

# **Sluttørking av klippfisk**

## **- Kapasitetsutnyttelse av tørketunneler og sluttørking i lager**

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

**Februar 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 - Kapasitetsutnyttelse i tørketunneler og sluttørking i lager

SAKSBEARBEIDER(E)

Ola M Magnussen, Erlend Indergård, Per Egil Gullsvåg

OPPDRAGSGIVER(E)

FHL Industri og eksport, Bacalao Forum

TR NR.	DATO	OPPDRAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR.
TR A6918	2010-02-02	Leonora Gallart Jornet	16X873
ELEKTRONISK ARKIVKODE		KONTROLLERT AV	GRADERING
100202104042		Anne Karin Hemmingsen	Åpen
ISBN NR.	RAPPORTTYPE	GODKJENT AV (STILLING, NAVN)	OPPLAG SIDER
		Inge R. Gran	21
AVDELING	BESØKSADRESSE	LOKAL TELEFAKS	
Energiprosesser	Kobjørn Hejesvei 1D	73 59 39 50	

**RESULTAT (sammendrag)**

Studier gjennomført på tørking av klippfisk de seneste årene har vist at tørkehastigheten i siste del av tørkeperioden er liten, og at luftmengder og relativ fuktighet i tørkeluften i denne perioden i liten 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”.

**Kapasitetsutnyttelse:** Det er påvist at en relativ stor del av luften som sirkulerer i tunnelene passerer utenom brettene med fisk og bidrar lite til tørkingen. Dette synes å ha to hovedårsaker: Feil design av vogner og for liten avstand mellom brettene. Anleggene mangler ofte styring av vogner og anordninger som ved stabling sikrer god, vertikal opplasting, og man får kanaler til falskluft ved tak, vegger og under vognene. mottak/sider. **Luftmengder på 30–50 % av sirkulert luft går utenom fisken og bidrar ikke i tørkingen (falskluft).** Falskluft kan reduseres ved å blende av kanaler utenom vognene, og det er da viktig å øke avstanden mellom brettene for å gi nok luft over fisken, samt å redusere trykkfallet over tunnelen. Man får dermed utnytte avvanningsevnen bedre, er det er **potensial til å redusere energiforbruket til mindre enn 100 kWh/tonn (30-90% energireduksjon).**

Tverrblåste tunneler har 3-5 ganger høyere energibruk enn langblåste tunneler, og bør bli bygget om til optimal drift av varmpumpene, samt ha svært gode styringssystemer for å redusere energibruken. Et tiltak som umiddelbart bør iverksettes er at alle vifter alltid blåser i samme retning som aggregatviftene, og at frekvensstyring installeres. Uansett vil energibruken i tverrblåste tunneler være høyere enn langblåste.

Forsøk viser at avdampingen i siste del av tørkeprosessen er relativt konstant og liten (1-2 g/time per kg saltfisk (startvekt)), og vil i liten grad påvirkes av tørkeluftens fuktighet og hastighet. Dette vil derfor være et godt utgangspunkt for dimensjonering av avvanningsanlegg for sluttørking, og denne kan foregå i lokaler med mindre krav til luftfuktighet, lufthastighet, som for eksempel i egnede lager, enkle tunneler e.l., der overskuddsvarmen fra hovedtørkingen utnyttes. Dette vil gi plass til innsetning av mer våt fisk i tørkene, og varmpumpene utnyttes mer optimalt, som gir økt utnyttelse av kostbare tunneler. Kapasiteter og bruk av utstyret ved sluttørking må tilpasses hvert enkelt anlegg og driftsrutiner. Overskuddsvarmen fra hovedtørkingen kan benyttes til å varme opp uteluft til sluttørking, og ved vanlig uteluft ved kysten viser beregninger en realistisk økning i tørkekapasiteten på i størrelsesorden 30–50 % med lave investeringer i ettertørke, kondensator i ettertørka, vifter og utstyr for luftregulering.

**Ved å redusere falskluft og øke avstand mellom brettene på vognene, samt å ta ut fisk med et godt tørrsjikt fra tørketunnelen, og sluttørke denne i egne lager/tunneler med lav lufthastighet og relativt høy luftfuktighet, vil man kunne øke kapasiteten med 30-50% og samtidig redusere energiforbruket til under 100 kWh/tonn ferdig tørket klippfisk.**

## STIKKORD

EGENVALGTE	Klippfisk	Energi
	Tørking	Effektivitet

## INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
BAKGRUNN .....	3
1 TØRKEANLEGG OG KAPASITETSUTNYTTELSE .....	3
1.1 FALSKLUFTE: TUNNEL – VOGNER – BRETT .....	3
1.1.1 Tilpassing av brett/vogner til tunnelverrsnitt.....	3
1.1.2 Brettavstand.....	4
1.1.3 Luftstrøm gjennom vognene.....	4
1.2 LANGBLÅSTE TUNNELER.....	5
1.2.1 Trykkfall gjennom tunnelene.....	5
1.2.2 Falskluff i langblåste tunneler.....	6
1.3 ENERGIBRUK VED TØRKING .....	7
1.3.1 Prinsippet med varmpumpetørrking .....	7
1.3.2 Oppfukning av tørkeluften.....	7
1.3.3 Energieffektivitet i langblåste tunneler.....	8
1.4 TVERRBLÅSTE TUNNELER.....	9
1.4.1 Luftsirkulasjon og strømningsforhold .....	9
1.4.2 Energiforbruk ved tørrking i tverrblåst tunnel .....	10
2 ANLEGG FOR SLUTTØRKING .....	12
2.1 AVFUKTINGSHASTIGHET VED SLUTTØRKING .....	12
2.2 ANLEGG FOR SLUTTØRKING .....	13
2.3 AVVANNINGSBEHOV VED SLUTTØRKING.....	14
2.4 ENERGIEFFEKTIV SLUTTØRKING.....	15
2.5 SYSTEMLØSNINGER FOR SLUTTØRKING .....	15
2.5.1 Utnyttelse av kondensatorvarmen for sluttørrking.....	16
2.5.2 Sluttørrking med uteluft .....	17
2.5.3 Beregningsmetodikk - eksempel.....	18
2.5.4 Energibehov for å varm uteluft.....	18
2.5.5 Begrensninger i bruk av uteluft .....	19
REFERANSER: .....	20

## **BAKGRUNN**

Studier gjennomført på tørking av klippfisk de seneste årene har vist at tørkehastigheten i siste del av tørkeperioden er liten, og at luftmengder og relativ fuktighet i tørkeluften i denne perioden i liten 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 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”.

