

Sluttørking av klippfisk

- Luftens påvirkning på sluttørkingen**
- Optimal tørking av klippfisk**

**Erlend Indergård
Ola M. Magnussen
Per Egil Gullsvåg**

Mars 2010

**SINTEF Energi AS**

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

www.sintef.no/energi

Organisasjonsnr.:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Sluttørking av klippfisk

- **Luftens påvirkning på sluttørkingen**
- **Optimal tørking av klippfisk**

SAKSBEARBEIDER(E)

Erlend Indergård, Ola M Magnussen, Per Egil Gullsvåg

OPPDRAAGSGIVER(E)

FHL Industri og eksport, Bacalao Forum

TR NR.	DATO	OPPDRAAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR.
TR A6922	2010-04-14	Lorena Gallart Jornet	16X873
ELEKTRONISK ARKIVKODE	KONTROLLERT AV	GRADERING	
100202104042	Inge R. Gran	Åpen	
ISBN NR.	RAPPORTTYPE	GODKJENT AV (STILLING, NAVN)	OPPLAG SIDER
978-82-594-3435-7		Inge R. Gran	49
AVDELING	BESØKSADRESSE	LOKAL TELEFAKS	
Energiprosesser	Kobjørn Hejesvei 1D	73 59 39 50	

RESULTAT (sammendrag)

Konseptet sluttørking i eget lager utnytter overskuddsvarmen fra varmepumpen i tunnelen til å varme opp uteluft til sluttørking slik at fisken kan tas ut av tunnelen før den er helt tørr for å frigi kapasitet og utnytte tørkeluften. Konsekvenser av ulike driftsforhold ble sammenlignet med et referanseanlegg med 40 kW tilgjengelig overskuddsvarme.

Fiskens størrelse påvirker tørkehastigheten, og 4 kg torsk har 65 % mindre areal pr kg ifht en 1,5 kg torsk. Tørkehastigheten er 90 % ifht 1,5 kg fisk, som betyr at stor fisk har høyere vannfjerning pr cm² i forhold til små fisk. **Tørkehastighet på sei er 5 % høyere enn for torsk** det første døgnet i tunnel, men i sluttørkingsperioden er denne tilnærmet lik. **"Hard"** (høy temp og lav RH) **kontra "mild"** innledende **tørking**, gir raskere vannfjerningshastighet første 12 timer, men dette snur, og forskjellen i vanninnhold er liten på slutten av tørkeprosessen.

Lufthastigheten har stor betydning på vannfjerningshastighet under innledende tørking i tunnel, og ved å øke lufthastigheten fra 0,8 m/s til 3,0 m/s første 12 timer vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 34 %, men allerede etter 12 timer er hastighetens betydning relativt beskjeden så lenge den ikke er svært lav (0,2 m/s). Det vil være optimalt med moderat lufthastighet på rundt 1,5 m/s. **Temperaturen i tørkeluften har vesentlig betydning kun første 24 timer**. Ved å øke temperaturen fra 15 til 22 °C vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 15 % første dogn. Optimalt med så høy temperatur som mulig, men ikke over 26 °C. **Relativ fuktighet i tørkeluften er avgjørende for tørkehastigheten**. Ved å tørke ved 30 % øker vannfjerningshastigheten det første døgnet med 60 % ifht å tørke ved 60 % RH. Det må tilstrebes å få inngående fuktighet så lav som mulig, helst 30 %. Opphold i tunnel bør være 2 dogn.

Under sluttørking spiller lufthastigheten inn på tørkehastigheten kun når man sammenligner svært lav hastighet (0,2 m/s) som i et lager, med hastigheter (1,5 m/s) som i en tunnel, med ca 50 % høyere vannfjerningshastighet. **Lufttemperaturen har ingen innvirkning** under sluttørking så lenge denne er over 15 °C. **Relativ fuktighet har stor betydning**, og tørkehastigheten er ca 50 % høyere ved 30 % RH kontra 60 %. Optimalt med så lav RH som mulig ved å varme uteluften maksimalt. **Likevektsfuktigheten** på klippfisk ligger i området 76-80 %, og over denne vil man ikke få vannfjerning fra fisken. **Fiskens størrelse påvirker tørkehastigheten også under sluttørking**. Forsøk viser at vannfjerningshastigheten er 20 % lavere for 4 kg fisk i forhold til en 1,5 kg fisk etter korrigering for ulikt areal pr kg.

Energiforbruk i optimal tørking av klippfisk

Ved å tørke optimalt under innledende tunnel, men høy temperatur (>22 °C, lav relativ fuktighet ~30 %), moderat lufthastighet (~1,5 m/s) og maksimal oppfukning av tørkeluften (18.000 m³/t) vil man ut fra de gitte forholdene (30 vogner med 385 kg saltfisk (57 % vanninnhold) pr dogn) kunne produsere 9,6 tonn klippfisk (48 % vanninnhold) pr dogn i forhold til 5,2 tonn i referanseanlegget. Dette krever 18.000 m³/time og vil føre til en vannfjerningshastighet på 1,02 l/min, som er 16 % høyere. Nødvendig fordampningsenergi til kuldemedium til å avfukten tørkeluften er beregnet til 109 kW. Under sluttørkingen vil uteluften oppvarmes til 23 °C før den blåses inn, og snitt RH vil ligge fra 37 til 56 % RH gjennom året, og nødvendig tilført energi vil variere fra 25 til 35 kW i 11 av månedene (juli - 49 kW). Tilgjeng overskuddsvarme er 40 kW, og er tilstrekkelig unntatt juli. Nødvendig luftmengde ligger fra 3.400 til 11.800 m³/time. Ved sluttørking av 1,5 kg fisk i eget lager kreves en oppholdstid fra 1,3 til 1,9 dogn for å senke vanninnholdet fra 51 % til 48 %. Ved å sluttørke i eget lager vil man senke energi-forbruket fra 184 kWh til 101 kWh pr tonn klippfisk, og samtidig øke kapasiteten fra 5,2 til 9,6 tonn pr dogn. I forhold til referanseanlegget kan man øke produksjonen med 85 %, samtidig som man reduserer energiforbruk pr tonn produsert klippfisk med 45 %.

STIKKORD

EGENVALGTE	Klippfisk	Energi
	Tørking	Effektivitet

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
BAKGRUNN	3
1 MATERIALER OG METODER	4
1.1 FORSØKSOPPSETT TØRKING AV KLIPPFISK	5
2 RESULTATPRESENTASJON	6
2.1 PRINSIPPSKISSE FOR SLUTTØRKING	7
2.2 LUFTENS TILSTAND	7
3 VEKTENS PÅVIRKNING PÅ VANNFJERNINGSHASTIGHETEN	8
3.1 OVERFLATEAREAL SOM FUNKSJON AV FISKENS VEKT	8
3.2 VANNFJERNINGSHASTIGHET SOM FUNKSJON AV FISKENS VEKT	9
3.3 KAPASITETSBETRAKTNINGER FOR LITEN KONTRA STOR FISK	12
3.4 ULIKT STARTVANNINNHOOLD PÅ LITEN OG STOR FISK	14
3.5 LUFTHASTIGHET PÅVIRKER VANNFJERNINGSHASTIGHETEN AVHENGIG AV FISKENES STØRRELSE	15
3.6 FORSKJELL MELLOM TORSK OG SEI	16
4 AVVANNINGSHASTIGHET I TUNNEL	18
4.1 LUFTHASTIGHETENS PÅVIRKNING I TUNNEL:	18
4.2 LUFTTEMPERATURENS PÅVIRKNING I TUNNEL	20
4.3 LUFTFUKTIGHETENS PÅVIRKNING I TUNNEL	22
4.4 OPTIMAL OPPHOLDSTID I TUNNELEN (INNLEDENDE TØRKING)	23
5 AVVANNINGSHASTIGHET UNDER SLUTTØRKING	24
5.1 LUFTHASTIGHETENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN	24
5.2 LUFTTEMPERATURENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN	26
5.3 LUFTFUKTIGHETENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN	27
5.4 FISKESTØRRELSENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN	28
5.5 MAKSIMUM FUKTIGHET I TØRKELUFTEN	30
5.6 ”HARD” KONTRA ”MILD” TØRKING I STARTEN	30
6 OPTIMAL TØRKING AV KLIPPFISK	32
6.1 INNLEDENDE TØRKING I TUNNEL	32
6.1.1 Bakgrunn for valg av optimale tørkeparameter:	32
6.1.2 Sammen drag av driftsparametrene s påvirkning på vannfjernings hastighet	33
6.1.3 Luftens tilstand gjennom innledende tørking i tunnel.	34
6.1.4 Beregning av nødvendig luftmengde i tunnel:	34
6.1.5 Beregning av kuldebehov for avfukting av tørkeluften	35
6.2 SLUTTØRKING I EGET LAGER	36
6.2.1 Tørkepotensial for sluttørking gjennom året	36
6.2.2 Nødvendig energitilførsel i sluttørken	38
6.2.3 Oppholdstid for sluttørking	39
6.3 ENERGIFORBRUK VED OPTIMAL TØRKING AV KLIPPFISK	39
7 KONKLUSJON	40
REFERANSER:	45
VEDLEGG	46
VEKTENDRING AV FISK UNDER TØRKEFORSØK	46
ENDRING I % H ₂ O I KLIPPFISK UNDER TØRKING	47

BAKGRUNN

Studier gjennomført på tørking av klippfisk de siste årene har vist at tørkehastigheten i siste del av tørkeperioden er liten, og at luftmengder og relativ fuktighet i tørkeluften i denne perioden i mindre grad påvirker tørkehastigheten. Dette åpnet for å se på muligheten til å ta ut fisken fra tørketunnelene tidlig i tørkeperioden, for så å sluttørke denne i egne ”tørkelager”. SINTEF Energi AS gjennomførte i 2009/2010 derfor et prosjekt finansiert av FHL Bacalao Forum (via FHF) der mål var å fastlegge tørkehastighet av klippfisk avhengig av klimaforhold under siste del av tørkeprosessen, samt å foreslå teknologiske løsninger for å sikre jevn tørrhet ut av tørken, økt produktivitet og redusert energi- og driftskostnader.

Denne rapporten omhandler kapasitetsutnyttelse i tørketunneler og sluttørking av klippfisk i egne tørkelager (delkapittel 2 og 3 i hht prosjekttilbud). Tilhørende til denne finnes rapporten ”Tørkeluftens påvirkning på tørkehastighet av klippfisk”.

Målet med dette delprosjektet er å fastslå ved målinger tørkehastigheten for aktuell fisk (torsk og sei) avhengig temperatur, lufttilstand og, hastighet; slik at man kan velge en tørkeplan som gir best mulig økonomisk drift.

Under tørking utvikles raskt et tørrsjikt som forårsaker en kraftig reduksjon i tørkehastigheten. Målingene tydet på at etter at et lite tørrsjikt er utviklet, var det vanntransporten fra fiskekjøttet innenfor som styrte prosessen. Det var derfor behov for videre undersøkelser for å finne hva som styrer tørkehastigheten og hvordan denne kan påvirkes under sluttørkinga. Det måtte spesielt være fokus på innflytelsen av temperatur, lufthastighet og luftfuktighet. Målinger tyder også på at hastigheten under sluttørkinga er påvirket av hvor ”hard” eller hvor tørr lufta har vært i den innledende tørkefase. Forsøk med langsom økning av fuktighet og temperatur og tørking med kontinuerlig høy temperatur og lav fuktighet vil derfor bli gjennomført.

Undersøkelsene i dette delprosjektet skal danne grunnlag for at ut fra fiskeslag og størrelse (vekt eller tykkelse, overflate, mv.), luftfuktighet/-temperatur og anleggsdata skal kunne bestemme en kjøreplan som gir mest mulig økonomisk drift. Videre skal en kunne fastsette tørkeforhold til ønsket tørrhet som gir liten variasjon mellom fiskene, og dermed muligheter for et høyere utbytte.

Etter innledende tørking flater tørkehastigheten ut, og faller bare langsomt og tilnærmet lineært videre. I denne fasen av tørkingen er vannfjerningshastigheten mindre avhengig av temperatur, lufthastighet, samt luftens fuktighet så lenge den er noe under likevekt med saltkakens likevektsfuktighet på 76 %.

Tidligere tørkeforsøk viste muligheter for en betydelig økning i tørketunnelenes kapasitet og utnyttelse av avfuktingssystemet dess mer ”ny og våt” saltfisk som settes inn i tunnelene. ***Ved å ta fisk med et godt tørrsjikt ut fra tørketunnelen, hvor siste fase av tørkingen like effektivt kan gjøres ved lav lufthastighet og relativt høy luftfuktighet, vil dette gi plass til mer ”ny og våt” fisk og derved økt utnyttelse av kostbar tunnel. Sluttørkingen av fisken kan gjennomføres i enklere lager eller rom med lavere lufthastighet og mindre krav til luftfuktighet.***

1 MATERIALER OG METODER

Råstoff

Saltfisk fra Brødrene Aarseth AS, Ålesund ble benyttet i tørkeforsøk. Ved mottak av råstoff ble torsk fordelt i 2 forskjellige vektklasser, 80 fisk 1,5 – 2 kg, og 35 fisk mellom 3,5 og 4,5 kg. Torsken var godt avlagret, og picklesaltet i kar i ca 1mnd. Deretter 2mnd på palle i kjølelager. Av sei ble det mottatt 18 fisk i størrelse 1,5 – 2kg. Seien var picklesaltet i kar i 14 dager, deretter 14 dager på pall på kjølelager.

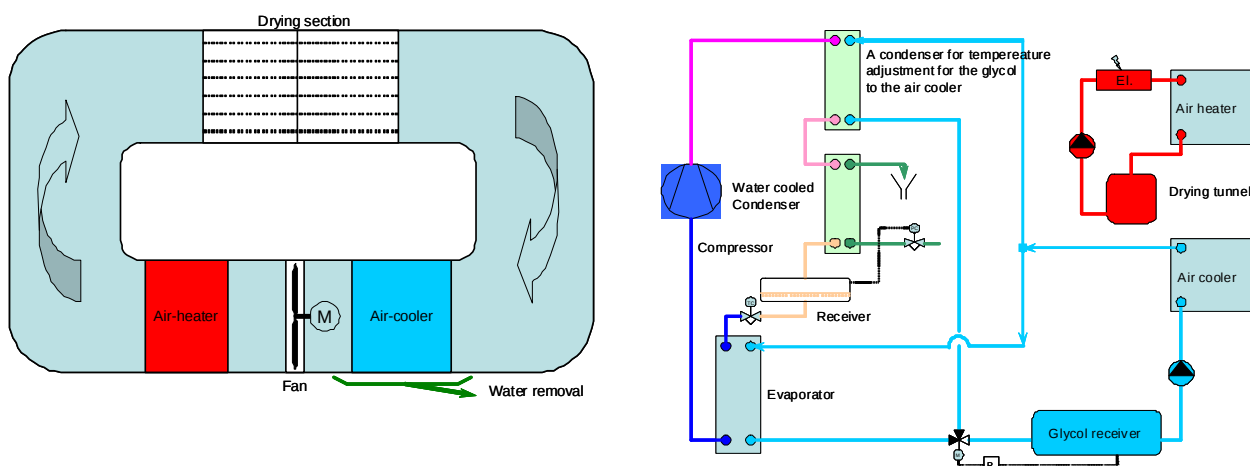
Før tørking ble fisken kuttet ved ørebeinet før den ble veid og merket og deretter lagt på kjølerom før tørking

Måling av startvanninnhold

Startvanninnholdet i fisken ble målt i hver fisk med 3 parallelle målinger per individ. Målingen ble utført på den tykkeste delen av avskjæret ved ørebeinet. Bitene ble homogenisert i en kjøkkenmaskin før ca 5 gram prøve ble veid inn på glass skåler og tørket i en konveksjonsovn ved 105 °C i 24 timer. Etter tørking ble vekten registeret. Forskjellen i vekt for vårt og tørket prøve gir startvanninnhold i prøven.

Tørkeutstyr

En laboratorie tunneltørke konstruert for klippfisketørking ble benyttet i forsøkene. Prinsippskisse av tørkeriggen er vist i Figur 1.



Figur 1: Prinsippskisse av tørkeriggen som ble benyttet under tørkeforsøkene

Tørketemperatur på tørkeluften styres ved hjelp av et glycolanlegg med kjølekrets (blå) samt en glycolkrets med elektrisk varmekolbe (rød). Tørkeluften avkjøles og avfuktes gjennom "air cooler" og varmes opp igjen til ønsket tørketemperatur gjennom "air – heater". I tillegg kan tørkeluftens luftfuktighet (RH) reguleres ved å bestemme glycoltemperaturen på kjølekretsen. Lufthastighet reguleres ved å frekvensstyre viften. Lufthastighet mellom brettene, og RH før og etter produkt ble kontinuerlig logget under alle tørkeforsøkene. Tørkekammer består av tre brettseksjoner i luftretningen som hver har sju brett.

1.1 FORSØKSOPPSETT TØR KING AV KLIPPFISK.

Totalt 13 tørkeforsøk ble gjennomført, og forsøksoppsett er vist i tabell 1. Vannfjerningshastighet ble undersøkt ved å endre parametrene lufthastighet, temperatur og relativ fuktighet, samt fiskeart og størrelse. Samtidig ble det undersøkt konsekvenser av ”hard” kontra ”mild” innledende tørking.

Tabell 1: Forsøksoppsett for tørking av klippfisk i lab-skala brett-tørke.

Forsøk	Utført	Antall fisk ¹⁾	Tørke- prosess	Tørketid	Temp °C	RH (%)	Lufthast i tunnel/lager (m/s)
A	April	18 LT	Tunnel	1 døgn	22	40	1,5
			Lager	4 døgn	15	30	0,2
B	April	17 LT	Tunnel	1 døgn	22	40	1,5
			Lager	4 døgn	15	60	0,2
C	April	17 LT	Tunnel	1 døgn	22	40	1,5
			Lager	5 døgn	22	60	0,2
1	Okt	6 LT / 6 ST / 4 S	Tunnel	1 døgn	22	40	1,5
			Lager	2 døgn	15	30	0,2
2 ²⁾	Okt	6 LT / 6 ST / 4 S	Tunnel	1 døgn	22	40	1,5
			Lager	2 døgn	15	30	0,2
3	Okt	12 ST	Tunnel	2 døgn	22	40	3
			Lager	4 døgn	15	75 ³⁾	0,2
4	Okt	12 ST	Tunnel	2 døgn	22	40	0,8
5	Okt	9 S	Tunnel	2 døgn	15	40	1,5
6	Okt	13 LT	Tunnel	2 døgn	22	60	1,5
7	Okt	13 LT	Tunnel	2 døgn	22	75 ⁴⁾	1,5
8	Okt	12 LT	Tunnel	2 døgn	15	60	3
10	Nov	15 T	Tunnel	0-8 timer	15	60	1,5
			Tunnel	8-16 timer	18	50	1,5
			Tunnel	16-24 timer	20	40	1,5
			Tunnel	3 døgn	23	30	1,5
11	Des	15 T	Tunnel	4 døgn	23	30	1,5

¹⁾ LT = Liten tors, ST = Stor tors, S = Sei

²⁾ Forsøk 1 og 2 kjørt under samme driftsparametre

³⁾ RH nedjustert til 70% etter døgn 6

⁴⁾ RH nedjustert til 70 % etter døgn 1

2 RESULTATPRESENTASJON

Målet med prosjektet er som kjent å finne en tørkeplan som gir mest mulig økonomisk drift med bakgrunn i målinger av tørkehastighet for torsk og sei avhengig av tørkeluftens temperatur, relativ fuktighet og hastighet.

Resultatene fra arbeidet er presentert som 4 deler.

- 1) Vektens påvirkning på tørkehastighet
- 2) Luftens påvirkning på tørkehastighet innledningsvis i tunnel
- 3) Luftens påvirkning på tørkehastighet under sluttørking i eget lager
- 4) Beregning av optimal tørking av klippfisk.

Den totale tørkeprosessen av klippfisk er i denne rapporten delt inn som innledende tørking, der saltfisk tørkes i tradisjonell langblåst tunnel, og sluttørking der produktet tørkes ferdig i eget lager (eller egen hordetørke) ved hjelp av overskuddsvarmen fra varmepumpen i tunnelen.

Med bakgrunn i resultatene i punkt 1) – 3) er optimal tørking av klippfisk diskutert, beregnet og presentert i 4). Etter hvert som resultatene presenteres, er det satt opp beregningseksempler som viser industrielle konsekvenser av resultatene. Disse er markert som blå bokser.

Beregningseksempler i rapporten: Tørkeanlegget og tilgjengelig overskuddsvarme

Videre i rapporten er det hensiktsmessig å ta utgangspunkt i et referanseanlegg for å synliggjøre konsekvensene ved ulike driftsforhold. Det er her tatt utgangspunkt i en reell tørketunnel det finnes gode driftstall på.

Den langblåste tunnelen har plass til 3 x 20 vogner (totalt 60 vogner). Tunnelen har kondensator, fordampner og vifte på mesanintaket.

Varmepumpens kompressor har et energiforbruk målt til 33,5 kW, og er designet for å levere 130-140 kW kuldeytelse.

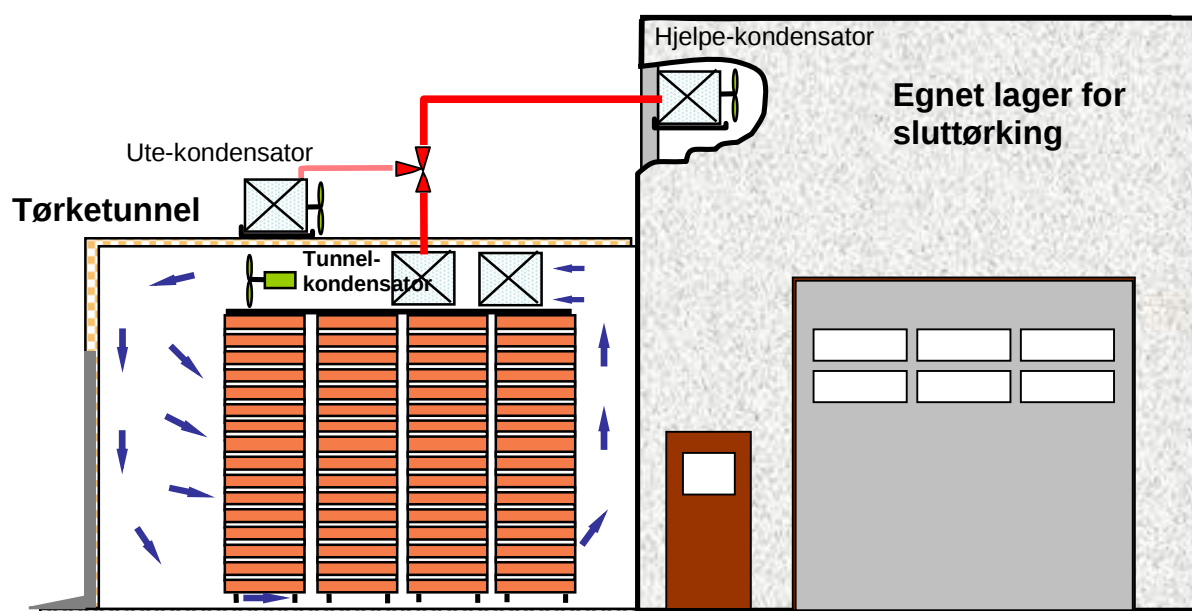
Viften leverer 35.000 m³/t, og har målt energiforbruk på 6 kW.

