er mangelen på skorpedannelse, særlig ved sterkt vakuuum. Dette kan trolig tilskrives en redusert væsketransport, da fordampingen i stor grad skjer inne i produktet, og transporten til overflaten skjer mer i dampfasen. Skorpedannelsen kan i høy grad tilskrives transport av salt og oppløst protein m.v. til overflaten og oppkonsentrasjon ved bortføring av vann. Når flytende transport bortfaller, vil også transporten av oppløst stoff bortfalle.

Dette tyder på at jo lavere lufttrykk, desto mer av fordampningen vil skje inne i produktet. Sublimasjon er ikke aktuelt her, da temperaturen er vesentlig høyere enn saltfiskens frysepunkt, som er ca. -22 °C.

For å oppnå tørking både på overside og underside, ble fisken lagt på metallrister. Dette vil nedsette varmetilførselen fra platene til produktet, og vi så tydelig at temperaturdifferansen mellom luften og produktet økte med sterkere vakuuum. I disse tilfellene vil det være mulig å øke avvanningen ved å øke energitilførselen, enten konvektivt eller i form av stråling. Også varmeledning kan forbedres ved å nytte en rist med god tilførsel av varme fra platene eller direkte fra varmemediet.

## 8 KONKLUSJON

### Det er erfart:

- Betydelig reduksjon i tørketid ved bruk av vifte, også ved lavere lufttrykk.
- Betydelig reduksjon i tørketid ved vakuum (lavt lufttrykk)

Forsøksapparatene viste begrensninger mht å redusere vanddamp fra tørkesonen. Først når innlagt mengde var redusert, kunne en effektiv tørkeprosess realiseres. De viktigste endringene på anlegget for å avklare dette, vil være:

- Bedre kontakt mot kondensfelle, helst 2 rørforbindelser mot tørkekammeret og styring av luftstrøm gjennom fellen.
- Mer stabil styring av vakuomet.
- Bedre varmetilførsel til fisken.

Bare ved "høyt" vakuum (40 mbar) ble det tørket ferdig på 24 timer. Som indikert i Figur 15, forventes øket tørkehastighet ved ytterligere senkning av lufttrykket.

Lave temperaturer i fiskekjøttet indikerer videre at prosessen kan akselereres ved tilførsel av mer varmeenergi. Teoretisk skulle det være mulig å tørke en middels saltfisk på ned mot 12 timer, men det anses fortsatt som en relativ lang oppholdstid. Normalt går det ca. 20 kg fisk per m<sup>2</sup> brettflate, og det ville kreve et båndareal på 250 m<sup>2</sup> for å mate en tørke med 10 tonn saltfisk per døgn ved 12 timers oppholdstid, og 500 m<sup>2</sup> ved 24 timers oppholdstid. En rettlinjert tørke med båndbredde 2,5 m ville da bli hhv. 100 og 200 m lang, noe som er urealistiske dimensjoner. Derimot kunne tørken bygges i flere høyder med motsatt kjørende band, og fått ned ytre lengde, for eksempel til 20 til 40 m lengde ved fem nivå med band. Disse målene kunne nok være realiserbare, men ville representere en betydelig kostnad.

Det er også stilt spørsmål ved hvorvidt 12 til 24 timer er nok til å oppnå "speking" av fisken, ventelig en prosess der fiskeoverflaten reagerer med luft. Rent kjemisk og biokjemisk skjer mesteparten av reaksjonene under innsalting og saltmodning, men ved tørking eksponeres fisken for luft i en helt annen grad enn i saltfiskstabel.

I denne sammenheng er det også et spørsmål om det lave trykket gir tilstrekkelig oksygentilgang til en slik spekeprosess.

For å gå videre med dette arbeidet må det avklares hvorvidt klippfisktilvirkere og utstyrsleverandører er tilfreds med tørketid rundt 12 timer i vakuumkammer.

**REFERANSER**

**Judson King, C. (1971): "Freeze-drying of foods". CRC (The Chemical Rubber Co.) Books. Butterworth, London, UK.**

**Krischer, O. & Kast, W. (1978) Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, BRD, New York, USA.**

**Magnussen, O.M. (1966): Frysetørring. Varme - og massetransport i varen under tørkingen. Avhandling for den tekniske licentiatgrad ved Norges Tekniske Høgskole, Desember 1965**

**Rey, L. (1960) : "Traité de lyophilisation" Hermann, Paris, Fr.**

**Rindler, V., Schwindtke, P., Henschel, I. & Rau, G. (1998): Technical description of a new low – temperature freeze-drying device. Int. J. Refrig., No. 7, s. 535-541**

**Walde, P.M. (2003): Transport phenomena in dehydration of fish muscle. Dr. ing avhandling ved Norges Teknisk - Naturvitenskapelige Universitet, Juni 2003**

**SINTEF Energiforskning AS**  
Adresse: 7465 Trondheim  
Telefon: 73 59 72 00

**SINTEF Energy Research**  
Address: NO 7465 Trondheim  
Phone: + 47 73 59 72 00