## **1 TØRKEANLEGG OG KAPASITETSUTNYTTELSE**

***Mål: Utarbeide forslag og retningslinjer til endringer i driftsforhold og tekniske løsninger, økt kapasitet og redusert energiforbruk ved dagens tørketunneler.***

Målinger tidligere utført ved flere anlegg, samt teoretiske beregninger og analyser, viser at de fleste tørkeanleggene ikke har optimal utnyttelse av avfuktingskapasiteten. Undersøkelsene viser betydelig ”falskluft” som passerer over, under og mellom vogner. Denne luften tar nesten ikke opp vann, og kjøling og oppvarming av denne gjør ingen nytte for selve tørkingen av fisken. Dette betyr at installert tørkeanlegg med endret drift og enkle forbedringer i tunnel kan gi betydelig økt kapasitet samtidig som energiforbruket per tonn klippfisk vil bli redusert.

### **1.1 FALSKLUFT: TUNNEL – VOGNER – BRETT**

Det er fra flere prosjekt påvist at en relativ stor del av luften som sirkulerer i tunnelene passerer utenom brettene med fisk og bidrar lite til tørkingen. Dette synes å ha to hovedårsaker: Feil design av vogner og for liten avstand mellom brettene på vognene.

#### **1.1.1 Tilpassing av brett/vogner til tunneltverrsnitt.**

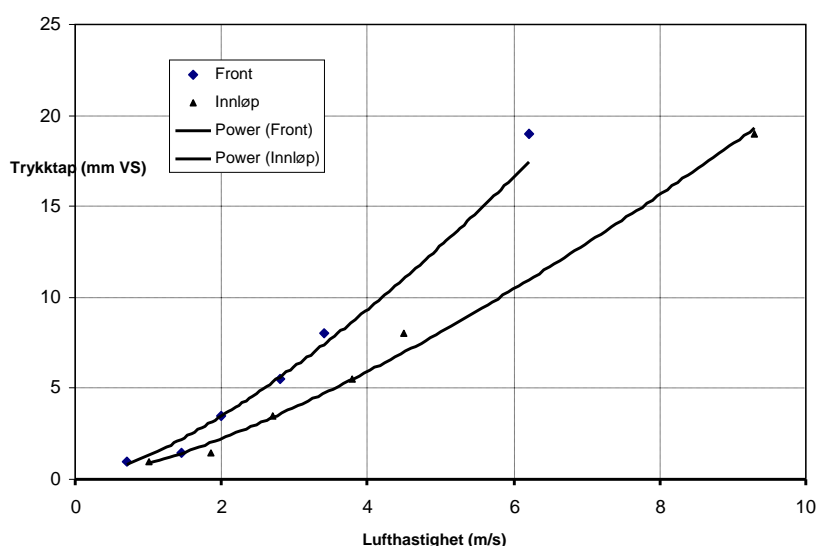
De fleste anlegg synes å ha relativt standard bredde og dybde av trebrett, men brettene mangler styring (skinner) og/eller en anordning som ved stabling av brett sikrer at opplastingen blir rimelig vertikal. Dette gjør at vognene ofte blir stående litt på skrå når de fylles inn og skyves innover i tunnelen. For å gjøre fylling og flytting av vognene enklere er tunnelene bygget med god klaring sideveis. Tunneltaket er også ofte bygd relativt høyt for å utnytte gulvplassen, noe som krever at vognene lastes tilsvarende høyt. Ved manuell stabling av brett krever dette mye tung løfting og i praksis blir de ofte ikke stuet høyt nok, noe som gir et åpent rom under taket. Vognene står på hjul, og man får tilsvarende kanaler under vognene. Luftstrømmen velger alltid minste motstands vei, og vil gå i store mengder gjennom kanalene utenom fisken på vognene, og vil derfor ikke bidra til tørking.

### 1.1.2 Brettavstand.

For å få rask og jevn tørking, spesielt i startfasen når vannet lett fordampes av overflate på fisken, må en ha høy nok lufthastighet og tilstrekkelig luftmengde for å ta opp avdampert vann fra fisken. De fleste bedrifter synes å ha fokus på å få så mye fisk som mulig på vognene ved å velge liten avstand mellom brettene. Det er ofte registrert avstandsklosser på brettene mellom 50 og 70 mm og med unntak av ved små og tynn sei er dette klart for lite. Selv ved middels stor fisk fyller fisken for mye av tverrsnittet mellom brettene, og det er liten plass for luftstrømmen over fisken. Dette gir et høyt trykkfall gjennom tunnelen, spesielt ved lange tunneler. For å få tilstrekkelig luftstrøm over fisken i dette tilfellet, kreves det en stor og energikrevende vifte som leverer høyt nok trykk. Mindre vifter vil stå og ”spinne” uten å gi gjennomstrømming av tørkeluft.

### 1.1.3 Luftstrøm gjennom vognene

Trykkfallet over en vogn med trebrett avhenger av lufthastighet (mellom brettene), brettavstand og størrelse (spesielt tykkelse) av fisken. Denne sammenhengen ble bestemt ut fra en tidligere utført måleserie [1] der det ble bygget en rigg for måling av trykkfall over en vogn med små sei der avstandsklossene mellom brettene var 50 mm. Rigg og måleresultat er vist i Figur 1. Selv ved små sei var trykktapet betydelig, noe som i den industrielle tunnelen førte til at luften ble presset gjennom falskluftkanalene i større grad. Derimot hvis det ikke hadde gått falskluft (for eksempel blendet bort kanalene) i gjennom denne tunnelen, så ville nok viften ha hatt problemer med å levere nok trykk til å drive tørkeluften rundt. Ved større fisk på brettene ville trykkfallet blitt enda høyere og mer luft blitt tvunget igjennom som falskluft. Dette er registrert ved en rekke anlegg hvor betydelig større fisk legges på tilsvarende brett med samme brettavstand.



**Figur 1.** Arrangement og målt trykkfall avhengig av lufthastighet over vogn. Brettstørrelse: 1,0 x 1,5 m, Klosshøyde: 50mm, sei 1,0 kg, tykkelse 30 mm; 17,7 kg saltmettet fisk /brett.

Som nevnt over viste forsøk (Figur 1) at en brettavstand på 50 mm med små sei gav et trykkfall over vognen som var for høyt til at all luft kunne gått igjennom vognene, dvs. hvis man hadde

blendet av for falskluft. Høyden på små sei ligger rundt 30mm med en klaring på 20 mm til neste Brett. Å øke denne klareringen til det dobbelte, 40 mm, ville uten å endre mengde luft gjennom tunnelen ført til en lufthastighet på omtrent det halve. Å redusere lufthastigheten fra for eksempel 4 m/s til 2 m/s over brettene, ville gi en trykktapsreduksjon fra 6 til 2 mmVS per vogn.