Overskuddsvarmen fra varmepumpen dumpes ved hjelp av en hjelpekondensator med vifte på 0,6 kW.

Total overskuddsvarme er 40 kW. Det er denne energien som vil bli utnyttet til å sluttørke klippfisken i eget lager.

2.1 PRINSIPPSKISSE FOR SLUTTØRKing

I en lukket prosess, som varmepumpetørking av klippfisk er, vil totalt energinivå i syklusen være konstant. Dvs. at tilført energi inn til prosessen i form av strøm til kompressor og vifte må fjernes igjen. Denne overskuddsvarmen er 40 kW, og vil i stedet for å bli dumpet til uteluften som i dag, bli benyttet til å varme opp uteluften til ønsket temperatur og blåst over klippfisken for å tørke denne ferdig. Et eventuelt overskudd av varme etter at oppvarming av uteluften er tilstrekkelig, vil kunne bli benyttet til oppvarming av andre lager, eller bli dumpet til uteluft. Man utnytter dermed tilført energi optimalt. Sluttørkingen kan foregå i egen lager, eller i en egen hordetørke (langblåst tunnel). Prinsippet for tørkekonsept med sluttørking i eget lager er vist i figuren under.

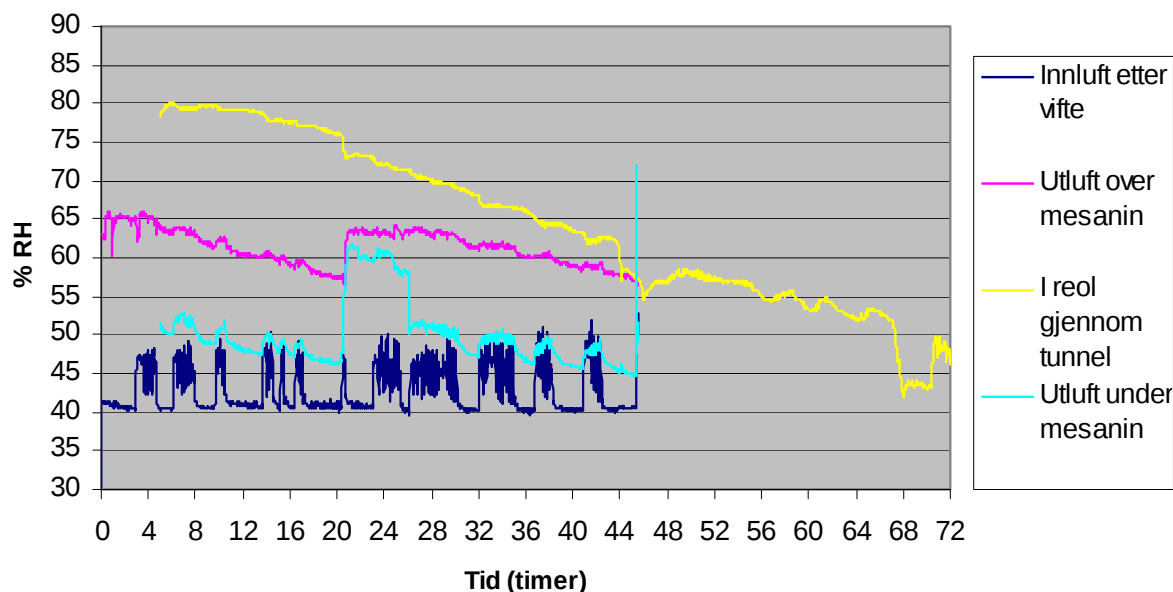


Figur 2: Prinsippsskisse for tørkeanlegg med utnyttelse av overskuddsvarmen fra varmepumpen til sluttørking i eget lager.

2.2 LUFTENS TILSTAND

Relativ fuktighet og temperatur i tørkeluften gjennom tunnelen vil naturlig nok endre seg etter hvert som luften tar opp vann fra fisken og dermed kjøles ned. For å studere temperatursens og fuktighetens innvirkning på avfuktingshastigheten må nødvendigvis disse parametrene holdes konstant under tørkeforsøk. Den optimale tørkeprosessen beregnet mot slutten av rapporten er derfor basert på tilnærmelser til de målte resultatene på stabile betingelser.

Den gule linjen i figur 3 viser at luftfuktigheten øker på vei igjennom tørketunnelen



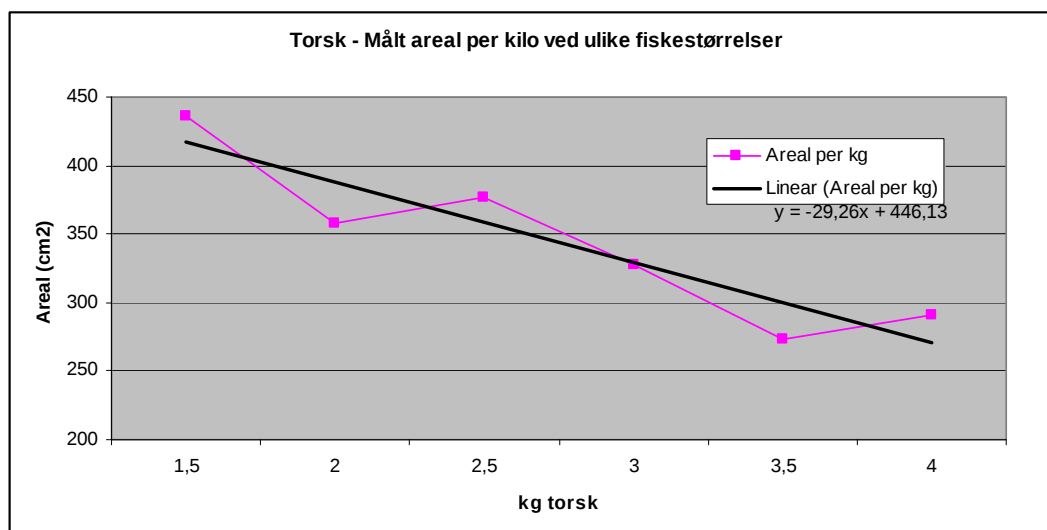
Figur 3: Målte driftsverdier under tørking av klippfisk i reell tunnel

3 VEKTENS PÅVIRKNING PÅ VANNFJERNINGSHASTIGHETEN

Det er kjent at fiskens størrelse påvirker hvor lang tid tørkeprosessen tar før klippfisken har nådd et gitt vanninnhold. Dette er naturlig ettersom en stor fisk er tykkere, og vannet må derfor transporteres en lengre vei før det kommer til overflaten og fordampes. Samtidig er det en større mengde vann som skal tørkes ut i en stor fisk i forhold til en liten fisk. Overflatearealet er avgjørende for hvor raskt vannfjerningen går, da fordampningen skjer på denne.

3.1 OVERFLATEAREAL SOM FUNKSJON AV FISKENS VEKT

Til sammen 117 fisk ble mål med hensyn på vekt, areal og tykkelse, og forholdet mellom vekt og areal er vist i figur 3 under.



Figur 4: Forhold mellom vekt og areal for saltfisk av torsk med ulik størrelse (areal pr kg fisk).

Tabell 2: Målt areal og tykkelse på saltfisk med ulik størrelse.

	Areal (cm ²)	Tykkelse (cm)	Volum (cm ³)
Sei 1,2 kg 10#	464	3,1	1437
Sei 1,4 kg 4#	463	3,0	1389
Torsk 1,5 kg 43#	654	3,6	2367
Torsk 2,0 kg 29#	715	4,3	3081
Torsk 2,5 kg 11#	941	4,4	4106
Torsk 3,0 kg 12#	981	4,7	4577
Torsk 3,5 kg 5#	958	4,4	4217
Torsk 4,0 kg 3#	1166	4,7	5441

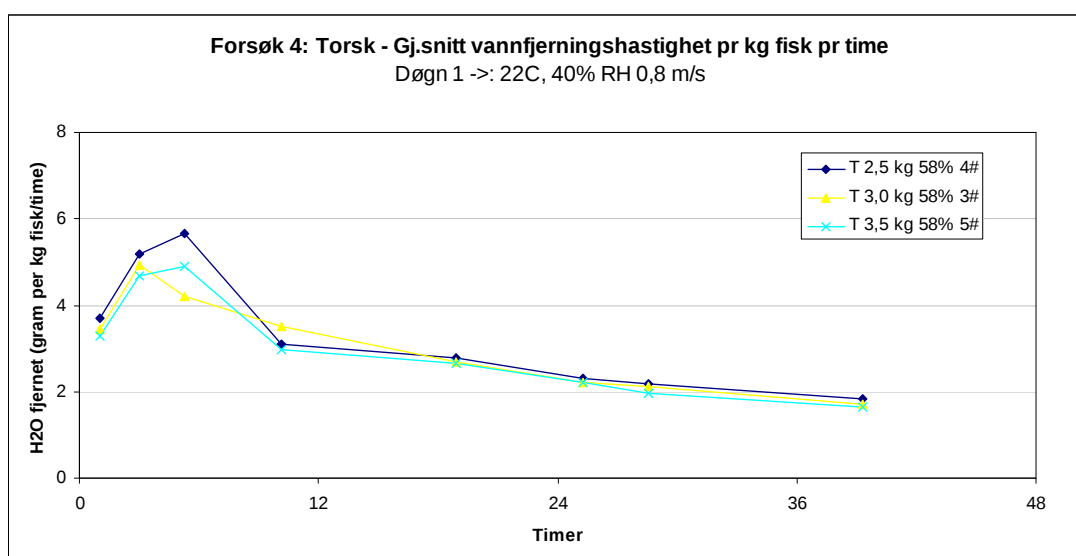
= antall fisk målt

For torsk er det en tilnærmet lineær sammenheng mellom vekten på fisken og overflatearealet. Arealberegningen er forenklet bestemt ut fra at klippfisken er gitt som trekant. En fisk på 1,5 kg har et areal på omkring 420 cm² pr kg i forhold til en fisk på 4 kg som har et areal på omkring 270 cm² pr kg.

3.2 VANNFJERNINGSHASTIGHET SOM FUNKSJON AV FISKENS VEKT.

Torsk med ulik vekt ble tørket ved 22 °C, 40 % RH og 0,8 m/s. Vekten lå mellom 2,5 kg og 3,5 kg (ganske beskjeden spredning), og ut fra figur 5 under, ser man at det som forventet var litt høyere vannfjerningshastighet pr kg på 2,5 kg fisk i forhold til 3,5 kg fisk på grunn av at liten fisk har større overflate i forhold til vekt enn større fisk.

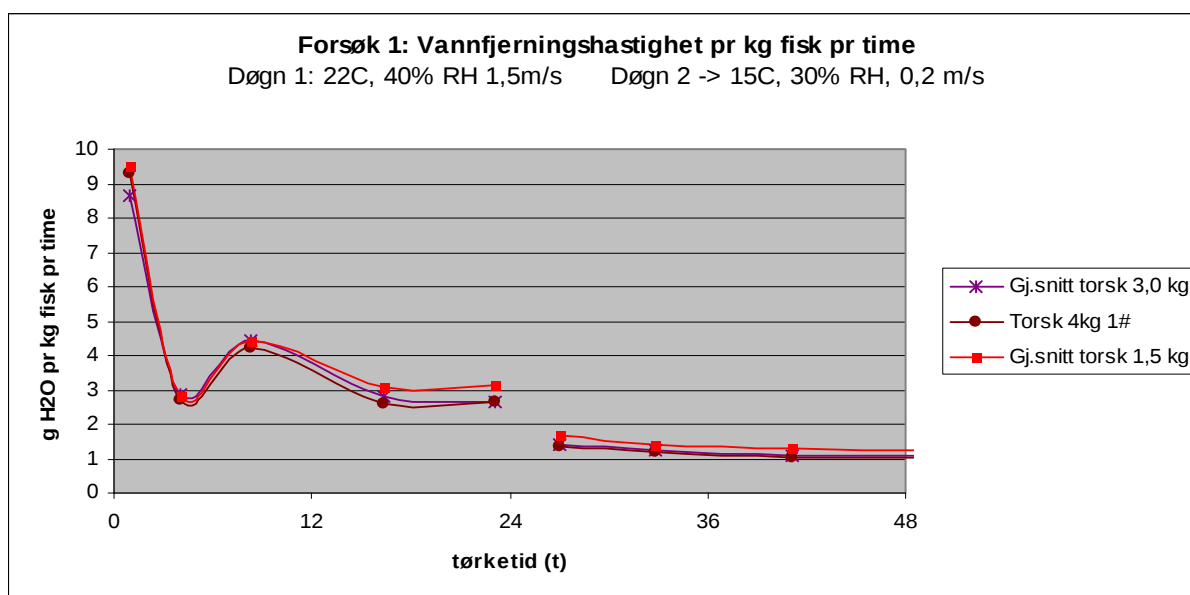
Vannfjerningshastigheten er bestemt ut fra mengde vann som er fjernet fra fisken mellom to målte punkter i tid. Dvs. punktene på grafer som blir vist i denne rapporten er plassert midt mellom de to tidene vekten er målt.



Figur 5: Vannfjerningshastighet pr kg fisk pr time for fisk med ulik størrelse under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 0,8 m/s (mellom brettene)

Under de gjeldende tørkebetingelsene (22 °C, 40 % RH og 0,8 m/s) har en 2,5 kg torsk en vannfjerningshastighet på i snitt 3,35 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time første 48 timer i forhold til en 3,5 kg fisk som har snitt 3,04 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time første 48 timer, altså 10 % høyere vannfjerningshastighet.

Tilsvarende ser man fra figur 6 under, at vannfjerningshastigheten også her er litt høyere for små fisk kontra store fisk. For de gitte tørkebetingelsene (Døgn 1: 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s, Døgn 2->: 15 °C, 30 % RH og 0,2 m/s) hadde 1,5 kg torsk en vannfjerningshastighet første 53 timene på i snitt 3,18 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time i forhold til 4,0 kg fisk som hadde en vannfjerningshastighet på 2,89 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time i samme periode, dvs. også her ca 10 %.

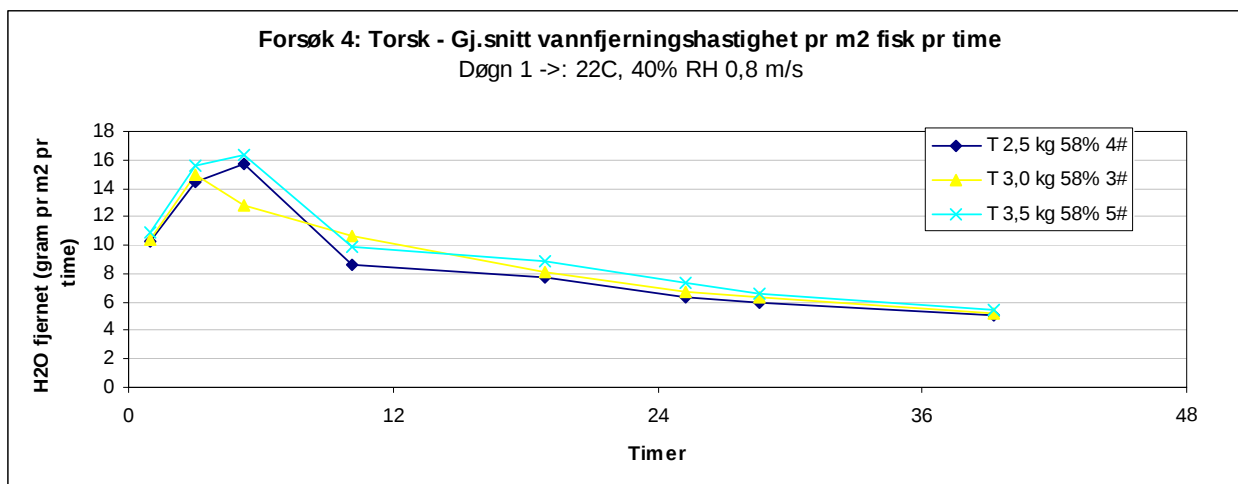


Figur 6: Vannfjerningshastighet pr kg fisk pr time for fisk med ulik størrelse under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene) første døgn, deretter 15°C, 30% RH og 0,2 m/s

Kommentar:

I enkelte tørkeforsøk ser man at første målepunkt (etter ca 1 time) gir et forholdsvis høyt vannfjerningstall, med et påfølgende målepunkt som gir et forholdsvis lavt tall før de neste målepunktene er relativt stabile. Felles for disse seriene er at tørken under disse forsøkene brukte noe tid før relativ fuktighet var stabil. Vannfjerningshastigheten for disse første målepunktene er derfor kunstig høy ettersom den første timen hva for høyt tørkepotensial. Vannfjerningshastigheten blir derimot kompensert med et lavere målepunkt 2 før jevnere vannfjerningshastighet fra punkt 3. Gjennomsnittsverdien for de første 3 målepunktene virker dermed representativ.

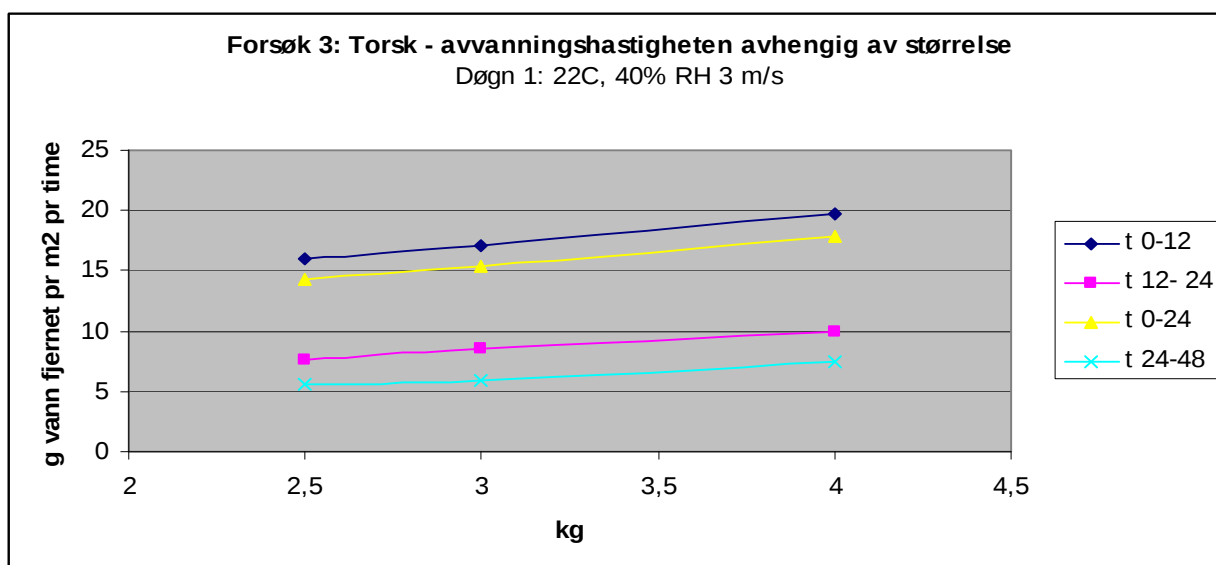
En torsk på 1,5 kg har som nevnt et areal på omkring 420 cm² pr kg i forhold til en fisk på 4 kg som har et areal på 270 cm² pr kg. En 4 kg torsk har dermed et areal som er 65 % av arealet til en torsk på 1,5 kg pr kg fisk. Vannfjerningshastigheten er som nevnt tilsvarende 90 % i forhold til 1,5 kg fisk. Dette betyr at stor fisk har høyere vannfjerning pr cm² i forhold til små fisk. Dette ser man også fra figur 7 under der avvanningshastigheten er beregnet pr m² fisk pr time.



Figur 7: Vannfjerningshastighet pr m² fisk pr time for fisk med ulik størrelse under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 0,8 m/s (mellom brettene)

Årsaken til dette kan være at stor fisk har større muskelfibre i forhold til mindre fisk, dvs. en annerledes overflatestruktur som kan påvirke tørkehastigheten. Dette er kun en teori, så observasjonen er dermed et av flere tidligere funnet ubesvarte spørsmål om hva som skjer på overflaten under tørking av saltfisk til klippfisk. Tradisjonell tørketeori stemmer ikke med reelt målte tørkeforløp på klippfisk. Empiriske (målte verdier) er det som gir de beste svarene inntil man finner teoretiske modeller som stemmer godt med praktiske målinger.

Hvor mye fiskens størrelse påvirker vannfjerningshastigheten gjennom ulike perioder i tørkeprosessen er presentert i figur 8 under, som viser tørkehastigheten pr m² fisk. Man ser ut fra denne at størrelsens betydning er størst i første del av tørkeprosessen, men den har fortsatt en innvirkning også etter 48 timer.



Figur 8: Vannfjerningshastighet pr m² fisk pr time for fisk med ulik størrelse under forskjellige perioder i tørkeforløpet ved 22 °C, 40 % RH og 3,0 m/s.

3.3 KAPASITETSBETRAKTNINGER FOR LITEN KONTRA STOR FISK.

For å sammenligne kapasiteter i en tunnel der man skal tørke ulike størrelser, må areal korreleres med antall kg fisk man får inn i tunnelen. Lik mengde luft over hvert brett er sentralt for sammenligning, og ettersom liten fisk er tynnere enn større fisk, så vil antall brett for små fisk være flere enn for stor fisk.

Beregningseksempel 1: Vannfjerning pr vogn med liten kontra stor fisk

Ofte har tunneler en høyde som gir plass til ca 20 brett, der hvert brett bygger ca 10 cm. Stor fisk (3-4 kg) har en tykkelse som i gjennomsnitt er 2 cm høyere enn liten fisk (1-1,5 kg). For å få samme spalte mellom fisk og neste brett for å få nok luft, vil det for stor fisk være plass til 16 brett.