Små torsk (1,5-2,0 kg) har en høyde på omkring 40 mm, og større torsk (3,0-3,5 kg) har en høyde på ca 50 mm i snitt. Det anbefales at fri høyde over fisken til neste Brett er minimum 40 mm, helst 50 mm (fra øverste del av fisken), så det vil være nødvendig med klosser mellom brettene på minst 10 mm ved større fisk.

Ved å øke avstand mellom brettene med 20 mm ville hver vogn (med 18 Brett) bli 36 cm høyere. Ved å etablere en pålastingsrampe som gjør det enkelt å manuelt stable høyt, vil man kunne utnytte klareringen som ofte er mellom vognene og tunneltaket, og kapasiteten per vogn ville ikke bli vesentlig lavere enn 10 %. Dette fører i tillegg til en betydelig reduksjon av falskluft, og man får en langt mer effektiv og økonomisk tørking. Det vil bli vist i tilhørende rapport "Tørkeluftens påvirkning på tørkehastighet av klippfisk", at selv om man reduserer kapasitet per vogn med 10 %, vil man kunne få betydelig mer kapasitet ut fra tunnelen med korrekt sluttørking.

## 1.2 LANGBLÅSTE TUNNELER

Det er gjennom forskjellige prosjekter de senere år gjennomført relativt omfattende målinger av luftmengder og strømningsforhold i tre langblåste tunneler. Målingene ble gjennomført under vanlig drift av anleggene, og fisk og størrelser varierte avhengig av det anleggene produserte. Produksjonen forløp etter vanlig prosedyre under forsøkene, uten å endre rutiner, Brett/vogner og pålegging.

### 1.2.1 Trykkfall gjennom tunnelene

En oppsummering av hovedresultater av luftsirkulasjoner for de 3 undersøkte tunneler er gitt i Tabell 1. Lufthastighetene ut/inn av tørkebrettene ligger generelt mellom 1 m/s til 2 m/s, men varierer over bredden, spesielt for en av tunnelene. Hvis man tar utgangspunkt i de målinger som utført av trykkfall over Brett (Figur 1) fås følgende totale trykktap i de tre tunnelene:

1: "Moderne": Stålrammer, trolig lavt trykktap,

2: "Eldre stor": 18 mmVS,

3: "Eldre vanlig": 25,2 mmVS.

(1 mmVS (VannSøyle) = ca. 10 kPa).

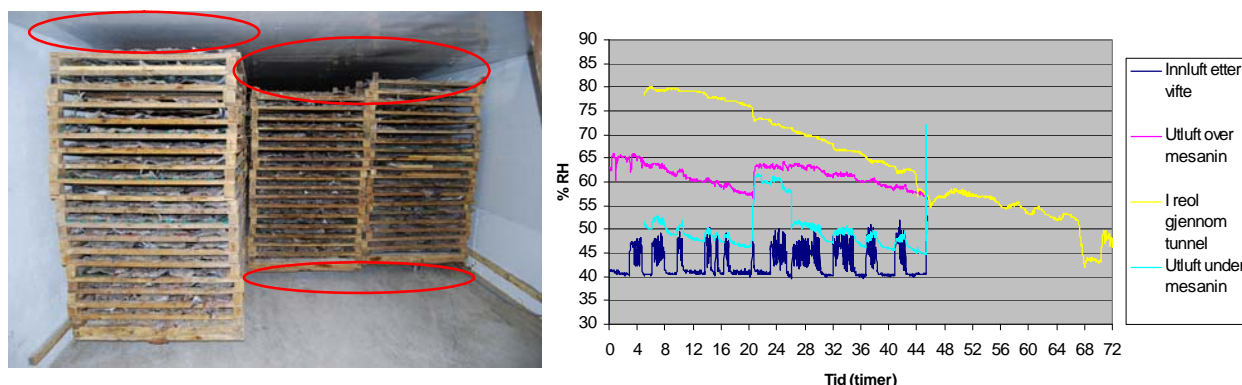
**Tabell 1:** Luftforhold i 3 langblåste tunneler.

Tunnel	Antall vogner	Lufthast. over Brett [m/s]	Total luftmengde [m <sup>3</sup> /time]	Falskluft [%]
Moderne	5 x 16	1,25	58 000	ca. 40
Eldre, stor	7 x 22	0,7 – 1,4 – 0,5	72 000	ca. 36
Eldre vanlig	3 x 18	Snitt ca. 1,4	42 000	ca. 50

Det er usikkerhet knyttet til disse resultatene, både fordi hastighetsmålingene er usikre og er gjennomført ved vogner med tilgang bare ved inn- og utløp av tunnelene. En har også benyttet målinger av trykkfallet gjennom vogner med liten fisk. Bare ved et av de undersøkte anlegg har en hatt mulighet for måling av viftas totale løftehøyde som var ca. 65 mmVS. Anslått trykkfall over vognene var ca 18 mmVS og dette gir et resterende trykkfall gjennom fordamper og kondensator, for hastighetsendringer, avbøying, mv. på i størrelsesorden ca.50 mmVS noe som tyder på at dette er i riktig størrelsesorden. Det er imidlertid viktig å være klar over at så store trykkforskjeller som vist her er i øvre området av det som vanligvis oppnås med propellervifter, og at disse normalt har en viftediagram som viser sterk nedsatt viftevolum med økning i mottrykket.

### 1.2.2 Falskluft i langblåste tunneler

Målingene for alle tunnelene viste at svært stor del (ca 36-50 %) av totalt sirkulert luftmengde ikke strømmer over fisken, men passerer over, under og mellom vognene som falskluft. Av praktiske grunner på grunn av skyving av vognene gjennom tunnelene er det betydelige spalter mellom vognene. Mesteparten av falsklufften går derfor gjennom disse kanalene som blir mellom det øverste brettet og tak, under vogner og noe langs veggene (Figur 2).



**Figur 2.** Tverrsnitt ved luftutløp i en langblåst tunnel som viser falskluftkanaler og målt luftfuktighet på viktige steder i under en driftsperiode.

Det ble i ett av anleggene plassert fuktighetsmålere i innløpsluften foran vognene, ved utløp i falskluftstrømmen under tunneltaket og ved innløp til fordamper. Målingene dokumenterer at fuktopptaket i falskluffta er minimal. I dette tilfelle sirkulerer ca. 50 % av luften gjennom tunnelen uten å medvirke til tørkingen og dette synes å være ganske vanlig i slike tunneler. Selv om langblåste tørker er svært energieffektive er det tydelig fortsatt mye å hente i energieffektivitet og spesielt i økning i anleggenes vannfjerningsevne og kapasitet.