Setter areal av brett til 1,0m x 1,2 m, og antar 70 % utnyttelse av areal på brettet:

Antall små fisk pr vogn (torsk 1,5 kg): $70 \% \cdot (100 \cdot 120 \text{ cm}) / 654 \text{ cm}^2 = 12,8 \text{ stk}$

Antall store fisk pr vogn (torsk 3 kg): $70 \% \cdot (100 \cdot 120 \text{ cm}) / 981 \text{ cm}^2 = 8,6 \text{ stk}$

Antall kg små fisk pr vogn: $20 \text{ brett} \cdot 12,8 \text{ stk} \cdot 1,5 \text{ kg} = 385 \text{ kg}$

Antall kg store fisk pr vogn: $16 \text{ brett} \cdot 8,6 \cdot 3,0 \text{ kg} = 413 \text{ kg}$

(mengde fisk pr vogn vil bli benyttet i beregninger videre i rapporten)

Gitt tørkeforhold: 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (Figur 6)

Vannfjerning per vogn første 24 timer, små fisk: $385 \text{ kg} \cdot 4,59 \text{ g H}_2\text{O/kg fisk} \cdot \text{time} \cdot 24 \text{ timer}$
 $= 42,4 \text{ kg H}_2\text{O}$

Vannfjerning per vogn første 24 timer, stor fisk: $413 \text{ kg} \cdot 4,29 \text{ g H}_2\text{O/kg fisk} \cdot \text{time} \cdot 24 \text{ timer}$
 $= 42,5 \text{ kg H}_2\text{O}$

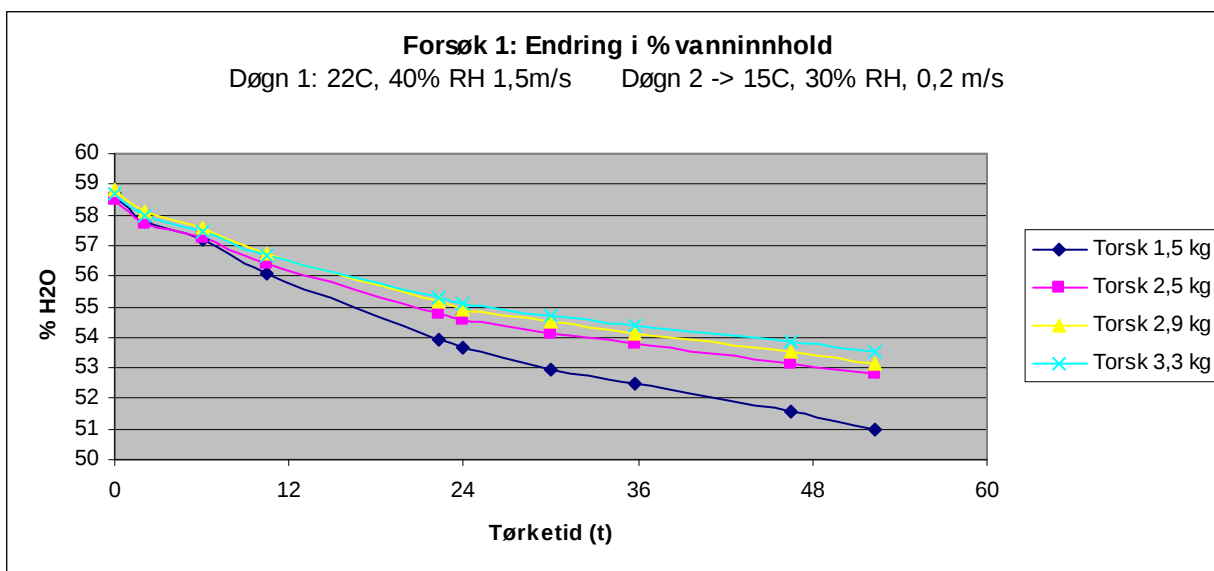
Mengde vann fjernet **pr vogn** første døgn i tunnel er dermed omtrent den samme for stor kontra liten fisk når startvanninnholdet er det samme, og størrelsen er ivaretatt.

I vogner med ulik mengde fisk (som her for stor og liten fisk), vil naturlig nok total mengde vann som skal fjernes fra de ulike vognene være forskjellig for å nå samme sluttvanninnhold.

Beregningseksempel 2: Mengde vann i liten kontra stor fisk

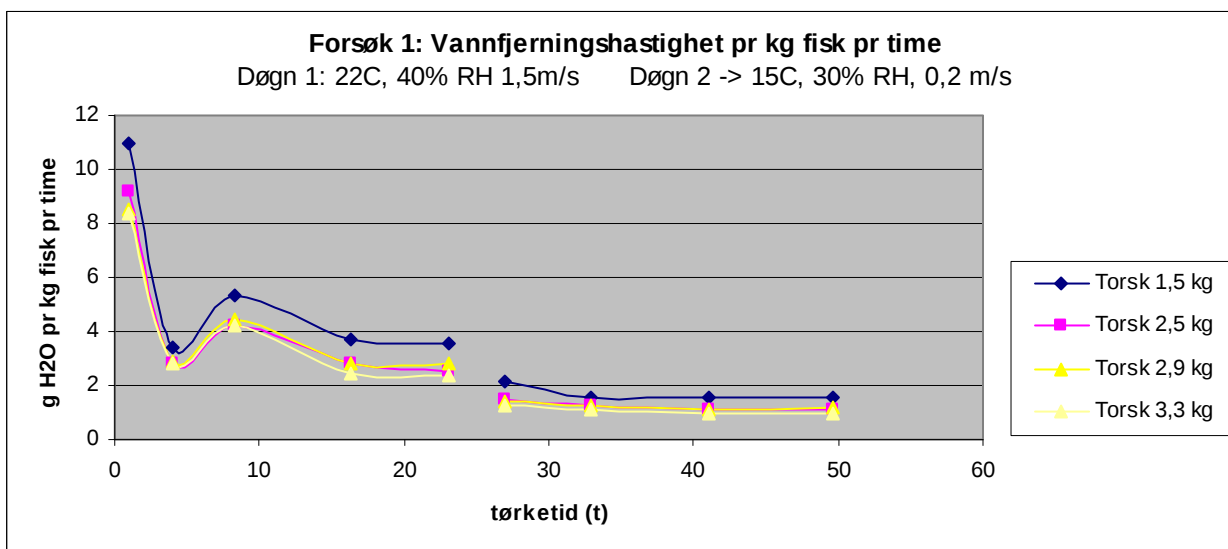
Ved et gitt startvanninnhold (her: 57 %) inneholder vogn med liten fisk 219,5 kg vann, mens vognen med stor fisk inneholder 235,4 kg vann. Ved tørking til 51 % sluttvanninnhold i tunnelen, vil det være nødvendig å fjerne 47,8 kg vann fra vogn med liten fisk, mot 50,6 kg vann i vogn med stor fisk. Som vist i beregningseksempel 1, er antall kg vann fjernet pr vogn omtrent den samme for liten kontra stor fisk første døgn. Vognen med stor fisk må derfor stå lengre i tunnelen for å få samme sluttvanninnhold.

Ved å trekke ut og sammenligne enkeltfisker med nøyaktig samme startvanninnhold får man et inntrykk av hvordan vekten på fisken påvirker vanninnholdet underveis i tørkeprosessen ved de gitte betingelsene (22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s). Resultatene i figur 9 under viser tydelig at det går raskere å komme ned til ønsket sluttvanninnhold dess mindre fisken er (og mindre vann trengs å bli fjernet). Etter 23 timer har fisken med vekt 3,3 kg nådd 55 %, mens fisken på 1,5 kg har nådd det samme vanninnholdet etter 16 timer



Figur 9: Endring i % vanninnhold for fisk med ulik størrelse under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)

Selv om resultatene i figur 9 er basert på et lavt antall fisk, og har dermed en usikkerhet, viser grafene tydelig at vognene kan gå raskere igjennom tunnelen når det tørkes liten fisk kontra stor fisk. Figur 10 under, viser at vannfjerningshastigheten er større for liten fisk i forhold til stor fisk.



Figur 10: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for torsk med ulik størrelse under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)

Beregningseksempel 3: Kapasitet i tunnel med liten kontra stor fisk

Et tenkt driftstilfelle (22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s, her gjennom hele tunnelen) der man mot formodning valgte å tørke batchvis, dvs. hele tunnelen fylles, tørkes og så tømmes, er målet å tørke fisk fra et vanninnhold på 57,8 % til 55 % før sluttørking i eget lager. Tunnelen ville da på bakgrunn av resultatene i figur 9 omsatt 261 tonn saltfisk ved små fisk (16 timers syklus), og 194 tonn for stor fisk (23 timers syklus) pr uke.

Forutsatt sluttørking i eget lager med ubegrenset plass ville denne løsningen ført til en kapasitet i tunnelen pr uke på 207 tonn klippfisk (48 % vanninnhold) ved små fisk, mot 154 tonn ved stor fisk, dvs. en kapasitetsreduksjon på 25 % ved å tørke stor kontra liten fisk.

Eksempellet er kun presentert for å vise et anleggs kapasitetsendring ved å tørke stor kontra liten fisk under ellers like forhold. Det er selvfølgelig ikke 40 % RH gjennom hele tunnelen, og det er ikke mulig å håndtere så store mengder innenfor korte sykluser. Det ville samtidig krevd at driftspersonell måtte ha vært tilstede og satt inn og tatt ut fisk på varierende tidspunkt over døgnet, noe som ikke er praktisk.

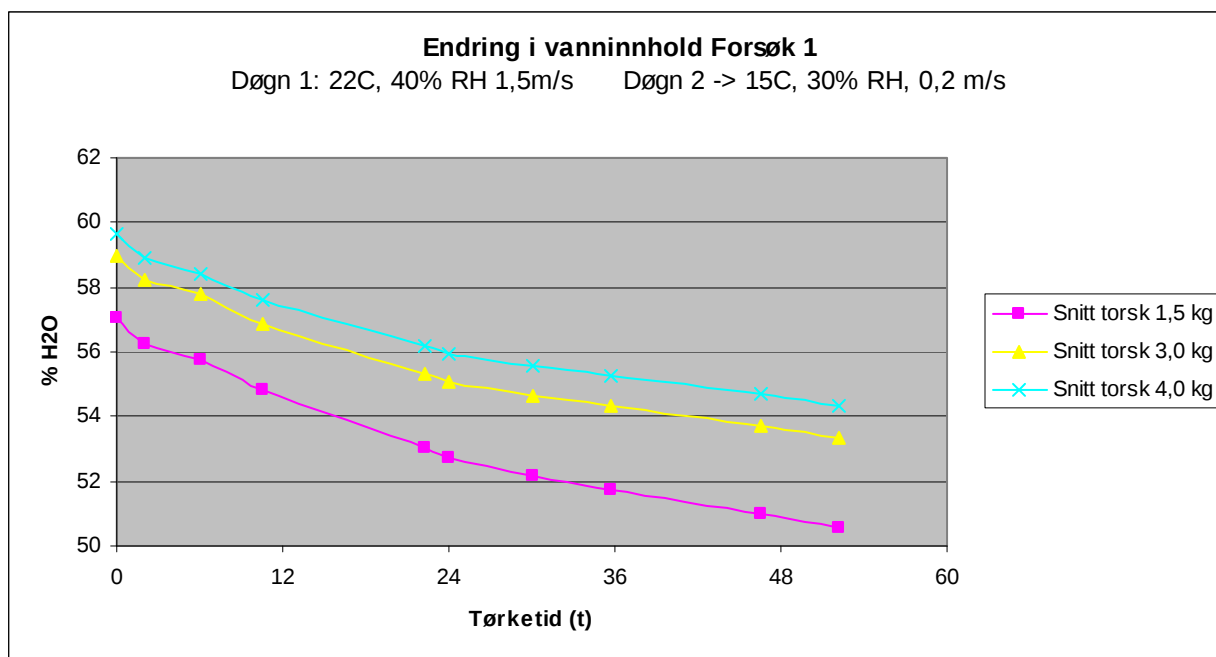
En slik batchtørking ville nødvendigvis blitt kjørt i 24 timers syklus, noe som ville ført til at liten fisk hadde blitt satt til sluttørking med et vanninnhold på 53,7 % og stor fisk ville blitt tatt ut av tunnelen med et vanninnhold på 55 %.

3.4 ULIKT STARTVANNINNHOOLD PÅ LITEN OG STOR FISK

I tillegg til at en vogn med stor fisk inneholder mer vann som skal fjernes under tørking, ligger en ekstra stor utfordring i at stor fisk ofte har et høyere startvanninnhold i forhold til liten fisk etter samme saltmodningsprosess. Fra figur 11 ser man at startvanninnholdet etter samme saltmodningsprosess kan variere fra 57 % for 1,5 kg torsk til 59,5 % for 4 kg torsk

Beregningseksempel 4: Ekstra tid i tunnel ved høyt startvanninnhold

Fra figur 11 under, ser man at startvanninnholdet etter samme saltmodningsprosess kan variere fra 57 % for 1,5 kg torsk til 59,5 % for 4 kg torsk. For en gitt vogn, tilsvarer dette at 27 kg mer vann pr vogn må fjernes i tunnelen ved stor fisk kontra liten fisk. Dette betyr at en vogn med 4 kg torsk må stå ca 16 timer i tunnelen før den har nådd samme vanninnhold som den 1,5 kg fisken har før den begynner å tørke.

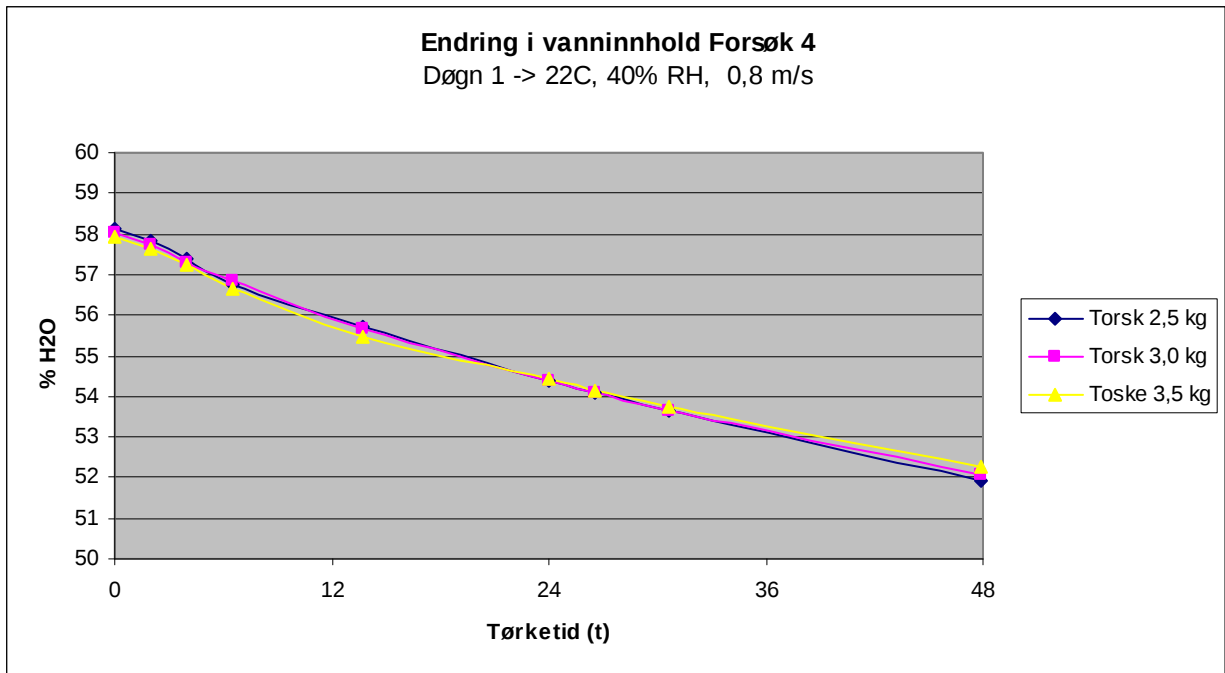


Figur 11: Endring i % vanninnhold for fisk med ulik størrelse under tørking første døgn ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)

Dette viser nødvendigheten med at saltfiskene må størrelsessorteres før prosessering startes. Stor fisk må saltmodnes lengre enn liten fisk. Ved lik saltmodning vil stor fisk ha høyere startvanninnhold, og de første 16 timene av tørkeprosessen (basert på snitt vannfjerning første døgn) går med til å fjerne det ”ekstra” vannet man ikke tok ut i saltmodningsprosessen for stor fisk.

3.5 LUFTHASTIGHET PÅVIRKER VANNFJERNINGSHASTIGHETEN AVHENGIG AV FISKENES STØRRELSE

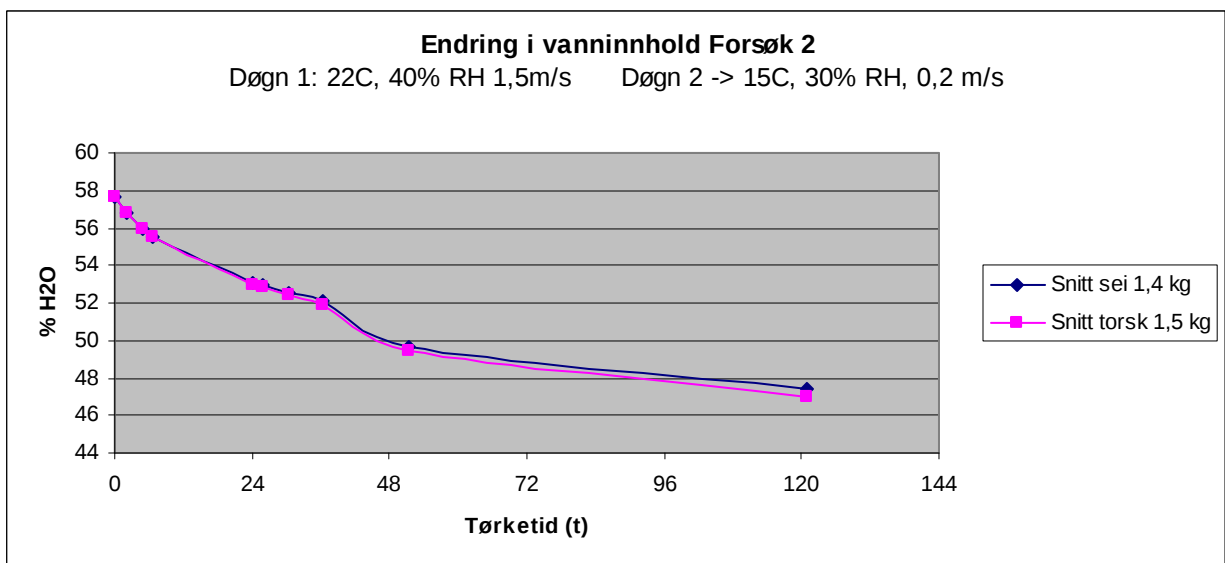
Fra figur 12 under, der torsk med vekt fra 2,5 kg til 3,5 kg med likt startvanninnhold ble tørket under like forhold (her; lav lufthastighet, 22 °C, 40 % RH og 0,8 m/s), finner man at fiskene følger hverandre relativt jevnt når det gjelder vanninnhold, selv om det også her er den største fisken som får noe høyere sluttvanninnhold etter tørking. Dette er noe ulikt resultatene fra når man tørker med høyere lufthastighet, for eksempel 1,5 m/s, og det kan se ut som at den store variasjon av vannfjerningshastigheten mellom stor og liten fisk reduseres ved liten lufthastighet. Denne teorien er basert på resultater fra et begrenset antall enkeltfisker med relativt beskjeden vektforskjell, og det kan derfor ikke konkluderes med dette.



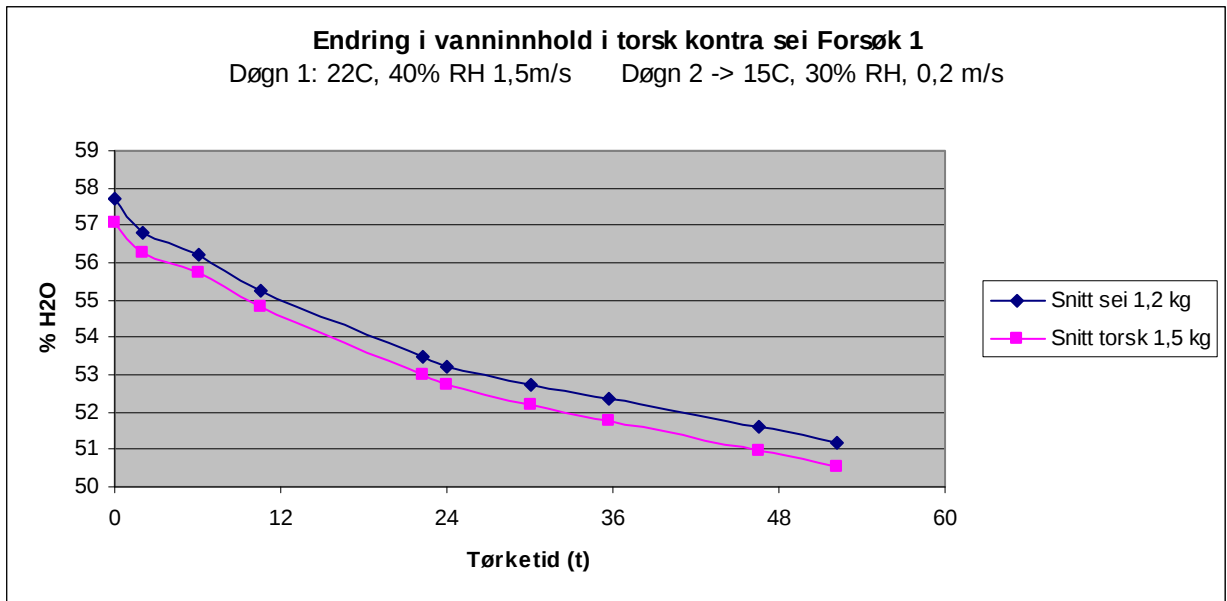
Figur 12: Endring i % vanninnhold for fisk med ulik størrelse under tørking ved 22°C, 40% RH og 0,8 m/s (mellom brettene)

3.6 FORSKJELL MELLOM TORSK OG SEI

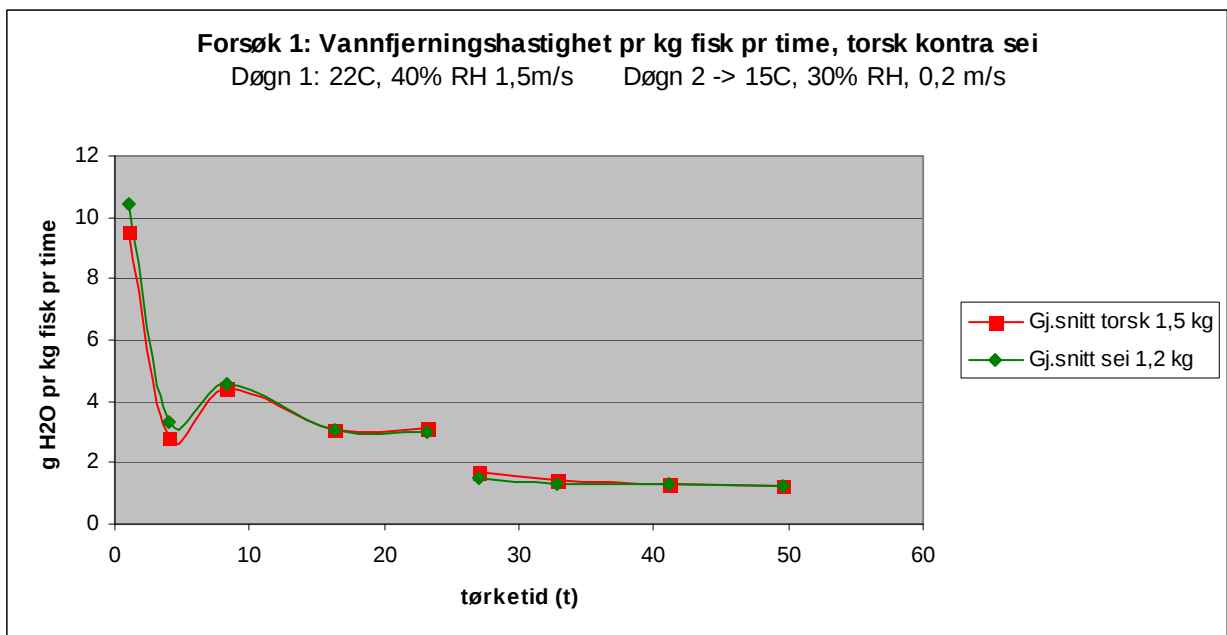
Ut fra figur 13 og 14 under, ser man at torsk og sei med vekt ~1,5 kg følger hverandre tett når det gjelder vanninnhold under tørkeforløpet. Fra figur 15 ser man likevel at vannfjerningshastigheten er litt større for sei kontra torsk.



Figur 13: Endring i % vanninnhold for torsk og sei under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)



Figur 14: Endring i % vanninnhold for torsk og sei under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)



Figur 15: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for torsk og sei under tørking ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s (mellom brettene)

Vannfjerningshastigheten for sei er 5 % høyere enn for torsk (4,86 mot 4,60 g vann fjernet pr kg pr time) det første døgnet under de gitte forholdene (22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s). I sluttørkingsperioden er avvanningshastigheten tilnærmet lik.

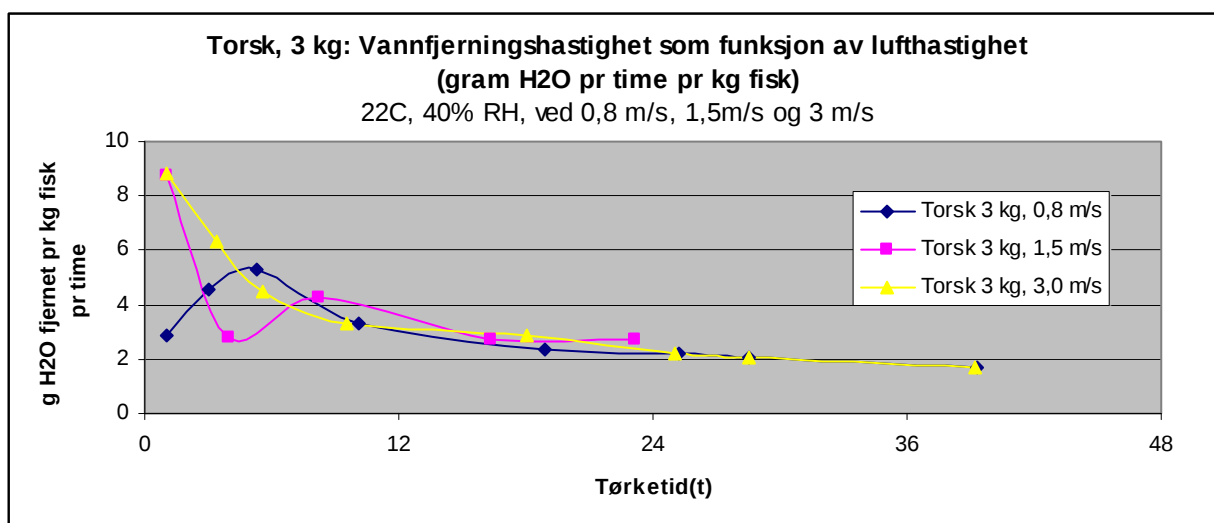
4 AVVANNINGSHASTIGHET I TUNNEL

Tidligere tørkeforsøk har vist et betydelig potensial for økning i tørketunnelenes kapasitet og utnyttelse av avfuktingssystemet dess mer ”ny og våt” saltfisk som settes inn i tunnelene. Den industrielle løsningen på dette vil som nevnt vært å optimalisere driften ved å ta nesten tørr fisk ut fra tunnelen, og tilføre mer fisk med høyt vanninnhold.

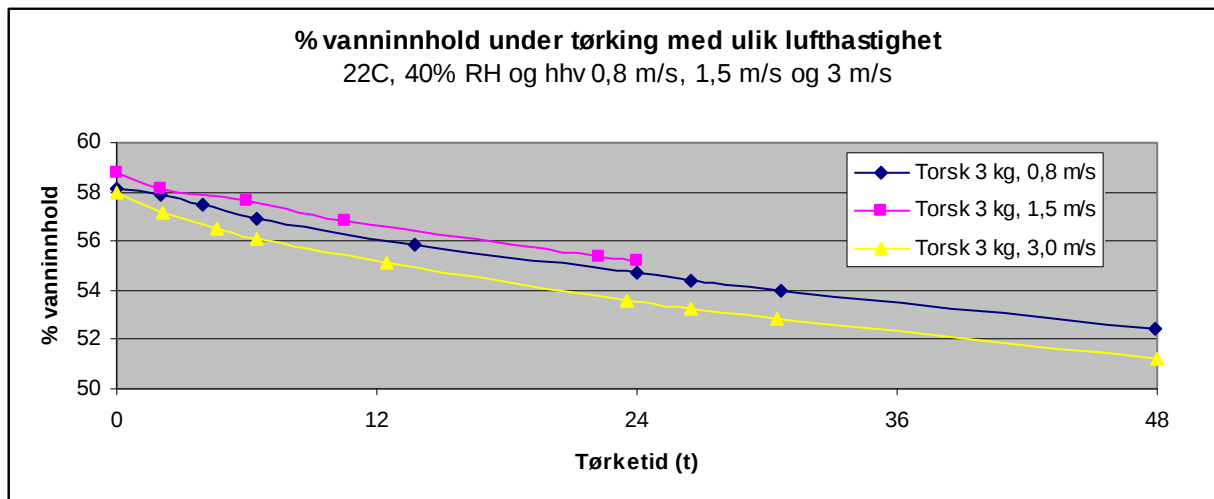
Sammen med å bestemme tørkeluftens påvirkning på tørkehastighet i tunnelen, vil det her bli vurdert beste tidspunkt for uttak av produkt fra tørken til eget sluttlager.

4.1 LUFTHASTIGHETENS PÅVIRKNING I TUNNEL:

Torsk 3 kg ble tørket med lik temperatur (22 °C), lik relativ fuktighet (40 %), men med varierende lufthastighet (0,8 – 1,5 – 3,0 m/s). Ut fra figur 16 under, ser man at lufthastigheten spiller en betydelig rolle på vannfjerningshastigheten i første del av tørkingen, men at etter omkring 12 timer er lufthastighetens betydning mye mindre. Fra figur 17 ser man konsekvensene av dette, at vanninnholdet ved tørking med 3,0 m/s gir et raskere fall i vanninnholdet i forholdt til tørking ved 0,8 m/s. Etter 48 timer i tunnelen ligger fisk som er tørket ved 3 m/s 8 timer før fisk tørket ved 0,8 m/s i tørkeprosessen, og det meste av dette forspranget er tatt de første 12 timene.

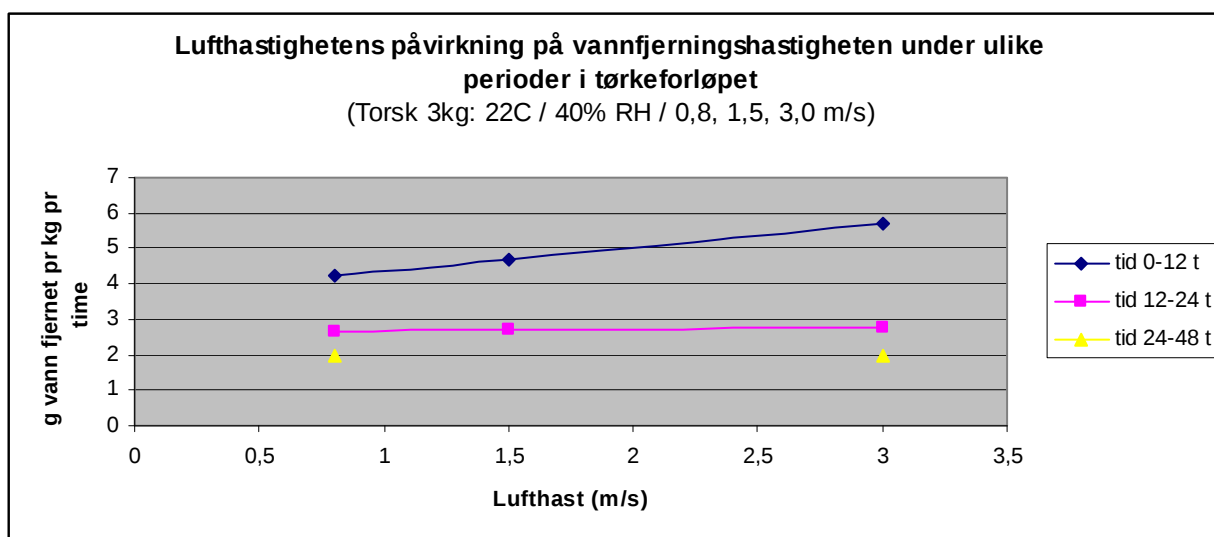


Figur 16: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 3 kg torsk med varierende lufthastighet (0,8, 1,5, og 3,0 m/s mellom brettene) under tørking ved 22 °C, 40 % RH



Figur 17: Endring i % vanninnhold for 3 kg torsk med varierende lufthastighet (0,8, 1,5 og 3,0 m/s mellom brettene) under tørking ved 22 °C, 40 % RH

Figur 18 viser at vannfjerningshastigheten øker med økende lufthastighet i perioden 0-12 timer etter start, mens lufthastigheten allerede etter 12-24 timer har betydelig mindre innvirkning. I perioden mellom 24 til 48 timer ser man ingen fordel med å øke lufthastigheten.



Figur 18: Lufthastighetens påvirkning på vannfjerningshastighet under ulike perioder i tørkeforløpet for 3 kg torsk med varierende lufthastighet (0,8, 1,5, og 3,0 m/s mellom brettene) under tørking ved 22 °C, 40 % RH.

Beregningseksempel 5: Lufthastighetens påvirkning på vannfjerning

Fra figur 18 finner man vannfjerningshastigheten i snitt over gitte perioder under innledende tørking:

Torsk 3 kg, 0,8 m/s:	Første 12 timer: 4,26 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
	12 til 24 timer: 2,63 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
	Fra 24 til 48 timer: 1,99 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
Torsk 3 kg, 1,5 m/s:	Første 12 timer: 4,66 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
	12 til 24 timer: 2,72 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
Torsk 3 kg, 3,0 m/s:	Første 12 timer: 5,72 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
	12 til 24 timer: 2,76 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time
	Fra 24 til 48 timer: 1,97 g H ₂ O fjernet pr kg fisk pr time

Ved å øke lufthastigheten fra 0,8 m/s til 3,0 m/s første 12 timer vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 34 %. I denne perioden er det også stor forskjell på 1,5 og 3,0 m/s.

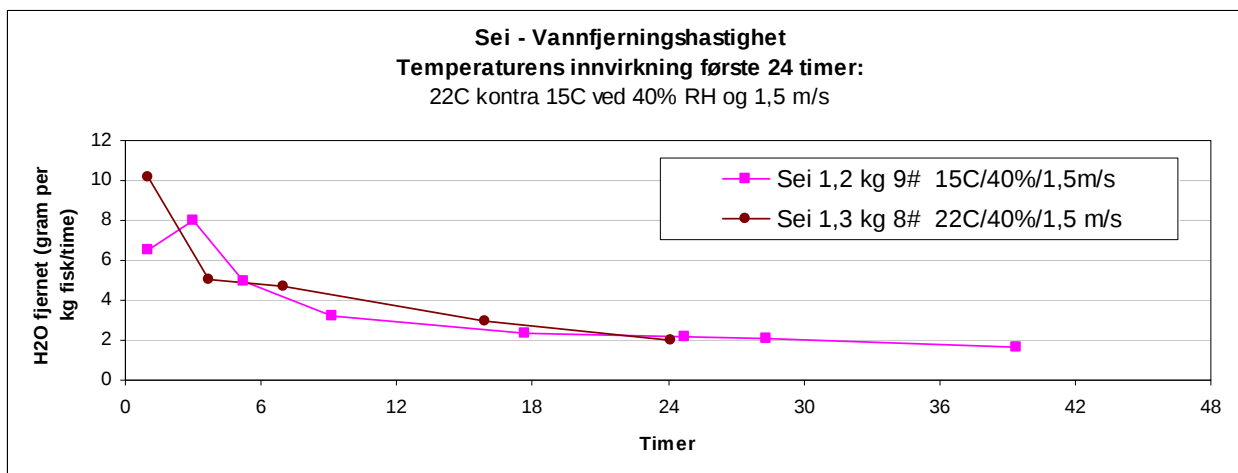
Etter tørking ved 3 m/s i 48 timer vil man ha en gjennomsnittlig vannfjerningshastighet på 3,11 g vann fjernet pr kg fisk pr time, ved 0,8 m/s har man en tilsvarende vannfjerningshastighet på 2,72 som er en reduksjon på 12,5 %.

Dette betyr at man ved 3 m/s har fjernet 57,5 kg vann pr vogn (med 385 kg saltfisk, 57 % startvanninnhold), mot 50,3 kg vann ved 0,8 m/s. Fisken ved 3 m/s har da et vanninnhold på 49,4 % i forhold til ved 0,8 m/s som tilsvarende vil 50,5 % før fisken tas ut til sluttørking i eget lager.

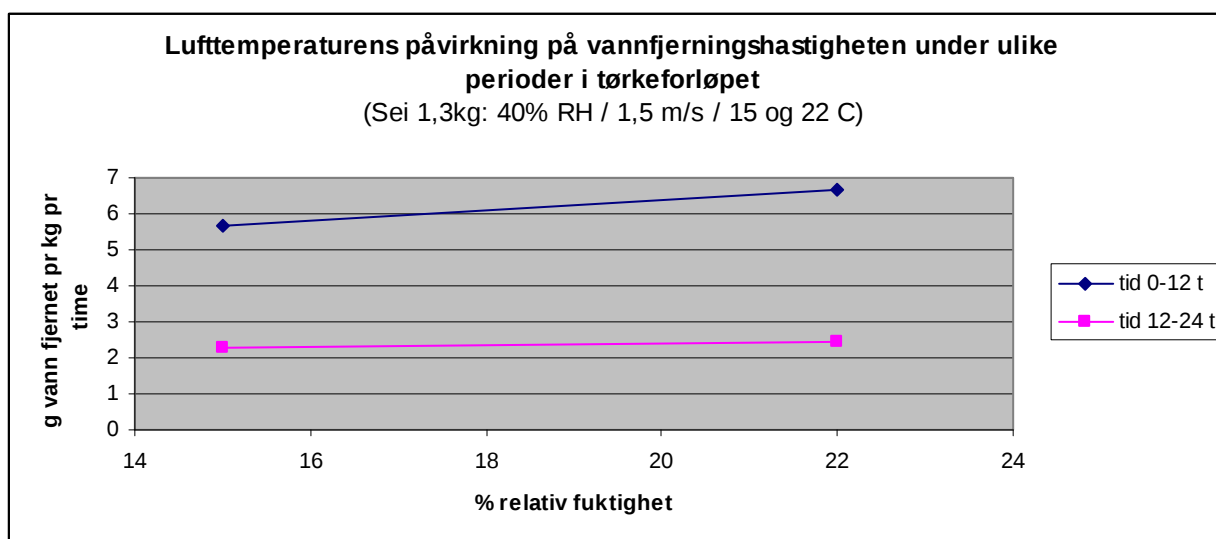
Det er viktig å merke seg at en tunnel må være lengre (flere vogner i luftretningen) når man har høy lufthastighet for å kunne få en optimal oppfukning av tørkeluften gjennom tunnelen.

4.2 LUFTTEMPERATURENS PÅVIRKNING I TUNNEL

Sei (1,3 kg) ble tørket ved 15 og 22 °C under ellers like forhold (40 % RH og 1,5 m/s). Ut fra figur 19, ser man at vannfjerningshastigheten ligger noe høyere under tørking ved 22 °C kontra 15 °C i første del av tørkeprosessen. Fra figur 20 ser man at temperaturens betydning er vesentlig de første 12 timene, mens fra 12 til 24 timer etter start er temperaturens betydning liten.



Figur 19: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,4 kg sei med varierende lufttemperatur (15 og 22C) under tørking ved 40 % RH og 1,5 m/s.



Figur 20: Lufttemperaturens påvirkning på vannfjerningshastighet under ulike perioder i tørkeforløpet for 1,3 kg sei. Tørking ved 15 og 22 °C, 40 % RH, 1,5 m/s.

Beregningseksempel 7: Temperaturen påvirkning på vannfjerning

Fra figur 20 finner man hvordan temperaturen påvirker vannfjerningshastigheten i snitt over gitte perioder under innledende tørking:

Sei 1,3 kg, 15 °C: Første 24 timer: 3,97 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time

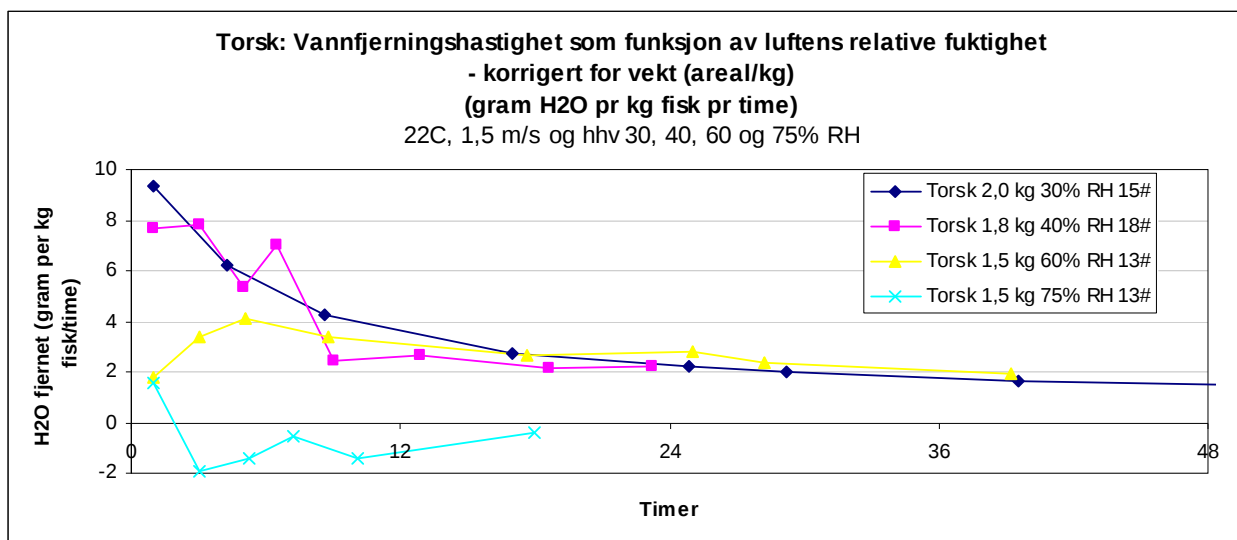
Sei 1,3 kg, 22 °C: Første 24 timer: 4,56 g H₂O fjernet pr kg fisk pr time

Ved å øke lufttemperaturen første døgn fra 15 til 22 °C vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 15 %.

For en vogn med 385 kg sei, betyr dette at 42,1 kg vann er fjernet første døgn ved 22 °C mot 36,7 kg ved 15 °C.

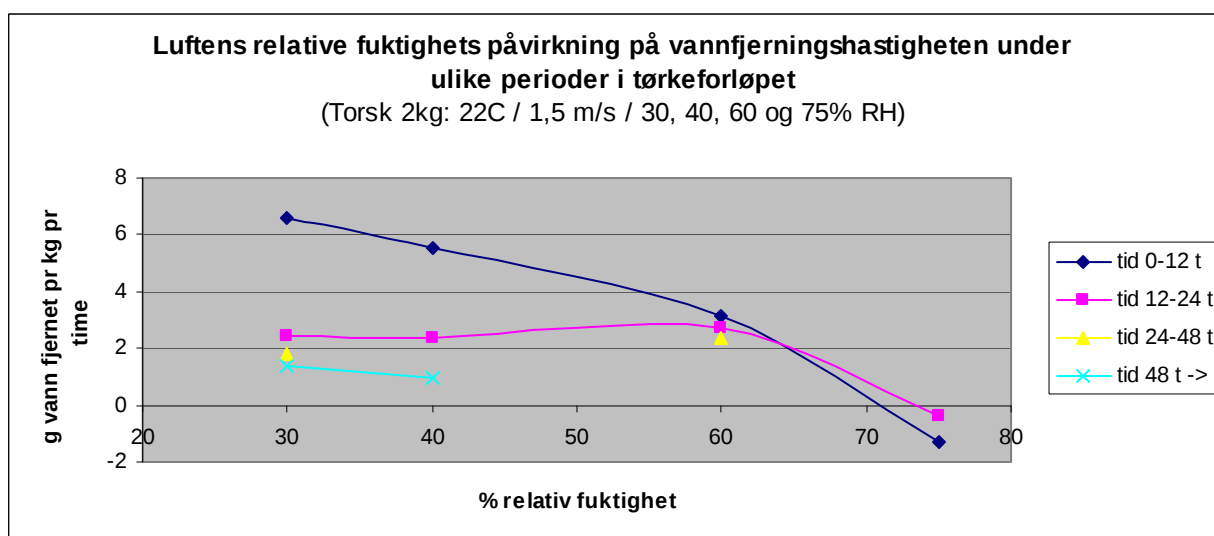
4.3 LUFTFUKTIGHETENS PÅVIRKNING I TUNNEL

Torsk med vekt 1,5-2,0 kg ble tørket ved ulik relativ fuktighet i tørkeluften (30, 40, 60 og 75 % RH), og ellers like forhold (22 °C, 1,5 m/s). For å direkte sammenligne resultatene med fiske av litt ulik størrelse ble vannfjerningshastigheten korrigert for overflate pr kg som vist tidligere i rapporten. Figur 21 viser hvordan relativ fuktighet påvirker vannfjerningshastigheten, og stort tørkepotensial (lav relativ fuktighet) har betydelig innvirking på denne. Ved tørking under høy fuktighet (> 75 %), tar fisken opp fuktighet.



Figur 21: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,5 – 2,0 kg torsk med varierende luftfuktighet (30, 40, 60 og 75 % RH) under tørking ved 22 °C og 1,5 m/s.

Ut fra figur 22 under, ser man at relativ fuktighet har stor betydning i første del av tørkingen, og at betydningen blir mindre utover tørkeprosessen.



Figur 22: Luftfuktighetens påvirkning på vannfjerningshastighet under ulike perioder i tørkeforløpet for 1,5-2,0 kg torsk. Tørking ved 30, 40, 60 og 75 % RH, 22 °C, 1,5 m/s.

Beregningseksempel 8: Luftfuktighetens påvirkning på vannfjerning

Fra figur 22 finner man hvordan luftens relative fuktighet påvirker vannfjerningshastigheten i snitt under innledende tørking (22 °C og 1,5 m/s). Vannfjerningshastigheten er korrigert (areal pr kg fisk) pga at kurvene presenterer fisker med litt ulike vekt.

Torsk 2,0 kg ved 30 % RH: 4,95 gram H₂O per kg fisk per time første 24 timer

Torsk 1,8 kg ved 40 % RH: 4,68 gram H₂O per kg fisk per time første 24 timer

Torsk 1,5 kg ved 60 % RH: 3,07 gram H₂O per kg fisk per time første 24 timer

Torsk 1,5 kg ved 75 % RH: -1,14 gram H₂O per kg fisk per time første 24 timer

Ved å tørke ved 30 % relativ fuktighet øker vannfjerningshastigheten første døgnet med rundt 60 % i forhold til å tørke ved 60 % relativ fuktighet. I praksis vil tørkeluften i en tunnel være oppfuktet til omkring 60 % RH før den kommer i kontakt med den nyinnsatte fisken.

Vannfjerningen pr vogn første døgnet vil i praksis bli: 385 kg * 3,07 g/ kg fisk pr time * 24 timer = 28,4 kg vann fjernet pr vogn.