Potensialet for økt avvanning uten endring av de tekniske hovedkomponenter er i størrelsesorden med falsklufftandelen. **En av hovedutfordringene ved langblåste tunneler er å få redusert falsklufftmengden og derved utnytte anleggenes avvanningsevne bedre.** Hvis det ikke er mulig å stable brettene på vognene helt opp mot taket, vil det ved de fleste anlegg være mulig å stoppe eller betydelig redusere falskluff enkelt ved bruk av ”flaps” (lepper av gummi- eller plast strimler) som henges under tak og under vogner. Siden vognene flyttes mot luftstrømmen vil flapsene under taket bli presset mot øverste brett som derfor ikke må ha pålagt fisk. Flaps bør plasseres

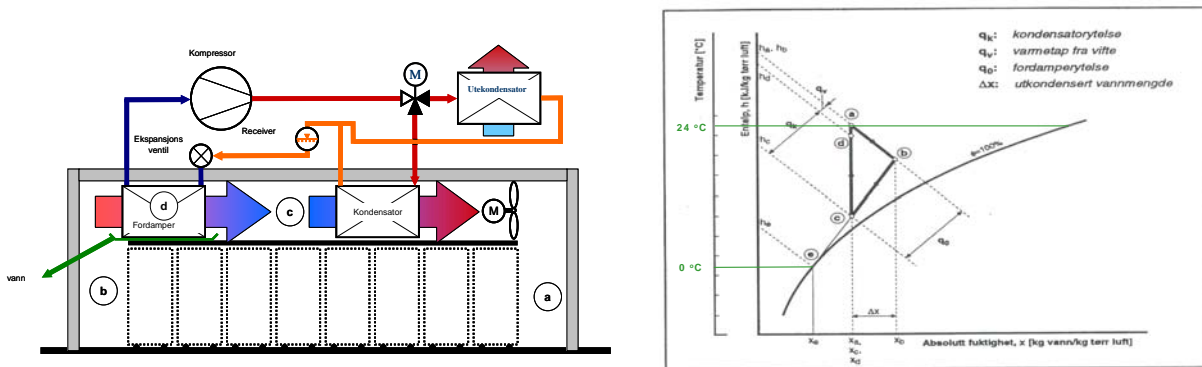
med 1 – 2 vogners avstand både i tak og under hver vogn for å sikre at luften styres mellom brettene.

Som nevnt tidligere vil blending av falskluftkanalene kunne gi utfordringene ved at for liten avstand mellom brettene fører til for høyt trykkfall over vognene, og viften blir stående å spinne. Dette fører til redusert luftmengde og vil gi redusert varmeoverføring i fordampere og kondensator.

### 1.3 ENERGIBRUK VED TØR KING

#### 1.3.1 Prinsippet med varmepumpetøking.

Hovedprinsippene for bruk av varmepumpe ved tørking er vist skjematisk i Figur 3. Ved å benytte et lukket luftsirkulasjonssystem hvor fuktig tørkeluft kjøles ned til temperaturer under doggpunktet vil vann kondensere på den kalde fordampnerflaten og kondensasjonsvarmen tas opp av kuldemediet. Den kalde luften med lavt vanninnhold går så videre og blir oppvarmet igjen i kondensatoren ved at opptatt energi i kuldemediet (fra fordampneren) blir levert tilbake til tørkeluften som oppvarming av denne til ønsket temperatur for tørking. Energiforbruket for flytting av varmen til høyere temperatur er liten på grunn av små temperaturforskjeller.



**Figur 3:** Prinsipp for varmepumpe ved klippfisktøking. A: Langblåst tørke. B: Tørkeprosessen i energi – vann diagrammet for fuktig luft.

Under tørking av fisken tilføres energien for fordampning av vann fra luften ved at denne kjøles og energimengden i luften er derfor konstant siden avgitt varme er lik energien i opptatt damp. Tilført varme i kompressor og til viften går i noen grad til oppvarming av innlagt kald fisk og varmetap fra tunnelen, mens overskuddet må fjernes. Vanligvis leveres denne varmen til uteluft ("fyrer til kråka"), men benyttes av noen til oppvarming av lokaler.

#### 1.3.2 Oppfukking av tørkeluften

Som ved all tørking er utnyttelsen av luftens kapasitet for å oppta vanddamp avgjørende for anleggets energieffektivitet. Overføringen av vann til damp i saltfisken er imidlertid langsom og avhengig av tørrheten i fisken og tørkeluftens tilstand som er i kontakt med denne. Å oppnå høy luftfuktighet ut fra vognene med fisk (oppfukking gjennom tunnelen) krever derfor i praksis at luften strømmer over fisk med høyt vanninnhold. Dette oppnås greit i langblåste tunneler ved at luften strømmer mot stadig mindre tørket fisk slik at den tørreste og senest tørkende fisk møter den tørreste luft. Samtidig må fiskeflatene som luften strømmer over være stor nok (lang nok tunnel) til at luften når høy fuktighet før ny nedkjøling i fordampneren.



På grunn av vanskelig tilgang inne i tørkene finnes lite målinger fra dette området, bortsett fra data fra en logger festet til en vogn som ble ført gjennom tunnelen under normal drift (Figur 2). Målingene (gul kurve ” I reel ..”) viser at hele det første døgnet er fuktigheten målt nært metning for saltfisk, en gir derfor redusert tørking (i bakre del av tunnelen) fordi luften allerede er mettet fra fisken tidligere i tunnelen. Det er et klart behov for flere målinger av luftstrøm, luftfuktighet og trykktap i vogner, målinger/simuleringer på anlegg for bedre å dokumentere denne prosessen.

### 1.3.3 Energieffektivitet i langblåste tunneler

Tørkekapasiteten til varmepumpen kan, som vist tidligere, enkelt økes ved å redusere falskluft. Produksjonskapasiteten blir dermed begrensningen av å få vannet i fisken over til damp. Målinger av tørkehastighet viser at etter dannelse av tørrsjiktet går tørkingen langsomt og er betydelig mindre avhengig av lufthastighet, temperaturen og relativ fuktighet enn i startfasen. I denne fasen kreves mye nyinnlagt fisk i tunnelen for optima utnyttelse av varmepumpen, og selv de lange motstrømstunnelene kan bli for korte til å opprettholde nok avdamping. Ved de tre undersøkte tunnelene er fuktigheten ut av tunnelen ca. 49 %, 60 % og 62 % selv med falskluft på hhv. 40, 36 og 50 %. Med redusert falskluft vil fuktigheten ut av tunnelen kunne økes.

Alle de 3 langblåste tunnelene som ble undersøkt viser høy energieffektivitet og ligger i størrelsesorden 130, 160 og 180 kWh per tonn ferdig klippfisk (Tabell 2). Dette skyldes først og fremst god oppfukning ved strømning over mange brett med stadig fuktigere fisk ( $\Delta x$ , linje a – b i Figur 3B). Videre ser man av denne figuren at forholdet mellom nedkjøling (dvs. kuldeytelsen:  $q_0$ ) og vannfjerning pr. sirkulert luftmengde øker med inngående temperatur. Siden tørkehastigheten også øker med temperaturen vil det derfor være viktig at inngående temperatur ligger nær grensen for brenning (ca 26 °C).

**Tabell 2:** Energiforbruk ved 5 klippfisktunneler

TYPE TØRKE	Langblåst gammel	Langblåst rel. ny	Langblåst eldre	Tverrblåst tradisjonell	Tverrblåst ny
Vogner i luft -retningen [stk.]	22	16	18	3	4
Antall vogner totalt [stk.]	154	80	54	24	40
Energif behov totalt [kW]	102	63	40,1	39,6	90
Energi behov pr. vogn [kW/vogn]	0,66	1,27	0,74	1,65	2,25
Målt spes energiforbruk [kWh/tonn klippfisk]	159	190	129 *	396	540

\* Ved dette anlegget ble vogner tatt ut til etter-/sluttørking i arbeidshall

Siden tørkingen av klippfisk går svært langsomt i sluttfasen og tørkehastigheten da er lite avhengig av lufthastighet og tilstand, kan bedre og sikrere utnyttelse av tunnelenes gode og energieffektive avvanning oppnås ved bruk av sluttørking i egnede tunneler, ventilerte lager, mv. Ved at ”halvtørr” fisk tas ut og sluttørkes i andre lokaler, vil mengden nyinnsatt saltfisk øke og bidra til å opprettholde høy luftfuktighet på utluft i de eksisterende tunneler selv med relativt lang tid mellom trekking av vogner.

Målinger av tunnelen ”Langblåst eldre” viser også dette. Her tok man allerede ut ”nesten tørr” fisk til sluttørking i eget lager. Målingene (Figur 2) av fuktighet og temperatur inne i en vogn som fulgte produksjonen gjennom tunnelen, dokumenterte at luftstrømmen mellom brettene var så liten at luften var mettet med fuktighet og gav liten tørking første døgnet (i de siste vognene). Ut fra denne ene målingen kan det tyde på at ved denne driftsmåten med en optimal fylling og sluttørking vil energiforbruket reduseres ned mot 100 kWh/tonn samtidig som kapasiteten totalt økes betydelig (anslagsvis 20-40 % økning).

## **1.4 TVERRBLÅSTE TUNNELER**

De fleste tunneler av denne type er relativt nye og de tekniske løsningene er ofte levert av Frigosistema (Portugal). Bakgrunnen for at slike løsninger er valgt synes først og fremst å være enklere drift ved at tunnelene fylles med brett/vogner av tradisjonell type, anlegget startes og går med full ytelse til all fisk skal være ferdigtørket. I praksis vil, både på grunn av variasjon i tørkehastighet mellom fisker og ujevne luftforhold i tørka, tørrheten variere mellom fisker. For å unngå for mye overtørking vil det derfor oftest være nødvendig med minst en sortering ved uttak og innsetting for ettertørking av slakk fisk. For å redusere ujevnheten man vil få i en lang tunnel ved at fuktigheten i tørkeluften stiger innover i tunnelen og derved gir redusert tørking i enden av tunnelen, er tverrblåste tunneler bygget kort i luftretningen, ofte bare 3 eller 4 vogner.

### **1.4.1 Luftsirkulasjon og strømningsforhold**

For å få inn ønsket antall vogner blir da tunnelene ”bred”, tilsvarende som om man snudde luftretningen på tvers (90°) i de tradisjonelle tunnelene (derfor ”tverrblåst”). For å opprettholde tørkehastigheten er lufthastigheten gjennom vognene tilsvarende det en benyttet for langblåste tunneler, men med det store frontareal for dette arrangement, er sirkulert luftmengde drastisk øket. For å oppnå dette og i tillegg få noenlunde jevn lufthastighet må man i stede for 1 – 2 større vifter som i langblåst tunneler, gå over til mange små, hurtiggående og lite energieffektive vifter. Dessuten er det på grunn av ujevn tørking tenkt å snu luftretningen med jevne mellomrom. Feil rotasjonsretning gjør imidlertid viftene enda mindre effektive. De store luftmengdene vil, om all luft skulle behandles, kreve store varmevekslerflater, og man har derfor valgt å ta ut bare en delstrøm av den utgående tørkeluften som avvannes og oppvarmes i et standard avfuktingsaggregat. Prinsippskisse av tunneltverrsnitt og luftstrømmer er sammen med et bilde av delvis lastet tunnel er vist i Figur 4. Figuren (bildet til høyre viser) også at et kompakt kompressoraggregat er plassert inne i tunnelen.



**Figur 4:** Tverrblåst tunnel. A: Skisse tverrsnitt med luftsirkulasjon ved rett luftsirkulasjon. B: bilde av delvis innlastet tunnel.

Omfattende målinger viser at i periodene man snur sirkulasjonsretningen vil hovedviftene blåse mot aggregatet og nesten helt stanse luftstrømmen gjennom dette. Resultatet er at luftstrømmen over fisken reduseres og tørkehastigheten faller. Med så kort luftvei over fisken er, bortsett fra helt i startfasen, oppfuktingen av lufta liten og viftenes sirkulerte luftmengde og derved forbruket av energi altfor høyt. Noen anlegg har også hovedvifter i serie der hver andre vifte roterer feil vei, som fører til at 50 % av viftene alltid har dårlig virkningsgrad. Et tiltak som umiddelbart bør iverksettes er at alle vifter alltid blåser i samme retning som aggregatviftene, og at man ikke snur luftretningen.