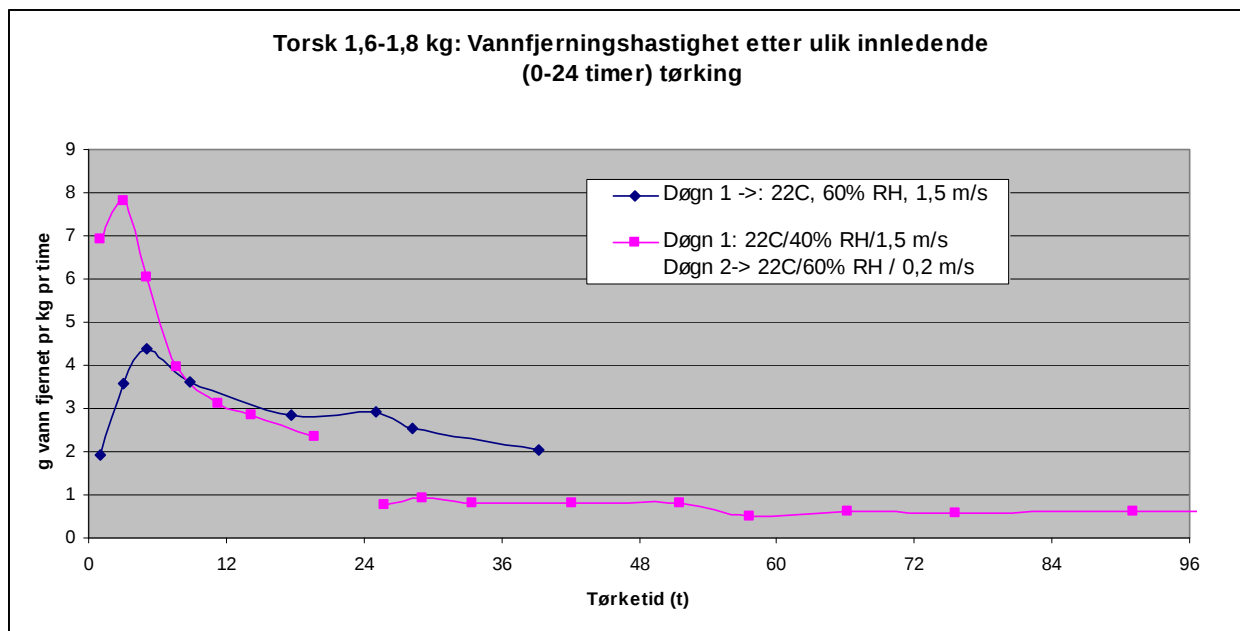
Hvis det hadde vært mulig å tørke fisken første døgnet i tørrere luft, for eksempel ved å ha to ulike tunneler, ville vannfjerningen pr vogn første døgnet kunne bli (ved 40 % RH i snitt): 385 kg * 4,68 g/ kg fisk pr time * 24 timer = 43,2 kg vann fjernet pr vogn.

Kapasiteten ville øke med over 50 %, men dette ville krevd et helt nytt tørkekonsept, med separat tørking av nyinnsatt og våt fisk, samt at det ville ført til utfordringer med å utnytte varmpumpens potensial pga at luften ikke hadde blitt optimalt oppfuktet.

4.4 OPTIMAL OPPHOLDSTID I TUNNELEN (INNLEDENDE TØRKING)

Som vist vil ulike driftsforhold (temp, RH, hastighet) under tørkingen i tunnelen føre til varierende vannfjerningshastigheter. En optimal tømme/fylle syklus av tunnelen for maksimal vannfjerning fra fisken kan være for eksempel 14 timer, men pga. at dette krever en 5-skift arbeidsplan ved kontinuerlig drift over tid, vil dette sannsynligvis vært uaktuelt å gjennomføre. Det er imidlertid viktig å fylle ”ny og våt” fisk så jevnlig som mulig inn i tunnelen, og det er derfor valgt å lage en driftsplan der man tar utgangspunkt i fylling hver 12 time.

Ulik innledende tørking (60 % kontra 40 % RH) fører til at mer vann er igjen i fisken etter 24 timer, og man ser av vannfjerningshastigheten fra figur 23 at det er en fordel å ha en viss lufthastighet over produktet (0,2 kontra 1,5 m/s) også etter 24 timer. Dvs. det er for tidlig å sette fisken på et egnet lager (med lufthastighet på 0,2 m/s) etter 24 timer. Reelt i en tunnel vil den våteste fisken oppleve den mest fuktige tørkeluften ettersom luften fuktes opp gjennom tunnelen før den treffer den nylig innsatte fisken. Nyinnsatt fisk vil derfor tørkes med luft som har omkring 60 % RH, og man kan forvente at lufthastigheten er viktig også i perioden 24 til 48 timer. Det er derfor nødvendig å ha fisken inne i tunnelen i 2 døgn før sluttørking i eget lager.



Figur 23: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,6-1,8 kg torsk med varierende luftfuktighet første døgn (40 og 60 % RH) under tørking ved 22 °C og 1,5 m/s før sluttørking.

5 AVVANNINGSHASTIGHET UNDER SLUTTØRKing

Etter 48 timer, tas fisk med et godt tørrsjikt ut fra tørketunnelen, hvor siste fase av tørkingen nesten like effektivt kan gjøres ved lav lufthastighet og relativt høy luftfuktighet. Dette vil som nevnt gi plass til mer ”ny og våt” fisk og derved økt utnyttelse av kostbar tunnel. Sluttørkingen av fisken kan gjennomføres i enklere lager eller rom med lavere lufthastighet og mindre krav til luftfuktighet.

5.1 LUFTHASTIGHETENS PÅVIRKING I SLUTTØRKingEN.

For å vise hvordan lufthastigheten påvirker vannfjerningshastigheten under sluttørkingen, henvises det til tidligere viste figurer 16 og 17. Her ser man at etter 24 timers tørking har lufthastigheten i området 0,8 til 3,0 m/s en minimal påvirkning på vannfjerningshastigheten under sluttørkingen. Lufthastigheter mellom 0,8 til 3 m/s er å forvente inne i en tunnel, mens for et eget lager for sluttørking vil lufthastigheten kunne ligge rundt 0,2 m/s, nok til utskifting av luften.

Lufthastigheten spiller derimot en rolle under sluttørking når man sammenligner svært lav hastighet (0,2 m/s) som i et lager, med hastigheter (1,5 m/s) som kan være inne i en tunnel. Dette ser man fra figur 25 under, der gjennomsnittlig vannfjerningshastighet mellom 48 til 96 timer er ved 1,5 m/s lik 1,35 g vann pr kg fisk pr time, mot 1,13 ved 0,2 m/s i samme periode

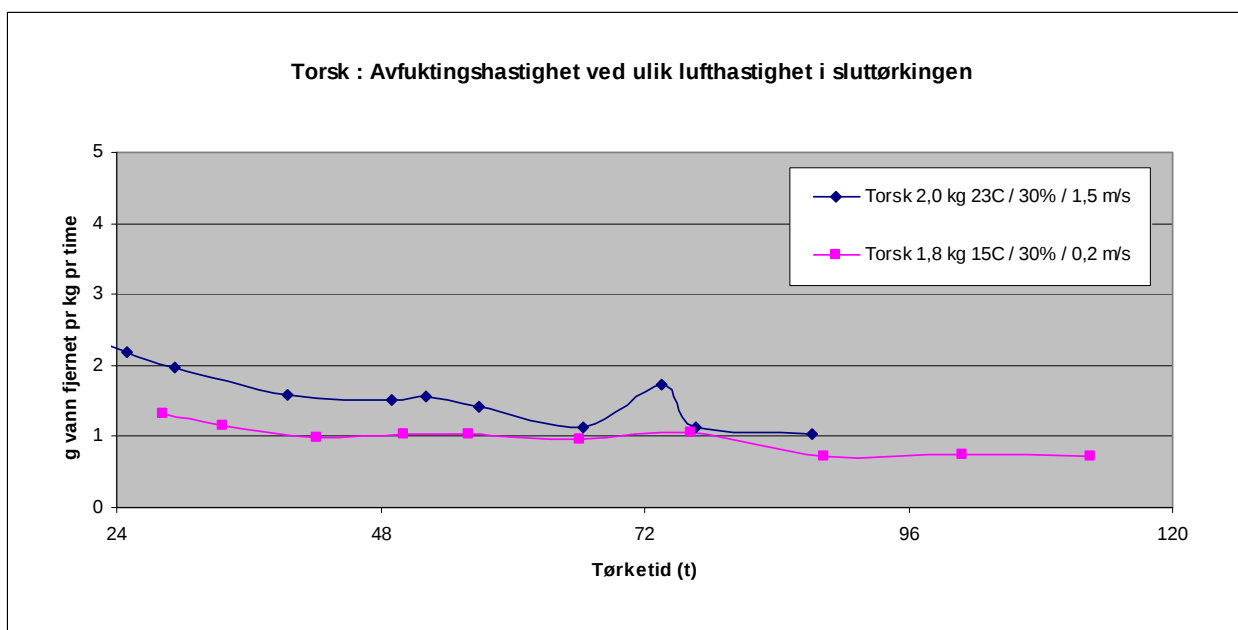
Beregningseksempel 9: Lufthastighetens påvirkning på vannfjerning

Som nevnt spiller lufthastigheten en rolle under sluttørking når man sammenligner svært lav hastighet (0,2 m/s) som i et lager, med hastigheter (1,5 m/s) som kan være inne i en tunnel. Gjennomsnittlig vannfjerningshastighet mellom 48 til 96 timer er ved 1,5 m/s lik 1,2 g vann pr kg fisk pr time, mot 0,9 ved 0,2 m/s i samme periode.

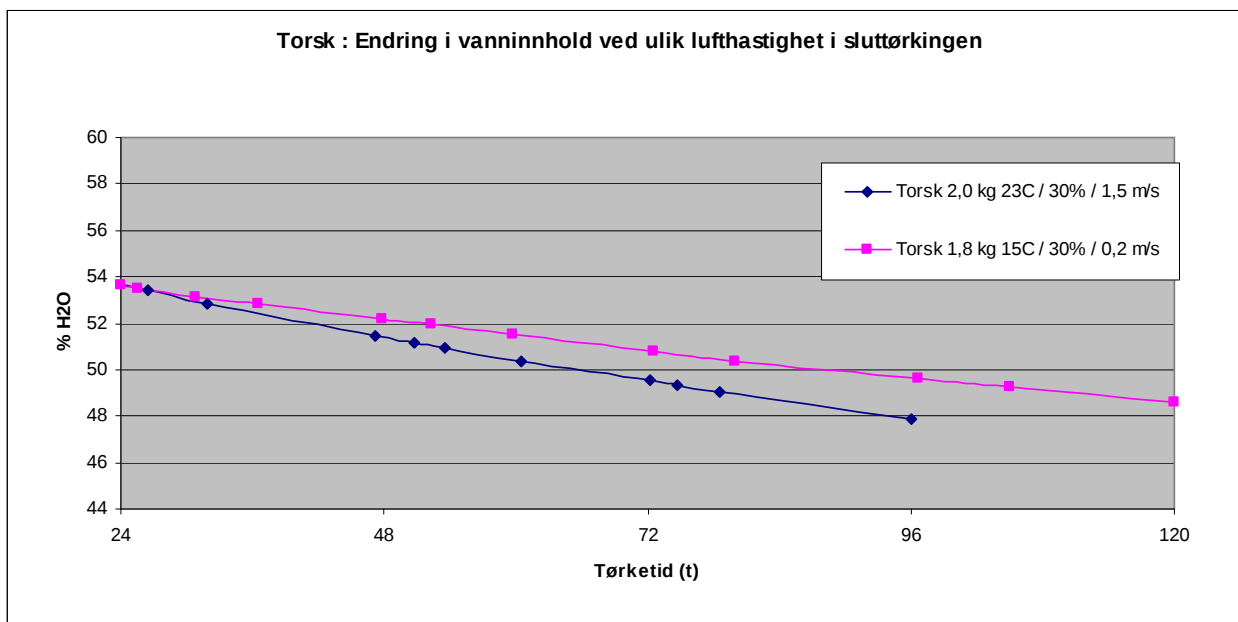
Konsekvensen av dette ser man fra figur 26, der fisken må stå på eget lager for sluttørking i 3 døgn i forholdt til 2 døgn i tunnelen for å nå samme sluttvanninnhold på 48 %.

Kommentar:

Merk at figur 25 og 26 i tillegg til hastighet også sammenligner ulik temperatur, men som det vil bli vist senere har temperaturen i sluttørkingen ingen betydning (mellom 15 til 23 °C), og man kan derfor anta at forskjell i vannfjerningshastighet kun skyldes ulik lufthastighet.



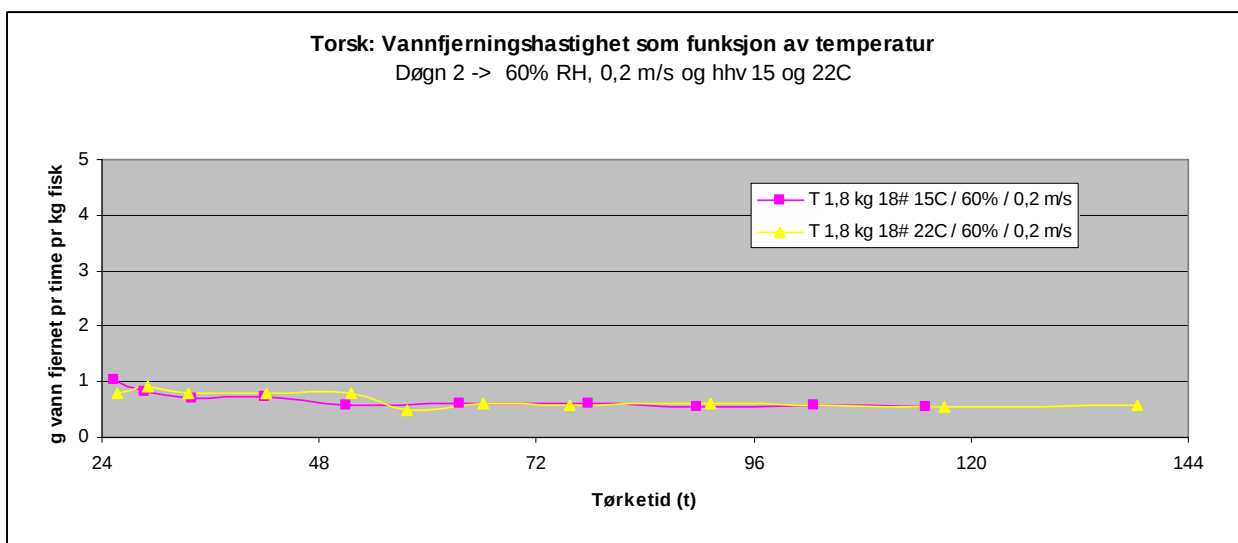
Figur 25: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,8-2,0 kg torsk med varierende lufthastighet (0,2 og 1,5 m/s) og temperatur (15 og 23 °C) ved 30 % RH.



Figur 26: Endring i % vanninnhold for 1,8-2,0 kg torsk under sluttørking i lager (0,2 m/s) og i tunnel (1,5 m/s) ved 30 % RH. Temperaturen påvirker ikke tørkehastigheten under sluttørking, og differansen mellom kurvene skyldes derfor ulik lufthastighet.

5.2 LUFTTEMPERATURENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN.

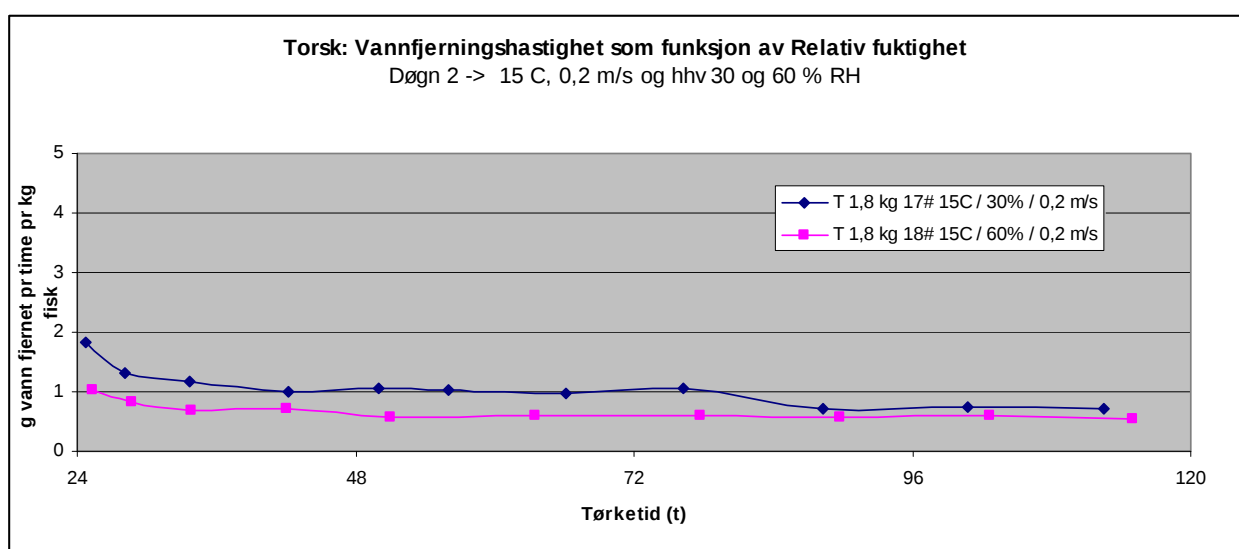
Etter lik innledende tørking første 24 timer, ble 1,8 kg torsk sluttørket i simulert lager ved 15 og 22 °C og ellers like forhold på 60 % RH og 0,2 m/s. Fra figur 27 under, ser man at vannfjernings-hastighetene gjennom sluttørkingsperioden er omtrent helt like for de ulike temperaturene. I perioden fra 48 til 120 timer faller denne fra 0,8 til 0,5 g vann fjernet pr kg fisk pr time. Dette betyr at temperaturen i eget lager for sluttørking ikke er avgjørende for tørketiden så lenge temperaturen ligger i området 15 til 22 °C.



Figur 27: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,8 kg torsk med varierende lufttemperatur (15 og 22 °C) under sluttørking ved 0,2 m/s og 60 % RH.

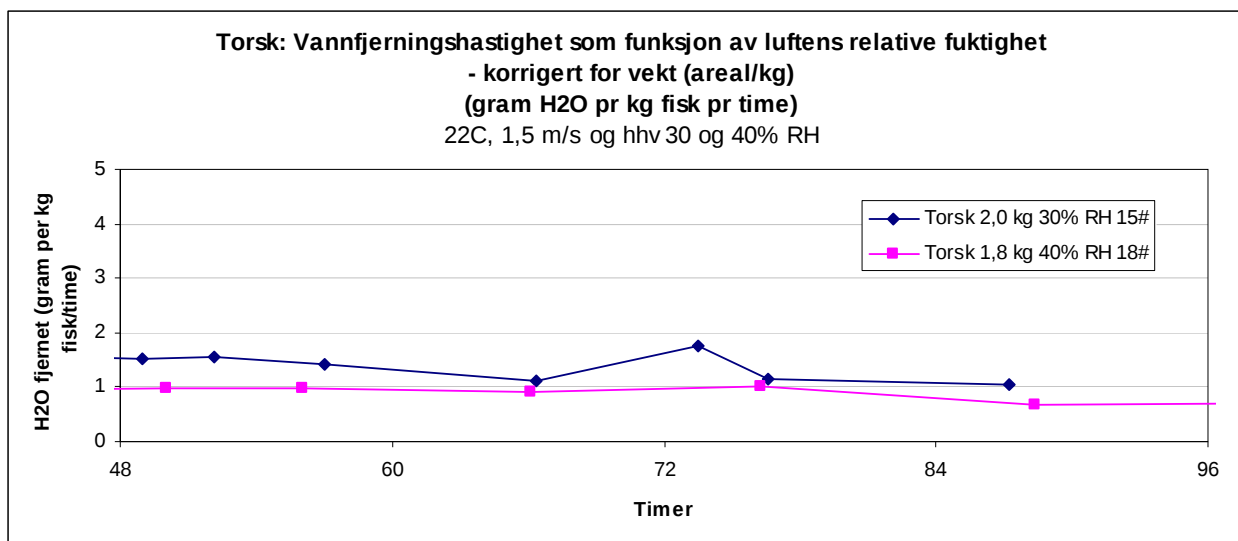
5.3 LUFTFUKTIGHETENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN.

Etter lik innledende tørking første 24 timer, ble 1,8 kg torsk sluttørket i simulert lager ved 30 og 60 % relativ fuktighet, og ellers like forhold på 15 °C og 0,2 m/s. Fra figur 28 under, ser man at vannfjerningshastighetene gjennom sluttørkingsperioden er høyere under tørking ved 30 % RH kontra 60 % RH. Vannfjerningshastigheten ved 60 % RH ligger i perioden fra 48 til 120 timer jevnt rundt omkring 0,6 g vann fjernet pr kg fisk pr time, mens den i samme periode ligger mellom 1,2 og 0,7 ved sluttørking ved 30 % RH. Det er forventet at luftfuktigheten i et sluttlager vil heller ligge i størrelsesorden 40-50 % enn 30 %, og at vannfjerningshastigheten vil ligge rundt 0,7-0,9 g vann fjernet pr kg fisk pr time. Det må tilstrebes å få så lav relativ fuktighet som mulig ved å varme uteluften maksimalt før denne går til sluttørkingen.



Figur 28: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,8 kg torsk med varierende luftfuktighet (30 og 60 % RH) under sluttørking ved 15 °C og 0,2 m/s.

Alternativt til å sluttørke klippfisk i eget lager, er å tørke fisken tørr i tunnelen. Kurvene i figur 29 under viser hvordan luftfuktigheten påvirker vannfjerningshastigheten i siste del av tørkeprosessen i en tunnel med 22 °C, 1,5 m/s og hhv. 30 og 40 % RH. Ved å tørke med relativ fuktighet på 30 % inn på tørken vil man få en vannfjerningshastighet på 1,35 g vann fjernet pr kg pr time i forhold til 0,97 ved 40 % relativ fuktighet. Tørketiden i eget sluttlager vil derfor være ca 20 % lengre i forhold til å gjennomføre sluttørkingen i tunnelen. Man får derimot ikke utnyttet overskuddsvarmen i sistnevnte tilfelle.



Figur 29: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for 1,8 – 2,0 kg torsk med varierende luftfuktighet (30 og 40 % RH) under sluttørking ved 22 °C og 1,5 m/s.