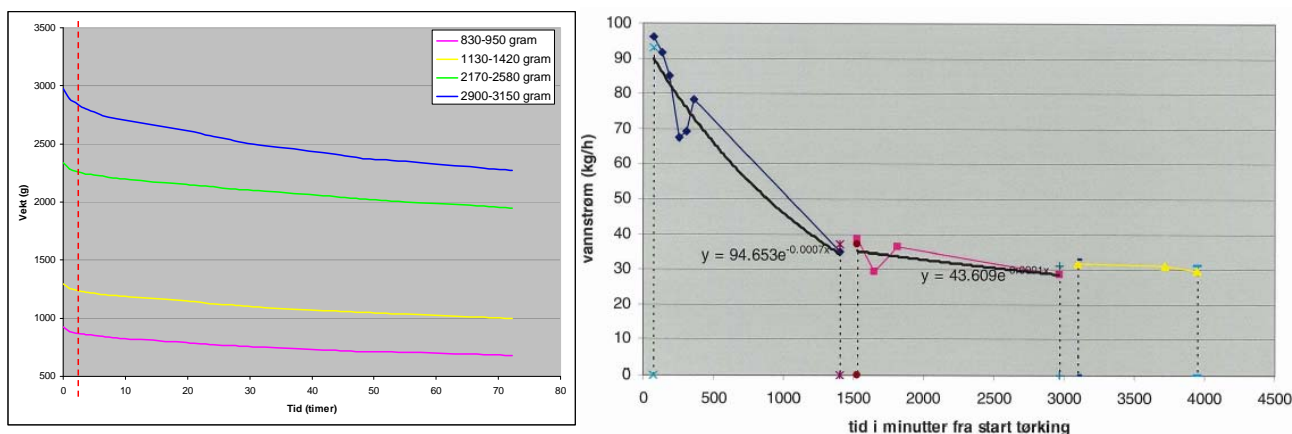
Tilsvarende som ved langblåste tunneler har også tverrblåste store luftmengder som sirkulerer utenom fisken i kanaler ved tak og gulv. Også her bør dette ved de fleste anlegg enkelt kunne stoppes eller reduseres sterkt ved bruk av ”flaps”, eller stable vognene til takhøyde. For å få bedre strømning over fisken bør også avstanden mellom brettene økes her. Selv om antall vogner i strømningsretninger er lavt, er også de små vifter med høyt turtall mer påvirket av høyere trykktap i luftkretsen.

Som nevnt er tørkehastighet lav etter at et tørt sjikt på overflaten er dannet, og er videre tørking er mindre avhengig av lufthastigheten. Det er derfor viktig å redusere den store luftstrømmen og dermed vifteeffekten. Dette kan i dag enkelt og energieffektivt gjøres ved frekvensstyring av viftene, alternativt kan man stoppe noen vifter. Siden avfuktingsaggregatet har egne vifter vil dette ved denne type tørker ikke påvirke avfuktingen.

#### 1.4.2 Energiforbruk ved tørking i tverrblåst tunnel

En rekke tørkeforsøk under konstante forhold av tørkeluften viser at tørkehastigheten avtar raskt og nesten eksponentielt etter start. Etter at et tørrsjikt er dannet på overflaten, avtar imidlertid vannfjerningshastigheten langsomt og er videre lite avhengig av lufttilstanden (Figur 5). Dette tilsvarer forholdene en har ved periodisk oppfylling av de tverrblåste tunnelene, men her er

avfuktningskapasitet begrenset i starten og anlegget klarer ikke å holde tritt med avdampingen. Deretter får man en lav og langsomt minkende vannfjerning selv om luftas tørrhet øker betraktelig. Om anlegget kjøres videre ved full ytelse i denne fasen vil nedkjølingen og oppvarmingen av luft være konstant og siden lite vann kondenseres vil tilført energi per kg vann fjernet øke. (dh/dx verdien øker og energieffektiviteten avtar, vist av at linja a–b i Figur 3B blir svært kort og helling på d–e brattere).



**Figur 5.** Tørkehastighet for klippfisk. A: Vektutvikling ved tørking i testkammer. B: Tørkehastighet ved periodisk innsetning i tverrblåst tunnel målt fra kondensert vann på fordampner.

Målingene av energieffektivitet ved tverrblåste tunneler gjennom tørkeperioden viser svært høyt forbruk av energi, også sammenlignet med eldre langblåste tunneler (540 i forhold til 160 kWh/tonn klippfisk, Tabell 2). Den enkleste forbedring vil være tilpasning av anlegget ved å redusere kompressorytelsen i aggregatene. De fleste større tørkeanlegg har flere tunneler med hver sitt separate varmpumpeaggregat. Ofte har disse to kompressorer og to fordampner/kondensator enheter. Kompressorene har ytelsesregulering, men undersøkelser viser at disse ofte ikke er i bruk. Et forbedret SRO-system (Styre–Regulering–Overvåking) hvor kompressorytelsen styres etter temperatur og luftfuktighet vil gi betydelig bedring av effektiviteten. Det vil i tillegg trolig også være behov for noen endringer i anleggets komponenter og spesielt regulering av væskeinnstruping (kuldemedium) til fordampner. Også styring av trykk på kondensatorsiden bør endres for å unngå unødvendig høye trykk. Dette er forhold som må bestemmes for hvert enkelt anlegg.

På sikt bør anleggene som ønsker å beholde satsvis innfylling i tunnelene, gjennomføres betydelig endring i systemene om en ønsker mer økonomisk drift. Mange anlegg har en rekke tunneler med egne aggregat som fylles – tømmes syklisk etter 3 – 5 dagers tørking. Hvert anlegg har betydelig overkapasitet allerede etter ett døgn, og har samlet sett en svært stor overkapasitet til enhver tid. Alle anlegg går størstedelen av driftstiden med dellast, og selv om en bytter til et godt reguleringssystem har man liten utnyttelse av investert kapital og liten effektivitet. En sentralisering av kompressorene, fortrinnsvis med ”indirekte” kjøling og oppvarming (bruk av væske som kjøles og oppvarmes i sentrale enheter og sirkuleres til forbruksstedene) vil gi stort overskudd av både kulde og varme. Dette kan brukes til flere tunneler, til klimastyrte lager og rom til ettertørring, oppvarming av rom og lignede.

## 2 ANLEGG FOR SLUTTØR KING

*Mål: Bestemme luftmengder, -hastigheter, arrangement, mv. som kreves for rasjonell og energieffektiv tørking i siste tørkefase og gi forslag til alternative tekniske løsninger.*

Tørkeforsøk (presenteres i rapporten ”Tørkeluftens påvirkning på tørkehastighet av klippfisk”) viser at lufthastigheten over fisken har liten betydning for tørkehastigheten i siste del av tørkeperioden, samt at fuktigheten har mindre betydning enn tidligere trodd. Sluttørkingen kan derfor foregå i egne tørker eller lokaler med liten lufthastighet og med noe høyere relativt fuktighet enn i tørkene. Det er kjent at en produksjonsbedrift gjør dette (i noen grad) allerede i dag ved at vogner med ”nesten tørr” fisk tas ut, plasseres og sluttørkes i arbeidslokaler. Dette kan imidlertid gjøres mye mer optimalt.

For å oppnå økning i bruk av sluttørking i egne rom, som ut fra målingene anslår en mulig kapasitetsøkning i størrelsen 20–40 % for langblåste tunneler, er det trolig bruk for mer tilrettelagte anlegg. Alternative løsninger for sluttørking vil bli gjennomgått med beregning av ytelser på aggregat og tekniske løsninger.