Beregningseksempel 10: Tørketid for sluttørking i eget lager kontra tunnel

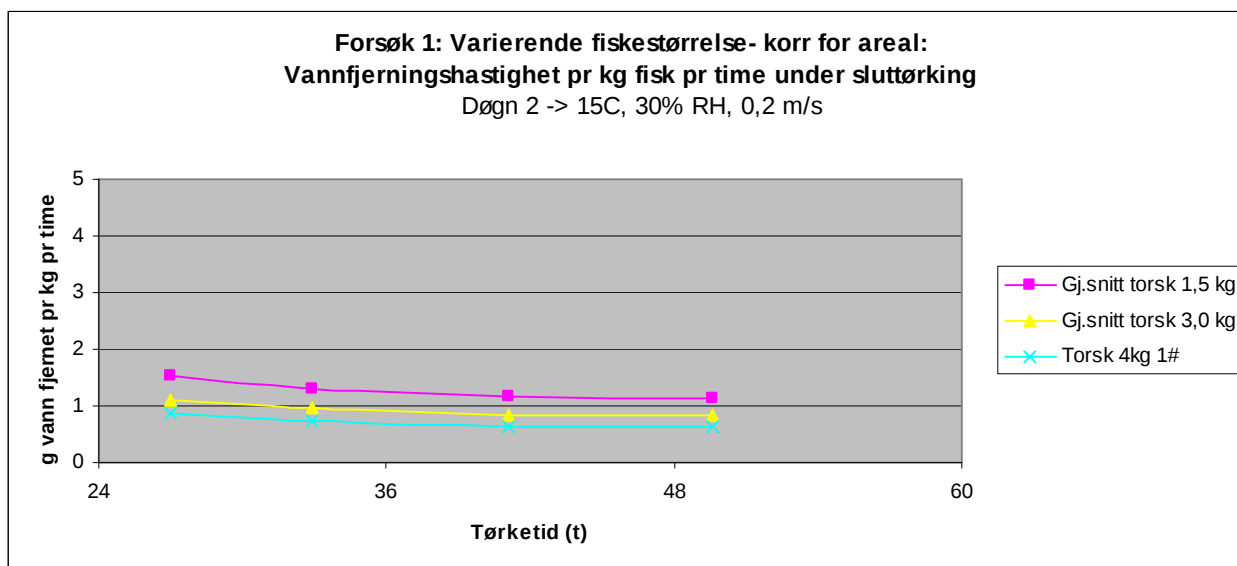
Torsk ~1,8 kg med startvanninnhold på 57 % tørkes innledningsvis i tunnel til vanninnhold på 51 %. Fisken sluttørkes til et sluttvanninnhold på 48 %, og fra en vogn med 385 kg saltfisk vil 11,6 kg vann måtte fjernes ved bruk av to metoder:

1) Fortsatt i tunnel (22 °C, 1,5 m/s, 30 % RH) med vannfjerningshastighet på 1,2 g vann pr kg fisk pr time. Fisken vil trenge 1,1 døgn på sluttørkingen i tunnelen.

2) Fisken tas ut til sluttørking i eget lager (22 °C, 50 % RH, 0,2 m/s) med vannfjerningshastighet på 0,8 g vann pr kg fisk pr time. Fisken vil trenge 1,6 døgn på sluttlager i forholdt til 1,1 døgn i tunnelen for å nå samme sluttvanninnhold på 48 %.

5.4 FISKESTØRRELSENS PÅVIRKING I SLUTTØRKINGEN.

Det er tidligere vist at fiskens størrelse påvirker vannfjerningshastigheten og dermed tunnelens kapasitet under innledende tørking i tunnel. Ut fra figur 30 under, ser man at fiskens størrelse påvirker vannfjerningshastigheten også i sluttørkingen. Under tørking ved 15 °C, 30 % RH og 0,2 m/s har en fisk på 1,5 kg en vannfjerningshastighet på 1,26 g vann pr kg fisk pr time, mot 1,01 for en 4 kg fisk som er en reduksjon på ca 20 %.



Figur 30: Vannfjerningshastigheten ($\text{g H}_2\text{O}$ fjernet pr kg fisk pr time) for klippfisk med varierende størrelse (1,5-4kg)(15 og 22 °C) under sluttørking ved 0,2 m/s og 60 % RH.

Beregningseksempel 11: Fiskestørrelsens påvirkning på kapasitet total i anlegget

Som vist tidligere har stor fisk ofte har høyere startvanninnhold enn liten fisk. Samtidig er vannfjerningshastigheten lavere for stor fisk kontra liten fisk noe som fører til at stor fisk har høyere vanninnhold når den kommer inn på sluttørkingen. I sluttørkingstrinnet er vannfjerningshastigheten på stor fisk 20 % lavere enn for liten fisk.

Med utgangspunkt i figur 9, korrigere denne for redusert hastighet i døgn 2, vil man etter 48 timer ha et vanninnhold på ~50,5 % for liten fisk (1,5 kg) i forhold til ~52,5 % i stor fisk (3 kg). Dette betyr at for en vogn med 385 kg liten fisk (57 %), må 16,0 kg vann fjernes fra hver vogn i sluttørkingen med en vannfjerningshastighet på 1,0 g vann/kg fisk pr time. Til sammenligning må det for en vogn med 414 kg stor fisk fjernes 32,4 kg vann fra hver vogn med en vannfjerningshastighet på 0,8 g vann/kg fisk pr time.

Sluttørkingstiden for liten fisk vil da være 42 timer, i forhold til for stor fisk som vil være 98 timer. Man får da hhv 318,3 kg og 342,3 kg klippfisk pr vogn for liten kontra stor fisk.

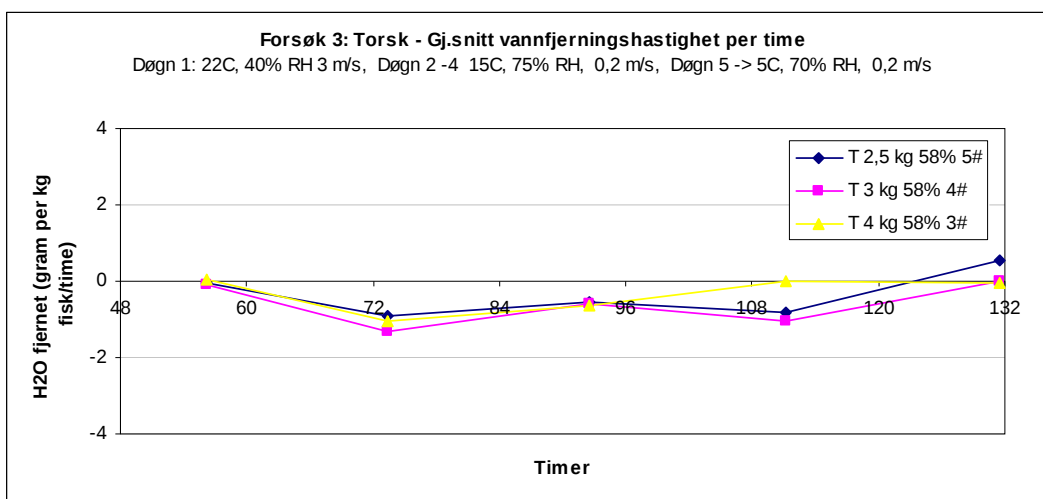
Ved å fylle tunnelen med liten fisk kontra stor fisk, tørke denne i 48 timer før sluttørking, vil man måtte ha 2,3 ganger så stort sluttørkingslager/hordetunnel for stor fisk kontra liten fisk. Total tørketid ville blitt ca 6 døgn for stor fisk og ca 4 døgn for liten fisk, men kapasiteten på totalanlegget ville blitt 10,2 tonn klippfisk pr døgn for stor fisk, mot 9,6 tonn pr døgn for liten fisk (48 % vanninnhold). Kapasitetstallene vil bli noe redusert når man tar høyde for en oppfukning av tørkeluften gjennom en reell industriell tunnel.

Merk: Ved en drift med 5-skift, vil man kunne utnytte optimal sykluser for hhv liten (13 timer) og stor fisk (23 timer), og man vil for liten fisk få 25 % høyere kapasitet på tunnelen i forhold til stor fisk (ref beregningseksempel 3)

5.5 MAKSIMUM FUKTIGHET I TØRKELUFTEN

For at fisken skal kunne tørke, må luftfuktigheten være lavere enn klippfiskens vannaktivitet ved det ønskede sluttvanninnholdet. Tidligere undersøkelse viste at likevektsfuktigheten for klippfisk ligger på 0,76 % som er det samme som likevektsfuktigheten for saltet som fisken er mettet med. Det er imidlertid observert at klippfisk lageret ved 80 % relativ fuktighet fortsatt mister litt vekt under lagringen. Dette bekreftes med nye analyser som viser at likevektsfuktigheten for klippfisk ligger rundt 80 % i stedet for 76 % som tidligere målt. Relativ fuktighet målt ut fra vogner i en reell tunnel viser også at luften har opp mot 80 % RH, men dette kan skyldes av nyinnsatt vår fisk har overflatevann og dermed en likevektsfuktighet høyere enn klippfisken eller.

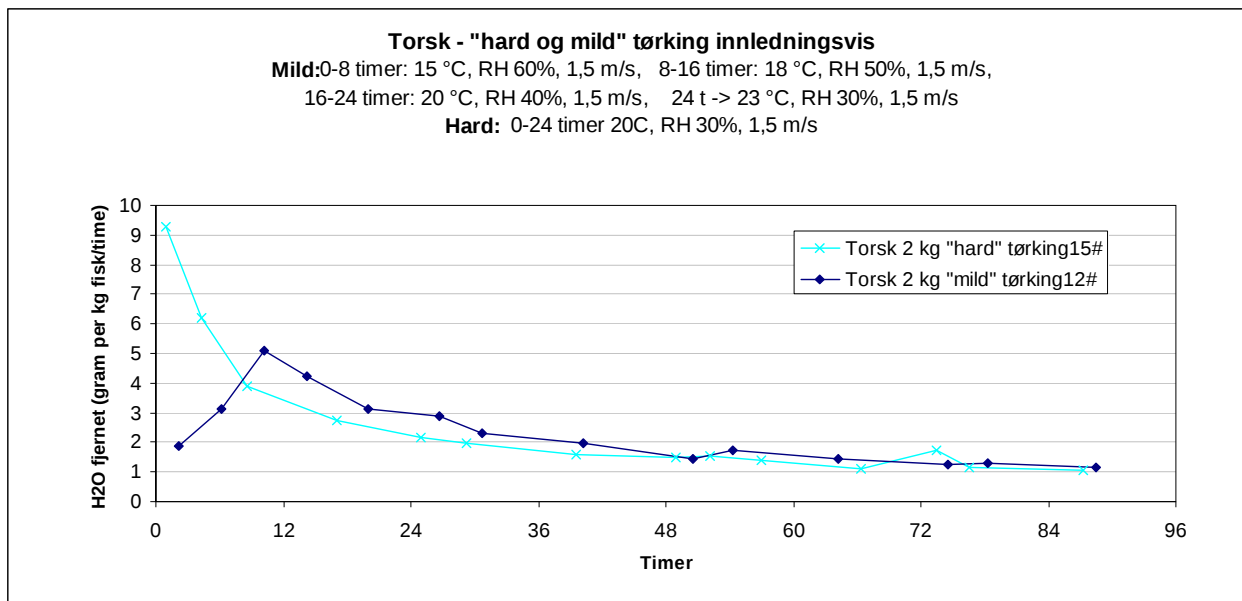
Figur 31 viser vannfjerningshastigheten på klippfisk tørket ved 75 % RH i perioden 48 til 120 timer, og ved 70 % RH etter 120 timer. Man ser at ved 75 % RH tar fisken til seg vann fra luften, og vekten øker, mens ved 70 % avgir fisken vann. Nøyaktigheten på RH-loggeren er +/- 2 %, så den relative fuktigheten under forsøket kunne vært 77 % RH. Likevel skulle man ut fra de nye analyser på at likevektsfuktigheten er 80 % forvente at selv ved 77 % RH i tørken ville fisken miste vekt. Likevektsfuktigheten på klippfisk ligger derfor i området 76 % til 80 %, og relativ fuktighet i tørkeluften må ikke overskride denne verdien da produktet ikke vil tørke.



Figur 32: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for torsk med luftfuktighet 75 og 70 % RH under sluttørking ved 22 °C og 0,2 m/s.

5.6 ”HARD” KONTRA ”MILD” TØRKING I STARTEN

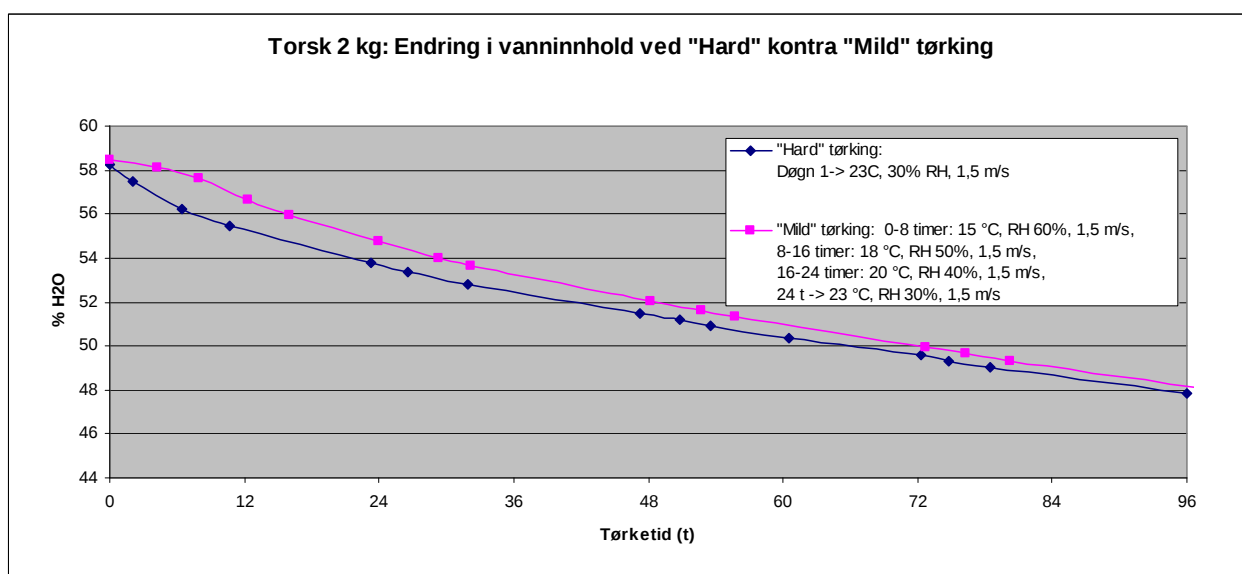
Det har vært en oppfatning blant produsenter at ”hard” (høy temp og lav relativ fuktighet) tørking i starten har ført til et ekstra hardt tørrsjikt som videre har redusert tørkehastigheten. 2 forsøk ble derfor lagt opp helt likt over 4 døgn, med 15 stk små torsk, men kjørt ved ulike innledende tørkeregimer for å simulere ”mild” og ”hard” innledende tørking for å studere om denne påvirker tørkingen videre i prosessen ved for eksempel at man får forskjellige tørrsjikt dannelse. Ved ”mild” tørking ble temperatur, RH og lufthastighet endret hver 8. time det første døgnet og med stabile tørkebetingelser de siste 3 døgnene. ”Hard” hadde stabile tørkebetingelser over hele tørkeperioden. Vannfjerningshastigheten er sammenlignet i figur 33 under.



Figur 33: Vannfjerningshastigheten (g H₂O fjernet pr kg fisk pr time) for torsk tørket under "mild" og "hard" innledende tørking.

Vannfjerningshastigheten de første 12 timene er betydelig mindre for mild tørking i forhold til hard tørking. Fra 12 timer vil naturlig nok den våteste fisken ha et større vanntap pr kg pr time frem til ca 48 timer. Fra figur 34 ser man konsekvensene av dette, at vanninnholdet i fisken synker raskere det første 12 timene i hardt tørket fisk, men at avstanden mellom vanninnhold (for lik tørketid) blir mindre etter hvert som tiden går. Men uansett vil mildt tørket fisk aldri ta igjen hardt tørket fisk (men ikke så stor forskjell).

Det må nevnes at pga at tørkeluften oppfuktes og kjøles gjennom tunnelen før tørkeluften er i kontakt med ny innsatt våt fisk, så vil den reelle opplevelsen av tørking på av produktet være svært nært en "mild" tørking selv ved høy temperatur og lav relativ fuktighet på tørkeluften inn på tunnelen.



Figur 34: Endring i % vanninnhold for 2,0 kg torsk under "mild" og "hard" innledende tørking.

6 OPTIMAL TØRKING AV KLIPPFISK

6.1 INNLEDENDE TØRKING I TUNNEL

Med bakgrunn i resultater av vannfjerningshastigheter i ulike perioder i tørkeprosessen, summert i tabell 4, vil det her bli presentert hvordan optimal tørking av klippfisk bør gjennomføres.

Det er viktig å være oppmerksom på at den presenterte optimale prosessen er tilpasset mest mulig hensiktsmessig og kontinuerlig drift over tid. Dvs. at syklus for inn og uttak av fisk er satt til 12 timer, mens det i teorien ville vært for eksempel 13 timers sykluser som ville vært optimalt. Selv om det her presenteres 12 timers sykluser, er det forventet at enkelte produsenter vil tømme og fylle innenfor en vanlig arbeidsdag, dvs. 8-16-8-16 timer sykluser. Dette vil i praksis ikke ha annen betydning enn at oppholdstiden i sluttørken kan bli noe forskjøvet.

6.1.1 Bakgrunn for valg av optimale tørkeparameter:

6.1.1.1 Temperatur:

Det er ønskelig å tørke med så høy temperatur som mulig, men ikke over 26 °C, da det vil bli brenningsproblemer over denne temperaturen. Temperaturen har betydning kun første 12 timer, og da i ganske begrenset grad (>15 °C). Mange produsenter ligger i området 20-24 °C for å være sikker på at man unngår brenning. Optimal temperatur bør være 22 °C, men i anlegg med god kontroll på temperaturen, kan man trygt øke denne til 24 °C.

6.1.1.2 Relativ fuktighet:

Fuktigheten i tørkeluften er den parameteren som har størst betydning på tørkehastigheten, og det må tilstrebes å få denne så lav som mulig. Mange produsenter kjører viftene på maksimal hastighet hele tiden, og med de oppsett varmepumpene har, vil vannfjerningen av fuktig luft ut fra tunnelen ikke være tilstrekkelig. Ved å blende av falskluft, har de fleste anlegg nok kapasitet på viftene til å redusere lufthastigheten slik at avvanningen av fuktig luft blir bedre, og man kan dermed levere tørrere luft inn til tunnelen. Dette har stor betydning økonomisk. Optimal fuktighet i tørkeluften bør derfor være 30 %.

6.1.1.3 Lufthastighet:

Lufthastigheten har stor betydning i starten, men allerede etter 12 timer er hastighetens betydning relativt beskjedne (0,8-3,0 m/s). I forhold til svært lav hastighet (0,2 m/s) har hastigheten betydning gjennom hele tørkeforløpet. Det er ønskelig med så høy hastighet som mulig første 12 timer, med høy hastighet krever større vifter med økt energiforbruk, samt at oppfuktingen av tørkeluften blir mindre. I teorien skulle det vært optimalt å ha smalere tunnel i den sonen der vått produkt settes inn i forhold til resten av tunnelen for at lufthastigheten skulle vært høyere i denne sonen. Dette er praktisk mulig, men det må vurderes om den daglige driften ville blitt påvirket uforholdsmessig mye.

Den optimale lufthastigheten (mellom brettene) bør derfor være moderat, i størrelsesorden 1,5-2 m/s, en hastighet som målt i flere anlegg, og som er godt tilpasset de installerte varmepumpene for å få en god oppfukting gjennom tunnelen.

6.1.2 Sammendrag av driftsparametrene påvirkning på vannfjerningshastighet.

Som vist i denne rapporten, påvirker driftsforholdene (temperatur, lufthastighet, relativ fuktighet og vekt) vannfjerningshastigheten i større eller mindre grad, i tillegg til at denne varierer gjennom tørkeforløpet. I tabellen under er driftsforholdenes betydning vist som et sammendrag.

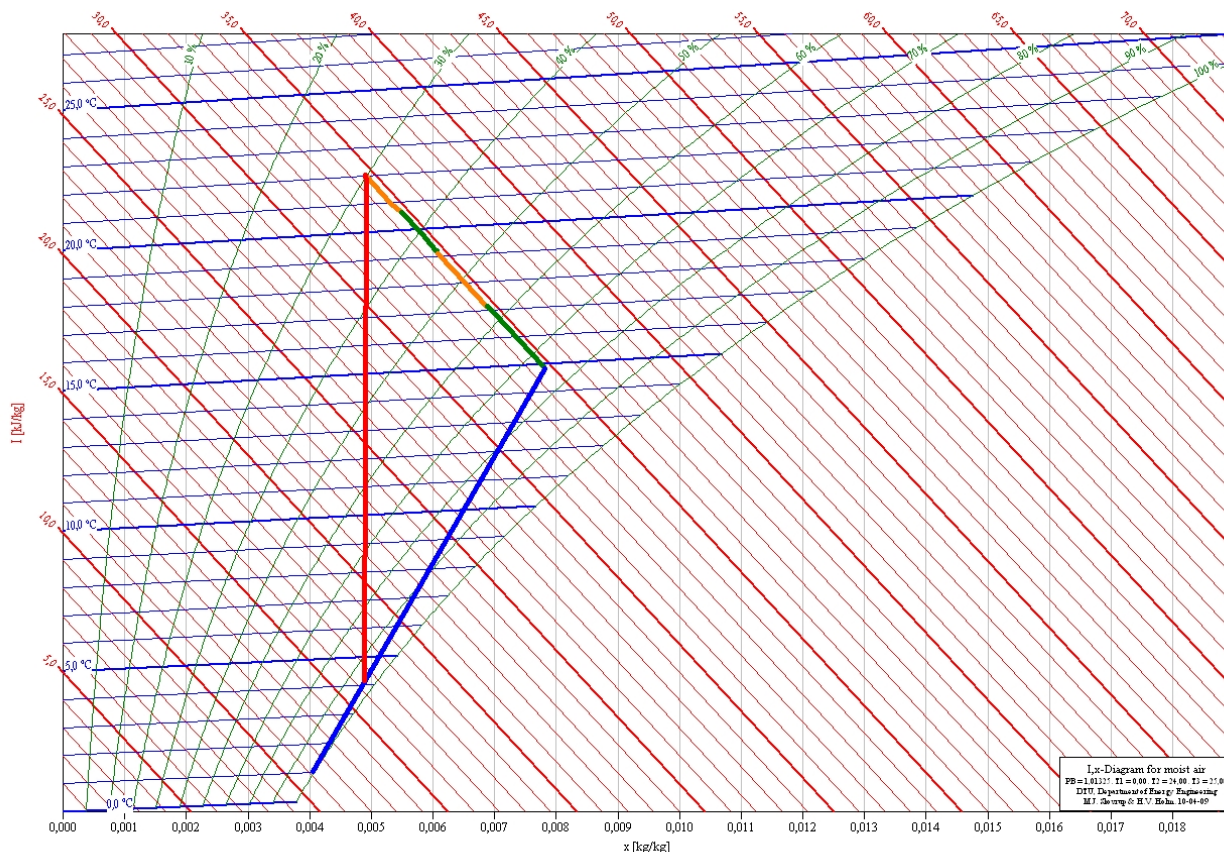
Tabell 4: Vannfjerningshastigheter under ulike driftsforhold i ulike perioder av tørkeprosessen:

Fisk	Vekt	Temp	RH	m/s	Variabel	Avvanningshastighet. [g vann pr kg fisk pr time] Tørkeperiode (timer fra start)				
						0-12	12-24	0-24	24-48	48 ->
T	3	22	40	0,8	Hast	4,26	2,63	3,69	1,99	
T	3	22	40	1,5	Hast	4,66	2,72	4,26		
T	3	22	40	3,0	Hast, vekt	5,63	2,79	5,07	1,94	
T	2,5	22	40	3,0	Vekt	5,74	2,73	5,14	2,01	
T	4	22	40	3,0	Vekt	5,15	2,57	4,61	1,92	
Sei	1,2	22	40	1,5	Temp	6,66	2,47	4,57		
Sei	1,4	15	40	1,5	Temp	5,67	2,26	3,97	1,89	
T	2,0*	22	30	1,5	RH	6,60	2,46	4,95	1,83	1,37
T	1,8*	22	40	1,5	RH	5,51	2,35	4,68		
T	1,5*	22	60	1,5	RH	3,17	2,73	3,07	2,36	
T	1,5*	22	75	1,5	RH	-1,33	-0,39	-1,14		
T	1,8	15	30	0,2	RH				1,33	0,90
T	1,8	15	60	0,2	Temp, RH				0,82	0,57
T	1,8	22	60	0,2	Temp				0,82	0,60
T	2,0	23	30	1,5	Hast				1,81	1,36
T	1,8	15	30	0,2	Hast				1,31	0,90
T	1,5	15	30	0,2	Vekt				1,42	
T	3,0	15	30	0,2	Vekt				1,19	
T	1,5	15	60	1,5	Temp, vekt	3,60				
T	2,5	15	60	1,5	Temp, vekt	3,35				
T	1,5	18	50	1,5	Temp, vekt		3,30			
T	2,5	18	50	1,5	Temp, vekt		2,94			
T	3,0	22	40	1,5	Vekt	5,32	2,75	4,29		
T	1,5	22	40	1,5	Vekt, Torsk/sei	5,59	3,11	4,60		
S	1,2	22	40	1,5	Torsk/sei	6,10	3,01	4,86		
T	1,7	22	40	1,5	RH	5,57	2,78	4,72		
T	1,7	22	60	1,5	RH, Hast	3,38	2,84	3,27	2,28	
T	1,7	22	40	0,2	Hast				0,82	0,60

* korrigert for areal/kg for å sammenligne fisk med ulik vekt (areal/kg korrigert tilsvarende 2,0 kg fisk)

6.1.3 Luftens tilstand gjennom innledende tørking i tunnel.

Den aller viktigste faktoren for optimal energieffektiv klippfisktørking, er å sikre at tørkeluften blir tilstrekkelig oppfuktet gjennom tunnelen. Det er ønskelig med så lav inngående fuktighet som mulig, 30 %, og så høy utgående fuktighet som mulig, 75 %. Over 75-80 % har tørkeluften ingen tørkepotensial, og fisken har ingen vannfjerning. Figur 35 viser hvordan luften fuktes opp og avkjøles på sin vei gjennom tunnelen (oransje og grønn linje) i 12 timers sykluser. Den blå linjen viser luftens tilstand når den kjøles gjennom fordamperen, og så videre (rød linje) når den varmes opp gjennom kondensatoren.



Figur 35: Luftens tilstand gjennom tørking av klippfisk i tunnel presentert i fuktig luft diagram. Luften fuktes opp og avkjøles på sin vei gjennom tunnelen (oransje og grønn linje), Den blå linjen viser luftens tilstand når den kjøles gjennom fordamperen, og videre når den varmes opp gjennom kondensatoren (rød linje).

Den inngående luften har temperatur på 22 °C, og 30 % RH. Ut fra tørken har temperaturen sunket til ca 15 °C, og relativ fuktighet har økt til 75 %.

6.1.4 Beregning av nødvendig luftmengde i tunnel:

For å sikre at tørkeluften blir maksimalt oppfuktet i tunnelen, må optimal luftmengde bestemmes.

Det er igjen gitt at tunnelen tar 60 vogner, og at 15 vogner med 385 kg torsk (1,5 kg, 57 % vanninnhold) fylles inn hver 12. time. Totalt 23.100 kg fisk (referert mot innsatt saltfisk) er inne i

tunnelen til enhver tid. Det er gitt at inngående tørkeluft i tunnelen skal ha 22 °C og 30 % RH, og oppfuktes til 75 % RH gjennom tunnelen. Total tid i tunnelen er 48 timer, dvs. 4 stk 12 timers sykluser. Vannfjerningshastigheten for hver syklus er bestemt ut fra resultatene vist i tabell 4. I tabell 5 er vannfjerningshastighetene grunnlaget for videre beregninger for å finne hvordan tørkeluften endrer seg gjennom tunnelen.

Tabell 5: Beregnede forhold (fra fuktig luft diagram) gjennom tunnel under tørking ved 22 °C og 30 % RH. Total tørketid er 48 timer, og forholdene er presentert i hver av de 4 stk 12 timers syklusene (inn/ut med produkt)

	Utluft <---	Differansetall gjennom tunnel				Innluft <---
		0-12 timer	12-24 t	24-36 t	36-48 t	
Vannfjerningshast, g vann pr kg fisk pr time		3,6	3,3	2,0	1,8	
Driftsforhold		16C/60%	19C/50%	21C/40%	22C/30%	
Abs. fuktighet i luft, kg vann/kg luft	0,0078248	0,0009706	0,0008897	0,000539	0,000485	0,00494
Energiinnhold i luft, kJ/kg	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7
Lufttemp, C	14,9	-2,2	-2,1	-1,4	-1,4	22,0
% RH i luften	74,3	17,3	12,8	7,6	6,6	30,0
Kg vann fjernet pr time		20,8	19,1	11,6	10,4	
Kg vann fjernet i 12 t perioden		249	229	139	125	
Fiskens vanninnhold	57,0 %	55,1 %	53,1 %	51,9 %	50,7 %	

Ved de gitte driftsforholdene, viser beregningene at fisken vil ha et vanninnhold på ca 51 % etter innledende tørking i tunnel. Vannfjerningen vil være 61,8 kg vann pr time, eller 1,02 l/min, som er 16 % høyere enn de reelle målingene (0,88 l/min) på referanseanlegget. Dette stemmer godt, da det optimalt tørking bør være med luft som har 30 % RH i forhold til ca 40-45 % RH som ble registrert i referanseanlegget.

For at denne mengden vann skal kunne bli tatt opp av tørkeluften, viser beregningen at 21.420 kg luft pr time må til. Med en spesifikk tetthet på 1,19 kg/m³ luft, gir dette en **nødvendig luftmengde på 18.000 m³/time**. Dette stemmer også godt med referanseanlegget som viste at 16.000 m³/time gikk gjennom vognene og ble fuktet opp fra 40 til 80 % RH. (Referanseanlegget hadde i tillegg 18.000 m³/time som gikk som falskluft gjennom tunnelen). Dette viser at viften i referanseanlegget er for stor, og man kunne redusert energiforbruket ved å installere en vifte med lavere kapasitet.

6.1.5 Beregning av kuldebehov for avfukting av tørkeluften

Energien for å fordampe nok kuldemedium for å kjøle tørkeluften beregnes ut fra formelen:

$$Q_{\text{ford.}} = (h_A \text{ (for fordamper)} - h_B \text{ (etter fordamper)}) \cdot M_{\text{Luft}} = \Delta h_{A-B} \cdot M_{\text{Luft}} \quad [\text{kW}]$$

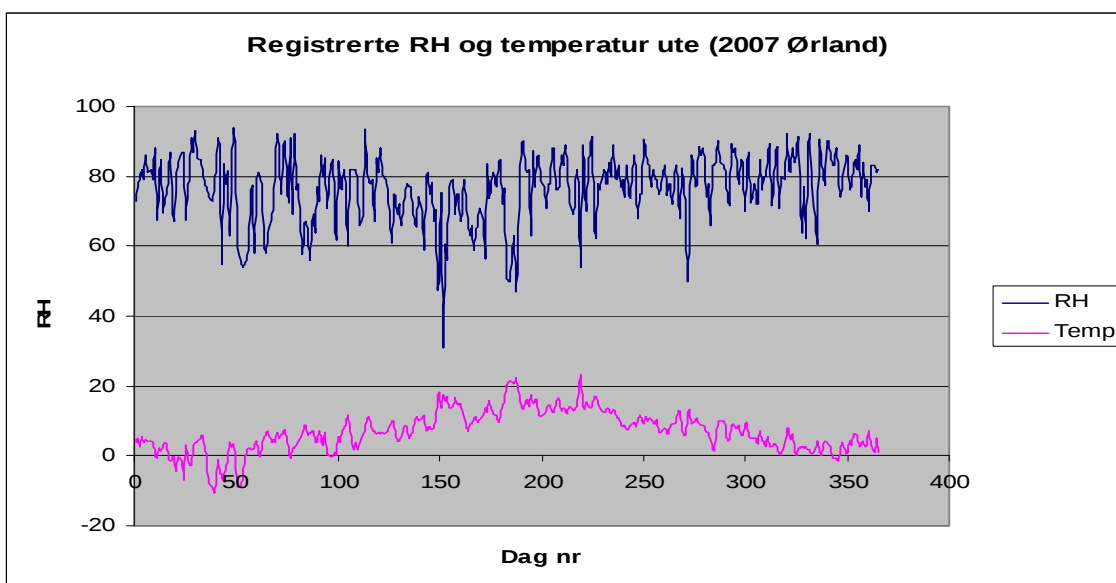
$$Q_{\text{ford.}} = (34,68 - 16,33) \text{ kJ/kg luft} \cdot 21.420 \text{ kg luft/t} = 109,2 \text{ kW} \quad [\text{kW}]$$

Kompressoren på 33,5 kW i referanseanlegget er designet til å kunne levere 130-140 kW, og det vil i praksis kunne være mulig å installere en litt mindre kompressor med lavere energiforbruk.

6.2 SLUTTØRKing I EGET LAGER

6.2.1 Tørkepotensial for sluttørking gjennom året.

Hele konseptet med sluttørking i eget lager baserer seg på å utnytte overskuddsvarmen fra varmepumpen til å varme opp uteluften som så føres inn i lageret. Potensialet for å kunne tørke fisken tørr ved bruk av uteluften, er selvfølgelig helt avhengig av temperatur og relativ fuktighet i uteluften. Uteluften har varierende temperatur og relativ fuktighet gjennom året, noe som er presentert i figur 36 under.



Figur 36: Temperatur og relativ fuktighet i uteluft i kystnært område gjennom ett år, her Ørland i Sør-Trøndelag 2007.

Ved å ta gjennomsnittsverdier måned for måned, finner man at temperaturen vil variere fra -2 °C i februar, til +16 °C i juli. Relativ fuktighet er i snitt ganske jevn fra 72 til 82 %

Med bakgrunn i figur 36 viser tabell 6 gjennomsnittlig temperatur og fuktighet i uteluften pr måned over ett år. Overskuddsvarmen fra varmepumpen tilføres uteluften gjennom hjelpekondensator som ved hjelp av vifte suger uteluften gjennom denne og inn i lageret (eller eventuelt en hordetørke). Dess mer varme man tilfører uteluften, dess tørrere vil tørkeluften bli. Målet er å holde en konstant høy temperatur på luften inn på sluttørkingen på 23 °C. For å holde et fornuftig tørkepotensial under sluttørking, er det satt at luft ut av sluttørkingen maks skal ha 60 % RH.

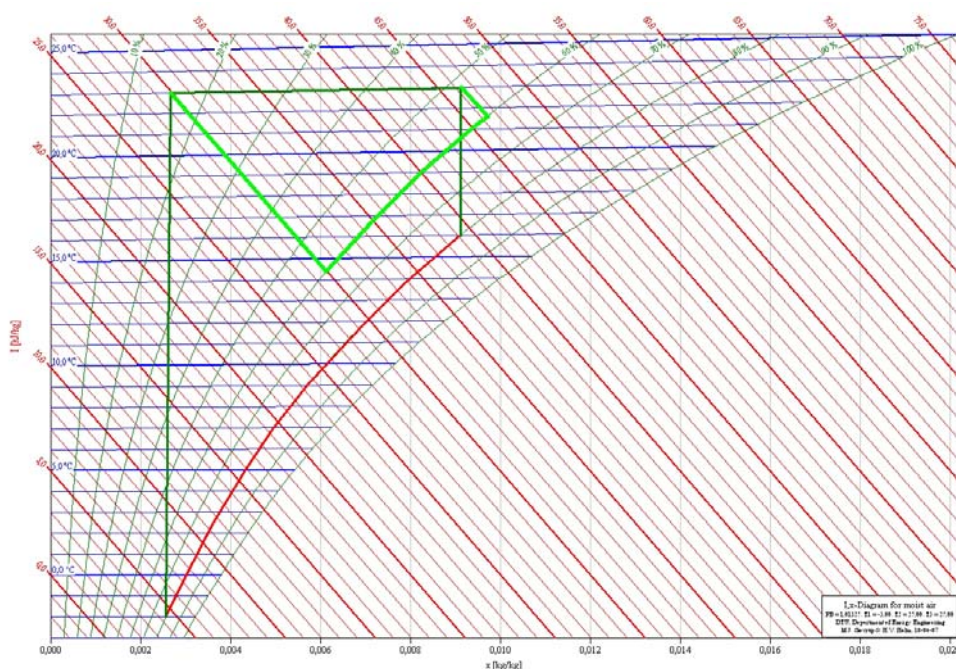
Referanseanlegget har en tilgjengelig overskuddsvarme fra varmepumpen på ca 40 kW, noe som gir betydelig muligheter for øke temperaturen på uteluften før denne blir brukt til sluttørking.

Tabell 6: Med bakgrunn i reelle målinger av temperatur og relativ fuktighet pr måned over ett år ved Ørland i Sør-Trøndelag, er nødvendig tørketid for sluttørkingen i eget lager beregnet.

Sluttørking av klippfisk fra 51 til 48 % vanninnhold

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
RH uteluft	78	76	76	74	70	72	80	80	78	80	82	80
Temp uteluft [C]	1	-2	5	7	8	14	16	14	10	8	5	3
h uteluft [kJ/kg]	8,85	4,07	15,34	18,52	19,75	32,25	39,11	34,2	25,13	21,44	16,09	12,39
x uteluft [kg vann/kg luft]	0,00315	0,00243	0,0041	0,00457	0,00466	0,00718	0,00909	0,00796	0,00596	0,00532	0,00442	0,00374
h ut kondensator [kJ/kg]	31,23	29,4	33,6	34,7	35,01	41,31	46,2	43,34	38,18	36,62	34,4	32,63
Temp ut kondensator	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH ut kondensator	18,2	14,3	23,6	26,4	26,8	41,3	52,1	45,7	34,3	30,7	25,5	21,6
Temp ut sluttørking	15	14,1	16,1	16,6	16,7	19,6	21,6	20,4	18,2	17,5	16,5	15,7
RH ut sluttørking	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
x ut sluttørking	0,0064	0,00603	0,00687	0,00711	0,00713	0,00852	0,00967	0,00899	0,00786	0,00749	0,00702	0,00666
Snitt RH gjennom sluttørkingen	39,1	37,2	41,8	43,2	43,4	50,7	56,1	52,9	47,2	45,4	42,8	40,8
Antall vogner inn pr døgn	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mengde fisk pr vogn	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385
Mengde vann fjernet pr vogn under sluttørking	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55

Ut fra tabell 6 ser man at ved å øke temperaturen i uteluften til 23 °C før den blåses inn i sluttørkingen, vil relativ fuktighet i tørkeluften inn på produktet variere fra 15 % RH i februar, til 56 % i juli. Den gjennomsnittlige relative fuktigheten gjennom sluttørken (tørkepotensialet) vil ligge mellom 37 til 56 % RH. Temperaturen ut fra sluttørkingen vil ligge mellom 14 og 21,6 °C avhengig av årstiden. Luftens tilstand fra uteluft, via oppvarming i hjelpekondensator til ut fra sluttørkingen er vist i fuktig luft diagram i figur 37.



Figur 37: Oppvarming av uteluft for sluttørking i fuktig luft diagram. Uteluften vil i gjennom ett år vil tilnærmet ligge langs den røde linjen i diagrammet. Oppvarming av uteluften gjennom hjelpekondensatoren vil føre til at tørkeluften vil nå opp til den horisontale mørkegrønne linjen. Den lysegrønne linjen viser tilstanden til tørkeluften etter oppfukning under sluttørking.

6.2.2 Nødvendig energitilførsel i sluttørken

Med bakgrunn i beregnet tørkepotensial pr måned gjennom året, viser tabell 7 under nødvendig tilført energi til oppvarming av uteluft til sluttørking basert på vannfjerningshastighet som varierer med tørkepotensialet (gjennomsnittlig RH gjennom sluttørkingen). Beregningene er basert på at 15 vogner med 385 kg fisk med vanninnhold 57 % tørkes i 48 timer i tunnel før fisken med vanninnhold på 51 % sluttørkes til 48 % vanninnhold i sluttørken.

Tabell 7: Med bakgrunn i reelle målinger av temperatur og relativ fuktighet pr måned over ett år ved Ørland i Sør-Trøndelag, er nødvendig tørketid for sluttørkingen i eget lager beregnet.

Sluttørking i lager; 0,2 m/s	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
Vannfjerningshastighet g vann/ kg fisk pr time	0,91	0,94	0,87	0,85	0,85	0,74	0,66	0,71	0,79	0,82	0,86	0,89
Antall timer i sluttørking	33	32	34	35	35	41	46	42	38	37	35	34
Antall døgn i sluttørking	1,4	1,3	1,4	1,5	1,5	1,7	1,9	1,8	1,6	1,5	1,5	1,4
Antall kg fisk på sluttlager	15.805	15.314	16.538	16.945	17.005	19.504	21.900	20.414	18.212	17.612	16.812	16.258
Antall vogner på sluttlager	41	40	43	44	44	51	57	53	47	46	44	42
Vannfjerning kg pr time	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
Luft [kg/t] gjennom kondens	4.442	4.010	5.212	5.684	5.845	10.774	24.892	14.017	7.599	6.653	5.553	4.944
Luft [kg/s] gjennom kondens	1,23	1,11	1,45	1,58	1,62	2,99	6,91	3,89	2,11	1,85	1,54	1,37
Luft [m3/t] gjennom kondens	3.733	3.370	4.380	4.777	4.912	9.054	20.918	11.779	6.385	5.591	4.666	4.155
Nødvendig oppvarming av uteluft [kW]	27,6	28,2	26,4	25,5	24,8	27,1	49,0	35,6	27,5	28,1	28,2	27,8
I hordetørke; 1,5 m/s												
Vannfjerningshastighet g vann/ kg fisk pr time	1,15	1,17	1,12	1,11	1,10	1,03	0,98	1,01	1,07	1,09	1,11	1,13
Antall timer i sluttørking	26	26	27	27	27	29	31	30	28	28	27	27
Antall døgn i sluttørking	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Antall kg fisk på sluttlager	12.589	12.383	12.886	13.046	13.069	13.968	14.721	14.265	13.519	13.299	12.994	12.775
Antall vogner på sluttlager	33	32	33	34	34	36	38	37	35	35	34	33
Mengde vann fjernet pr time	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4

Ut fra tabellen over, ser man at nødvendig tilført energi til hjelpekondensatoren for å varme uteluften tilstrekkelig til å holde 23 °C vil variere fra 25 til 28 kW i 10 av månedene. I juli vil behovet være 49 kW og i august 35 kW. Tilgjeng overskuddsvarme fra varmepumpen er som nevnt 40 kW, som er tilstrekkelig hele året foruten juli. En løsning for juli vil være å ha produktet 3 døgn i tunnel, men da med redusert totalkapasitet. En annen løsning vil være å ha produktet lengre på sluttørking. Denne ekstra oppholdstiden i sluttørkingen vil være avhengig av hvor høy temperaturen og fuktigheten er i uteluften. I noen ekstreme tilfeller (noen få dager pr sommer) vil det være vanskelig å sluttørke produktet nok, og eneste løsning vil være å gjennomføre tørkingen som den gjøres i dag, fullstendig tørking i tunnelen.

I tabell 7 ser man samtidig at nødvendig luftmengde for sluttørkingen ligger mellom 3.400 til 11.800 m³/ time. Dette krever at kapasiteten på viften på hjelpekondensatoren sannsynligvis må økes i forhold til tradisjonelle vifter.

6.2.3 Oppholdstid for sluttørking

Ut fra tabell 7 ser man at sluttørking av 1,5 kg fisk i eget lager vil kreve en oppholdstid på 1,3 til 1,9 døgn for å senke vanninnholdet fra 51 % til 48 %. Dette krever at det er plass til opptil 60 vogner i sluttørken. Tilsvarende ser man at tiden sluttørkingen vil ta i en tunnel med 1,5 m/s vil være 1,1 til 1,3 døgn.

6.3 ENERGIFORBRUK VED OPTIMAL TØRKING AV KLIPPFISK

Ved å tørke optimalt under innledende tunnel, men høy temperatur ($>22\text{ }^{\circ}\text{C}$, lav relativ fuktighet $\sim 30\%$), moderat lufthastighet ($\sim 1,5\text{ m/s}$) og maksimal oppfukning av tørkeluften ($18.000\text{ m}^3/\text{t}$) vil man ut fra de gitte forholdene (30 vogner med 385 kg saltfisk (57 % vanninnhold) pr døgn) kunne produsere 9,6 tonn klippfisk (48 % vanninnhold) pr døgn.

Referanseanlegget ville ved optimal fylling produsere 5,2 tonn klippfisk pr døgn med et totalt energiforbruk på 184 kW pr tonn klippfisk.

Ved å sluttørke i eget lager/hordetørke, vil man senke energiforbruket fra 184 kWh til 101 kWh pr tonn klippfisk, og samtidig øke kapasiteten fra 5,2 til 9,6 tonn pr døgn. I forhold til referanseanlegget kan man øke produksjonen med 85 %, samtidig som man reduserer energiforbruk pr tonn produsert klippfisk med 45 %.

Energiforbruket på 101 kWh pr tonn klippfisk er basert på varmepumpen installert i referanseanlegget. Tidligere beregninger viser at både kompressoren og viften er litt overdimensjonert, og det er derfor potensial for å senke energien ytterligere. Samtidig må man ikke glemme at installert vifte på hjelpekondensatoren må kunne levere nok luft, og man må kunne forvente litt økt energiforbruk her.

7 KONKLUSJON

Konseptet rundt sluttørking av klippfisk i eget lager (eller hordetørke) baserer seg på å utnytte overskuddsvarmen fra varmepumpen i tunnelen til å varme opp uteluft til sluttørking i stedet for å dumpe den som i dag. Fisken tas derfor ut av tunnelen før den er helt tørr, og sluttørkes i egnede lokaler med bruk av den oppvarmede uteluften.

Med bakgrunn i 13 tørkeforsøk av sei og torsk med ulik størrelse i lab-skala brett-tørke, samt resultater fra tidligere prosjekter, ble optimal tørking av klippfisk bestemt. Innledningsvis ble betydningen av fiskens størrelse på vannfjerningshastighet bestemt. Samtidig ble tørkeluftens hastighet, relative fuktighet og temperatur under både innledende tørking i tunnel og under sluttørking i eget lager bestemt. I tillegg ble forskjell i tørkehastighet på sei og torsk funnet, samt hvilke konsekvenser ”hard” (varm og tørr luft) og ”mild” (lavere temperatur og høyere fuktighet) innledende tørking har på vannfjerningshastigheten videre.