### 2.1 AVFUKTINGSHASTIGHET VED SLUTTØR KING

En sentral faktor for beregning, dimensjonering, design og drift av klippfisktørkeløsninger er kunnskap og data om hvor raskt saltfisken tørker. Det er gjennom de siste årene vært gjennomført systematiske tørkeforsøk i laboratoriene ved SINTEF Energi for å øke kunnskapen om effekt av temperatur, luftfuktighet og lufthastighet på tørkehastigheten. Resultatene viser at ved starten av tørkingen, mens overflaten av fisken har høy fuktighet, går tørkingen raskt og er avhengig av luften over fiskeoverflaten, fiskestørrelse og flekking/salting [1]. I tillegg vil fiskens geometri og anatomi ha betydning for hvor raskt vannet transporteres fra det indre av fisken.

Etter at overflatevannet er fjernet dannes et tørrsjikt på fiskens overflate som øker tørkemotstanden svært raskt. Samtidig vil fiskeskinnet virke som en barriere mot vanntransporten fra skinnsiden. For å effektivisere tørkeprosessen er det viktig at hver saltfisk er godt skjært. En sortering fisken før tørking vil medføre at fisken på vognene vil ha en jevnere tørking.

Resultatene viste at lufthastigheten har liten betydning for tørkehastigheten etter at overflatevannet er fjernet fra produktet, mens luftfuktigheten spiller inn til en viss grad. Dette gir mulighet for endret tørkeregime og redusert energi- og driftskostnader ved at fisk kan ettertørkes i egne lagre eller at viftene skrues ned etter omkring ett døgn. Størrelse og overflate har stor betydning for tørkehastigheten, og små fisk tørker noe raskere enn stor fisk. Ved å øke tørkeflaten (bedre skjæring) viser målinger en økning i vekttap på 2,5 % for små fisk (1,5 kg) etter 2 dagers tørking.

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 %. Dette gjør at tørking av klippfisk avviker i forhold til vanlig tørketeori. Trolig er vannstrømmen fra det indre av fisken mer langsom enn fordampingen fra overflaten under klippfisktørking. Dette forårsaker en kraftig uttørking av overflatelaget som danner en barriere mot videre tørking, samtidig med at væsketransporten fra det indre bringer med salt som krystalliseres i tørrsjiktet når vannet fordamper. Selv om ikke årsakene til den langsomme sluttørkingen er helt klarlagt, kan man konstatere at tørkingen etter at tørrsjiktet er dannet går svært langsomt. Anleggets avvanningskapasitet blir dermed dårlig utnyttet og energi-effektiviteten blir liten.

Tørkeforsøkene viser en betydelig økning i tørketunnelenes kapasitet og utnyttelse av avfukningssystemet dess mer ”ny og våt” saltfisk som settes inn i tunnelene. Selv ved lange langblåste tunneler viser målingene at luftfuktigheten ut fra fiskevognene ofte er for lav etter første del av tørkingen. *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.*

## 2.2 ANLEGG FOR SLUTTØRNING

Så å si all industriell framtørking av klippfisk foregår i dag innendørs ved at saltfisken legges på brett som stables i høyden på vogner som igjen innsettes i tunneler med styrt luftsirkulasjon og lufttilstand. Det benyttes i dag i hovedsak tre hovedtyper av avfukningsløsninger for tunnelene:

### 1: Hordetunneler:

Dette er den opprinnelige metoden med inntak og oppvarming av uteluft, blåsing av varm/tørr luft motstrøm til vognene med saltfisk som innsettes periodisk, skyves mot luftstrømmen og tas ut ved luftinnløpet. Med tørketider på 3–5 døgn kreves lange tunneler som da også blir effektive ved at luften strømmer over stadig fuktigere fisk og tar opp mye vann slik at luftens tørkepotensial utnyttes godt. For å bedre utnyttelse av tørkepotensialet ved lav fuktighet i uteluft og behov for mye oppvarming benyttes også resirkulering av noe utluft (klimaregulerte tørker).

Ulempen med prosessen er at denne er avhengig av uteluften, og man får et lavt tørkepotensial ved høy utetemperatur og fuktighet, og dermed redusert tørkevolum spesielt sommer/høst perioden. Man risikerer brenning av fiskeskinnet under disse forholdene.

### 2: Langblåste varmpumpetørker

Tørkene ble videreutviklet fra hordetørkene på 1970-tallet ved at inn- og utløp av uteluft ble lukket og tørkeluften sirkulert i en lukket krets hvor vannet ble fjernet ved nedkjøling i fordamperen og oppvarmet igjen i kondensatoren. I tillegg til sterkt redusert energibehov gjør teknologien at en ikke er avhengig av uteluftens tilstand og kan utnytte tunnelen maksimalt hele året. Energieffektiviteten avhenger imidlertid fortsatt av at man har lange tunneler med fuktig fisk ved luftutløp som gir høy luftfuktighet i tørkeluften inn til varmpumpen.

### 3: Tverrblåste tunneler

Produsenter med denne teknologien har ofte bygget en rekke mindre tunneler med satsvis innsetting og uttak. For å unngå stor variasjon i tidspunkt før fisken er tørr, har man bygget

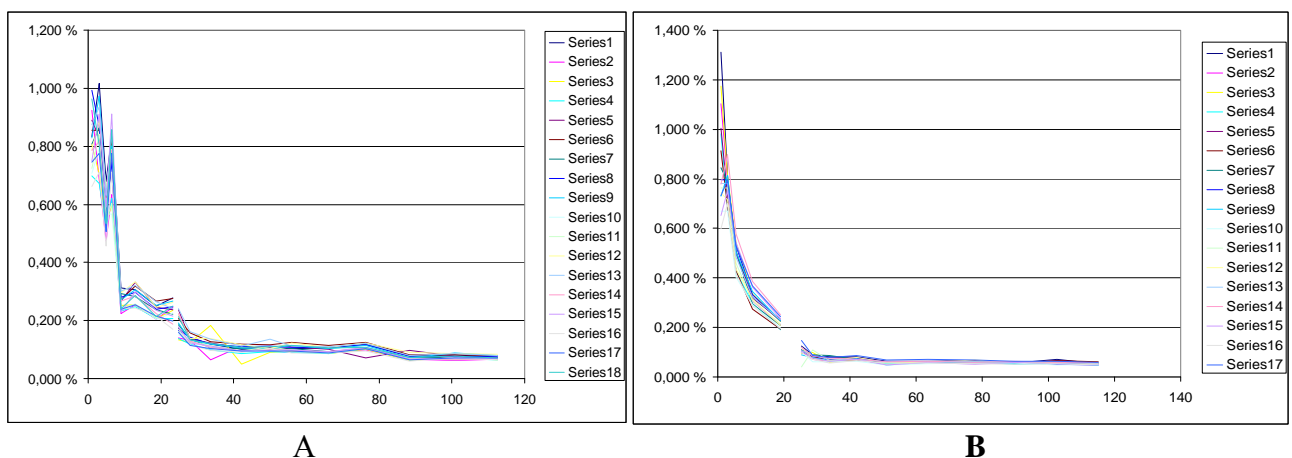
tunnelene kort i luftstrømretningen, med bred (på tvers av det som var vanlig i langblåste tunneler). Hovedulempen er at aggregatene ikke effektivt kan håndtere den store variasjon av avvanningskapasitet i startfasen når fisken avgir mye vann, og i sluttfasen når det motsatte skjer. Når aggregatene så går for fullt hele tiden vil luften etter hvert bli svært tørr og en bruker mye energi på å kjøle og varme luft uten å få tatt ut særlig vann.