For best å dokumentere konsekvenser av ulike driftsforhold under tørkeprosessen, ble det valgt å sammenligne med et referanseanlegg som er en kjent og godt dokumentert langblåst tunnel med plass til 3 x 20 vogner (totalt 60 vogner). Det er plass til 385 kg små fisk, og 413 kg stor fisk på hver vogn ved hhv 20 og 16 brett. Varmepumpens kompressor har et energiforbruk målt til 33,5 kW, og er designet for å levere 130-140 kW kuldeytelse. Viften leverer 35.000 m³/t, og har målt energiforbruk på 6 kW. Overskuddsvarmen fra varmepumpen dumpes ved hjelp av en hjelpekondensator med vifte på 0,6 kW. **Total overskuddsvarme er 40 kW som kan brukes til oppvarming av uteluft til sluttørking.** Referanseanlegget kan produsere 5,2 tonn klippfisk pr døgn med et energiforbruk på 184 kWh pr tonn produsert.

Fiskens størrelse påvirker vannfjerningshastigheten.

For torsk er det en tilnærmet lineær sammenheng mellom vekten på fisken og overflatearealet. En fisk på 1,5 kg har et areal på omkring 420 cm² pr kg i forhold til en fisk på 4 kg som har et areal på omkring 270 cm² pr kg. En 4 kg torsk har et areal pr kg som er 65 % av arealet til en 1,5 kg torsk. Vannfjerningshastigheten er 90 % i forhold til 1,5 kg fisk, som betyr at stor fisk har høyere vannfjerning pr cm² i forhold til små fisk

Stor fisk er tykkere enn liten fisk, og for å få samme mengde luft gjennom tunnelen må antall brett pr vogn reduseres i forhold til liten fisk. Pga høyere vekt pr areal kan en vogn fylles med 413 kg stor fisk mot 385 kg liten fisk. Selv med ulik mengde fisk pr vogn er antall kg vann fjernet pr vogn første døgn i tunnel den samme for stor kontra liten fisk når startvanninnholdet er det samme. Det er større mengde vann som skal fjernes på en vogn med stor fisk kontra liten fisk, og vogner med stor fisk må dermed stå lengre i tunnelen, eventuelt tørkes lengre i sluttørkingen.

Samtidig ser man at startvanninnholdet etter samme saltmodningsprosess kan variere fra 57 % for 1,5 kg torsk til 59,5 % for 4 kg torsk. For en gitt vogn, tilsvarer dette at 27 kg mer vann pr vogn må fjernes i tunnelen ved stor fisk kontra liten fisk som betyr at en vogn med 4 kg torsk må stå ca 16 timer lengre i tunnelen før den har nådd samme vanninnhold som den 1,5 kg fisken har før den

begynner å tørke. Det kan se ut som den store variasjon av vannfjerningshastigheten mellom stor og liten fisk under tørking i tunnel reduseres når tørkingen gjennomføres ved liten lufthastighet.

Tørkehastighet på torsk kontra sei

Vannfjerningshastigheten for sei er 5 % høyere enn for torsk det første døgnet i tunnel under de gitte forholdene ved 22 °C, 40 % RH og 1,5 m/s. I sluttørkingsperioden er vannfjerningshastigheten mellom torsk og sei tilnærmet lik.

”Hard” kontra ”mild” innledende tørking

Det har vært en oppfatning blant enkelte produsenter at det ved innledende tørking med høy temperatur og lav relativ fuktighet har blitt dannet et tørrsjikt på overflaten som har redusert tørkehastigheten videre i prosessen. Resultatene fra forsøk viser at vannfjerningshastigheten de første 12 timene er betydelig lavere for mild tørking i forhold til hard tørking, men at dette fra 12 timer i tunnelen vil snu pga at den våteste fisken (mildt tørket) har et større vanntap pr kg pr time frem til ca 48 timer. Vanninnholdet i fisken som er tørket hardt synker raskest det første 12 timene, men avstanden mellom % vanninnhold blir mindre etter hvert som tiden går. I en reell industriell tørkeprosess vil tørkeluften oppfuktes og kjøles gjennom tunnelen før tørkeluften er i kontakt med ny innsatt våt fisk, så vil den reelle opplevelsen av tørking på av den nyinnsatte fisken være svært nært en ”mild” tørking selv ved høy temperatur og lav relativ fuktighet på tørkeluften inn på tunnelen.

Luftens innvirkning under innledende tørking i tunnel:

Lufthastigheten har stor betydning på vannfjerningshastighet under innledende tørking i tunnel. Ved å øke lufthastigheten fra 0,8 m/s til 3,0 m/s første 12 timer vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 34 %. I denne perioden er det også stor forskjell på 1,5 og 3,0 m/s. I snitt over 48 timer vil en reduksjon av hastigheten fra 3 til 0,8 m/s redusere vannfjerningshastigheten med 12 %. Det er viktig å merke seg at en tunnel må være lengre (flere vogner i luftretningen) når man har høy lufthastighet for å kunne få en optimal oppfukting av tørkeluften gjennom tunnelen.

Lufthastigheten har stor betydning i starten, men allerede etter 12 timer er hastighetens betydning relativt beskjedent (0,8-3,0 m/s). I forhold til svært lav hastighet (0,2 m/s) har hastigheten betydning gjennom hele tørkeforløpet. Det er ønskelig med så høy hastighet som mulig første 12 timer, men med høy hastighet kreves større vifter med økt energiforbruk, samt at oppfuktingen av tørkeluften blir mindre. I teorien skulle det vært optimalt å ha smalere tunnel i den sonen der vått produkt settes inn i forhold til resten av tunnelen for at lufthastigheten skulle vært høyere i denne sonen. Dette er praktisk mulig, men det må vurderes om den daglige driften ville blitt påvirket uforholdsmessig mye.

Temperaturen i tørkeluften har vesentlig betydning kun første 24 timer. Ved å øke lufttemperaturen fra 15 til 22 °C vil man øke vannfjerningshastigheten med ca 15 % første døgn. Under drift vil tørkeluften avkjøles gjennom tunnelen, og nyinnsatt fisk vil bli tørket av luft som har en temperatur 4-5 °C lavere enn inngående luft.

Det er ønskelig å tørke med så høy temperatur som mulig, men ikke over 26 °C, da det vil bli brenningsproblemer over denne temperaturen. Temperaturen har betydning kun første 12 timer, og da i ganske begrenset grad (>15 °C). Mange produsenter ligger i området 20-24 °C for å være sikker på at man unngår brenning. Optimal temperatur bør være over 22 °C, og i anlegg med god kontroll på temperaturen, kan man trygt øke denne til 24 °C

Relativ fuktighet i tørkeluften er helt avgjørende for tørkehastigheten. Ved å tørke ved 30 % relativ fuktighet øker vannfjerningshastigheten det første døgnet med rundt 60 % i forhold til å tørke ved 60 % relativ fuktighet. I praksis vil derimot tørkeluften i en tunnel være oppfuktet til omkring 60 % RH før den kommer i kontakt med den nyinnsatte fisken. Hvis det hadde vært mulig å tørke fisken første døgn i tørrere luft, for eksempel ved å ha to ulike tunneler med felles luftsystm, ville kapasiteten kunne øke med over 50 %. Dette ville krevd et helt nytt tørkekonsept, med separat tørking av nyinnsatt og våt fisk, samt at det ville ført til utfordringer med å utnytte varmepumpens potensial pga at luften ikke hadde blitt optimalt oppfuktet.

Fuktigheten i tørkeluften er den parameteren som har størst betydning på tørkehastigheten, og det må tilstrebes å få denne så lav som mulig. Mange produsenter kjører viftene på maksimal hastighet hele tiden, og med de oppsett varmepumpene har, vil vannfjerningen av fuktig luft ut fra tunnelen ikke være tilstrekkelig. Ved å blende av falskluft, vil luftmengden i de fleste anlegg kunne redusere slik at avvanningen av fuktig luft i fordamperen blir bedre, og man kan dermed levere tørrere luft inn til tunnelen. Dette har stor betydning økonomisk. Optimal fuktighet i tørkeluften bør derfor være 30 %.

Oppholdstid i tunnel:

Nyinnsatt fisk vil tørkes med luft som har omkring 60 % RH, og vannfjerningshastighetene tilsier at man kan forvente at lufthastigheten er viktig også i perioden 24 til 48 timer. Det er derfor nødvendig å ha fisken inne i tunnelen i 2 døgn før sluttørking i eget lager.

Luftens innvirkning under sluttørking i eget lager:

Lufthastigheten spiller en rolle under sluttørking når man sammenligner svært lav hastighet (0,2 m/s) som i et lager, med hastigheter (1,5 m/s) som kan være inne i en tunnel. Vannfjerningshastigheten i siste del av tørkeprosessen i tunnel med 1,5 m/s vil være ca 50 % høyere enn tilsvarende sluttørking i eget lager med lufthastighet på 0,2 m/s

Lufttemperaturen har ingen innvirkning på vannfjerningshastigheten under sluttørking så lenge denne er over 15 °C. Torsk sluttørket i simulert lager ved 15 og 22 °C og ellers like forhold viste at vannfjerningshastighetene gjennom sluttørkingsperioden er omtrent helt like for de ulike temperaturene. Dette betyr at temperaturen i eget lager for sluttørking ikke er avgjørende for tørketiden så lenge temperaturen ligger i området 15 til 22 °C

Relativ fuktighet i tørkeluften har stor betydning under sluttørkingen.

Forsøk med torsk sluttørket i simulert lager ved 30 og 60 % relativ fuktighet, og ellers like forhold, viste at vannfjerningshastighetene gjennom sluttørkingsperioden er ca 50 % høyere under tørking ved 30 % RH kontra 60 % RH. Det er forventet at luftfuktigheten i et sluttlager vil heller

ligge i størrelsesorden 40-50 % enn 30 %, og at vannfjerningshastigheten vil ligge rundt 0,7-0,9 g vann fjernet pr kg fisk pr time. Det må tilstrebes å få så lav relativ fuktighet som mulig ved å varme uteluften maksimalt før denne går til sluttørkingen.

Likevektsfuktigheten på klippfisk er tidligere vist å ligge på 76 %. Nyere undersøkelser viser at denne kan ligge opp mot 80 %, og relativ fuktighet i tørkeluften må ikke overskride denne verdien da man ikke vil få vannfjerning fra fisken.

Fiskens størrelse påvirker vannfjerningshastigheten også under sluttørking. Forsøk viser at vannfjerningshastigheten er 20 % lavere for en 4 kg fisk i forhold til en 1,5 kg fisk etter korrigering for ulikt areal pr kg.

Optimal tørking av klippfisk

Den aller viktigste faktoren for optimal energieffektiv klippfisktørking, er å sikre at tørkeluften blir tilstrekkelig oppfuktet gjennom tunnelen. Det er ønskelig med så lav inngående fuktighet som mulig, 30 %, og så høy utgående fuktighet som mulig, 75 %. For at denne mengden vann skal kunne bli tatt opp av tørkeluften fra fisken som vist i referanseanlegget, viser beregninger at nødvendig luftmengde er 18.000 m³/time.

Vannfjerningen vil være 61,8 kg vann pr time, eller 1,02 l/min, som er 16 % høyere enn de reelle målingene (0,88 l/min) på referanseanlegget. Nødvendig fordampningsenergi i kuldemedium til å avfukte tørkeluften er beregnet til 109 kW.

Tørkepotensialet under sluttørkingen vil være avhengig av uteluftens temperatur og fuktighet. Uteluften vil bli oppvarmet til 23 °C før den blåses inn i sluttørkingen. Med utgangspunkt i uteluftens tilstand gjennom ett år ved kysten i Trøndelag, vil relativ fuktighet i tørkeluften inn på sluttørkingen ligge mellom 15 % RH i februar, til 55 % i juli. Den gjennomsnittlige relative fuktigheten gjennom sluttørken (tørkepotensialet) vil ligge mellom 37 til 56 % RH. Den nødvendige energi til hjelpekondensatoren for å varme uteluften til 23 °C vil variere fra 25 til 28 kW i 10 av månedene. I juli vil behovet være 49 kW og i august 35 kW. Tilgjeng overskuddsvarme fra varmepumpen er som nevnt 40 kW, som er tilstrekkelig hele året foruten juli. En løsning for juli vil være å ha produktet 3 døgn i tunnel, men da med redusert totalkapasitet. En annen løsning vil være å ha produktet lengre på sluttørking. Denne ekstra oppholdstiden i sluttørkingen vil være avhengig av hvor høy temperaturen og fuktigheten er i uteluften. I noen ekstreme tilfeller (noen få dager pr sommer) vil det være vanskelig å sluttørke produktet nok, og eneste løsning vil være å gjennomføre tørkingen som den gjøres i dag, fullstendig tørking i tunnelen.

Nødvendig luftmengde for sluttørkingen ligger mellom 3.400 til 11.800 m³/ time. Dette krever at kapasiteten på viften på hjelpekondensatoren sannsynligvis må økes i forhold til tradisjonelle vifter på hjelpekondensatoren

Ved sluttørking av 1,5 kg fisk i eget lager vil det kreves en oppholdstid på 1,3 til 1,9 døgn for å senke vanninnholdet fra 51 % til 48 %. Dette krever at det er plass til opptil 60 vogner i sluttørken. Tilsvarende ser man at tiden sluttørkingen vil ta i en tunnel med 1,5 m/s vil være 1,1 til 1,3 døgn.

Energiforbruk i optimal tørking av klippfisk

Ved å tørke optimalt under innledende tunnel, men høy temperatur ($>22\text{ }^{\circ}\text{C}$, lav relativ fuktighet $\sim 30\%$), moderat lufthastighet ($\sim 1,5\text{ m/s}$) og maksimal oppfukning av tørkeluften ($18.000\text{ m}^3/\text{t}$) vil man ut fra de gitte forholdene (30 vogner med 385 kg saltfisk (57 % vanninnhold) pr døgn) kunne produsere 9,6 tonn klippfisk (48 % vanninnhold) pr døgn.

Referanseanlegget ville ved optimal fylling produsere 5,2 tonn klippfisk pr døgn med et totalt energiforbruk på 184 kW pr tonn klippfisk.

Ved å sluttørke i eget lager/hordetørke, vil man senke energiforbruket fra 184 kWh til 101 kWh pr tonn klippfisk, og samtidig øke kapasiteten fra 5,2 til 9,6 tonn pr døgn. I forhold til referanseanlegget kan man øke produksjonen med 85 %, samtidig som man reduserer energiforbruk pr tonn produsert klippfisk med 45 %.

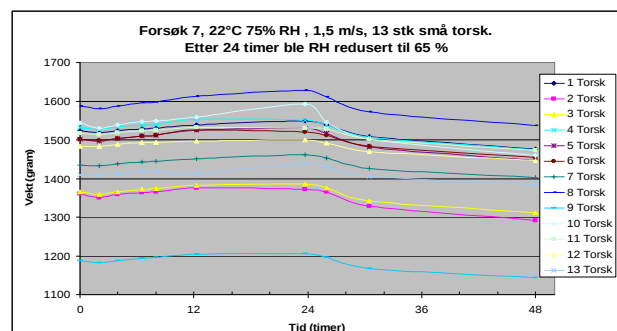
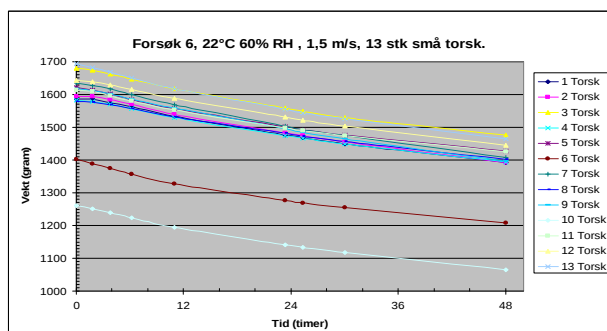
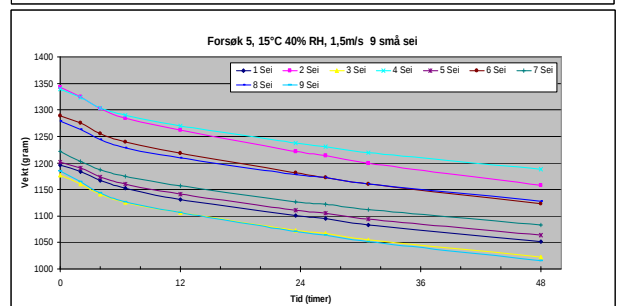
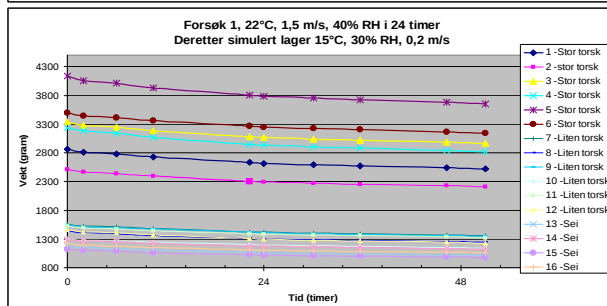
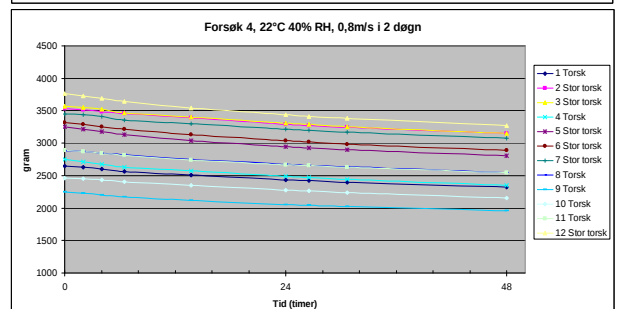
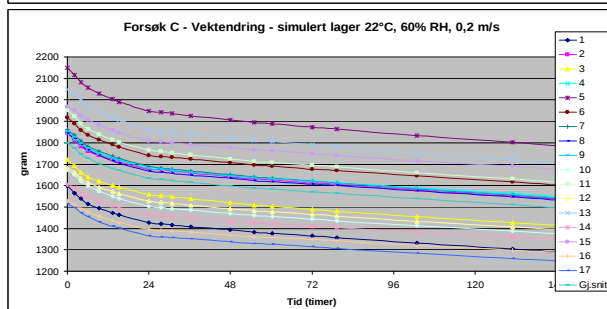
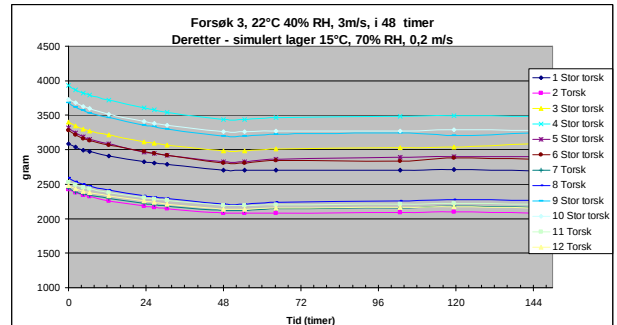
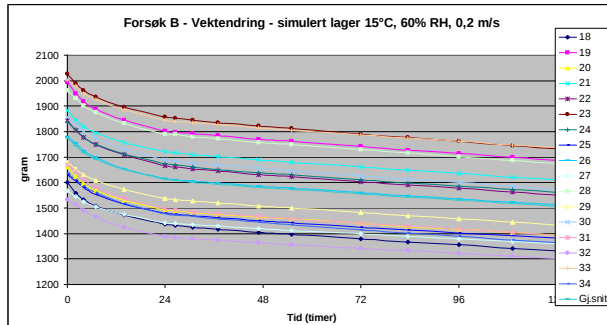
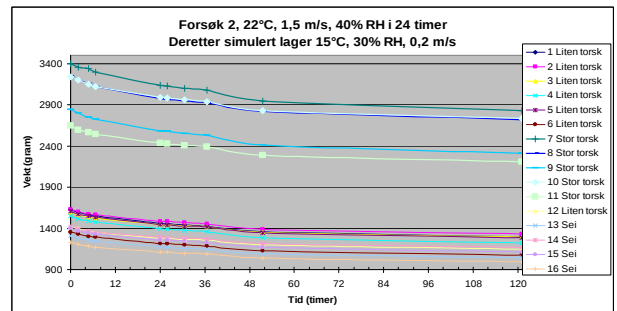
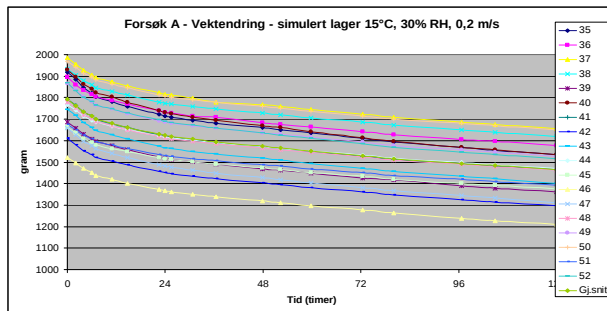
Energiforbruket på 101 kWh pr tonn klippfisk er basert på varmepumpen installert i referanseanlegget. Tidligere beregninger viser at både kompressoren og viften er litt overdimensjonert, og det er derfor potensial for å senke energien ytterligere. Samtidig må man ikke glemme at installert vifte på hjelpekondensatoren må kunne levere nok luft, og man må kunne forvente litt økt energiforbruk her.

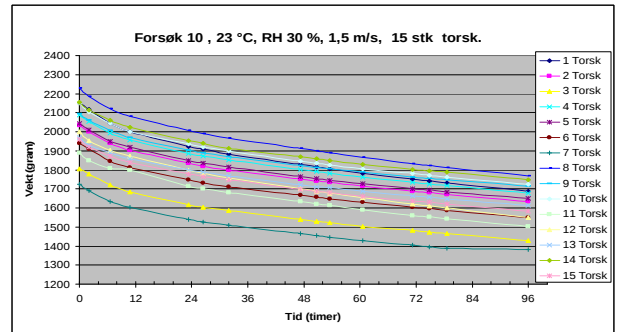
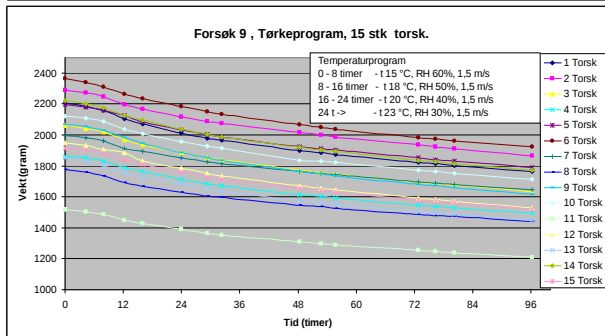
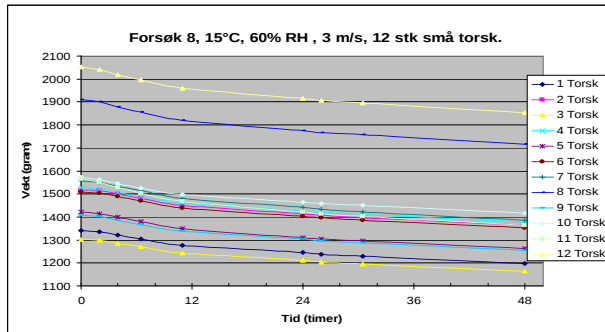
REFERANSER:

- [1] I. C. Clausen, Ola. M. Magnussen; Optimal Klippfisktørking. SINTEF Energiforskning AS, Teknisk rapport TR A6770, 2008-12-02.
- [2] E. Indergård, et. al., Teknisk rapport TRA6918 "Sluttørking av klippfisk, Kapasitetsutnyttelse av tørketunneler og sluttørking i lager", SINTEF Energiforskning AS., 2010

VEDLEGG

VEKTENDRING AV FISK UNDER TØRKEFORSØK





ENDRING I % H₂O I KLIPPFISK UNDER TØRKing