En vesentlig grunn for innkjøp av denne tunneltype er lav investering ved at en benytter standard avfuktingsaggregat som tar ut en delstrøm av sirkulert luftmengde som kjøles/varmes, og at kompressoraggregat står i hver tunnel.

Felles for alle typer tørker er imidlertid at avdampingen fra de nesten tørre vognene er liten og at tørkingen som nevnt i liten grad er påvirket av lav fuktighet og høy lufthastighet. Ved å gi plass til mer saltfisk vil man være mindre avhengig av å sette inn fisk ofte, og forsøkene viser at ”å dra” tunnelene en gang pr. døgn vil være nok.

### 2.3 AVVANNINGSBEHOV VED SLUTTØRNING

Det er i løpet av 2009 gjennomført en rekke tørkeforsøk i pilotskala med torsk og sei av forskjellig størrelse under ulike og stabile tørkebetingelser [2]. Som et utgangspunkt for beregning av anlegg er det tatt utgangspunkt i disse målingene som viser at etter 1–1 ½ døgn med tørking er vanntapet lavt og nær lineært avtagende. Tidspunktet før den lineære avfuktingen inntreffer er noe avhengig av foregående tørking, og det er også ved disse målingene dokumentert variasjoner mellom enkeltfisker. Figur 6 viser to måleserier med stort antall torsk med lik innledende tørking i ett døgn og påfølgende sluttørking ved lav (30 %) og høy relativ høy (60 %) fuktighet. For begge forsøkene er sluttørkingen omtrent den samme og er i den aktuelle perioden mellom 1-2 g/time per kg innlagt saltfisk. Det er totalt gjennomført 13 tørkeserier med torsk og sei som alle viser en hastighet i avdampingen i samme størrelse sluttørking. Ingen av forsøkene synes å vise betydelige forskjeller i avdampingen med relativ fuktighet i luften fra 30 % til over 60 % RH, ved ca. 75 % fikk en som ventet ingen tørking siden dette tilsvarer likevekt med saltfisk.



**Figur 6.** Tørkeforsøk med simulert ettertørking. Hovedtørking i 1. døgn ved 22 °C og 40 % RH. Ettertørking ved: A: 15 °C og 30 % RH. B: 15 °C og 60 % RH

Det er viktig å merke seg at tørkeforsøkene er utført i en godt kontrollert tørke hvor fuktigheten over fisken holdes konstant hele tiden. I en stor tørketunnel vil relativ fuktighet variere med tiden

og tiden før tørkehastigheten flater ut og blir nær konstant, vil avhenge av tørketype og tørkekapasitet på anlegget. Likevel viser målinger på en tverrblåst tunnel (Figur 5) at vannstrømmen fra tørkingen faller raskt og er allerede etter ett døgn relativt konstant.

*Ut fra alle målingene i prosjektet og tidligere tørkedata er tørkehastigheten ved avsluttende tørking i området 1-2 g/time per kg saltfisk (startvekt). Dette vil derfor være et rimelig utgangspunkt for dimensjonering av avvanningsanlegg for denne type anlegg.*

## **2.4 ENERGIEFFEKTIV SLUTTØRKing**

I første fase av tørkeperioden (hovedtørkingen) vil energikostnaden være avhengig av tørketemperaturen og fuktinnhold. I sluttørkingen er derimot tørkehastigheten mindre avhengig av relativ fuktighet, men det er viktig at man holder temperaturen stabilt høyt siden fisken allerede er ”varm”. Hvor høyt man bør holde luftfuktigheten vil også være et praktisk/økonomisk spørsmål ut fra hvordan rommet for sluttørking blir utformet og hvilke krav til luftsirkulasjon man forutsetter. Det bør forutsettes en fuktighet på 60–70 % i tørkeluften er maksimum, selv om det fortsatt noe uavklart om hvor høyt man kan gå i fuktighet før man reduserer hastigheten i sluttørkingen. Som for hovedtørkingen er høyest mulig temperatur ønskelig for å oppnå en effektiv produksjon og energimessig gunstig ettertørking.

## **2.5 SYSTEMLØSNINGER FOR SLUTTØRKing**

Uavhengig av anleggenes tørker vil en økning av kapasiteten ved disse kunne økes ved at fisken i siste del av tørkingen overføres til ettertørking i et anlegg hvor avvanningskapasiteten er tilpasset den lave tørkehastigheten. Med de store forskjeller en registrerer mellom tørkeanleggene, både når det gjelder tørketyper, kapasiteter og bruk av utstyret må ettertørkeløsningen tilpasses tørkene og driftsrutiner. Ut fra målinger og registreringer de siste år tyder det imidlertid på at overføring til ettertørking vil avhenge av tørketyper som benyttes og at utnyttelsen kan generelt bedres ved:

### ***Hordetørker***

Tørkeeffektiviteten er svært avhengig av værforholdene og ved bruk i perioder med gunstig uteklima kan også kapasiteten økes ved disse med å ta ut fisk til ettertørking og derved øke andel saltfisk slik at en oppnår høyere fuktighet på avluft. Det er også viktig at det benyttes måleutstyr og styring av omluften avhengig av uteluftens tilstand slik at avluften har høyt vanninnhold.

### ***Langblåste tørker***

Redusert falskluft og bedre utnyttelse av sirkulert vil for de fleste tørker kreve mer fuktig og nyinnlagt fisk i tørkene. Generelt sett synes en økning av mengden fisk innsatt og til ettertørking ligge mellom 1/3 – 2/3 være mulig og gi betydelig bedret kapasitet og energieffektivitet.

### ***Tverrblåste tørker***

Målinger på flere anlegg viser at allerede etter ca. 1 døgn er avvanningskapasiteten mye større enn tørkingen og en får lav luftfuktighet og høyt energiforbruk pr. kg fisk. Å stoppe anlegget for å ta ut all fisk er trolig urealistisk og redusert luftstrøm og nedregulering av luftstrøm og anleggets aggregater er trolig en løsning. Dette vil kreve ombygging av disse, fortrinnsvis til langblåste tunneler.



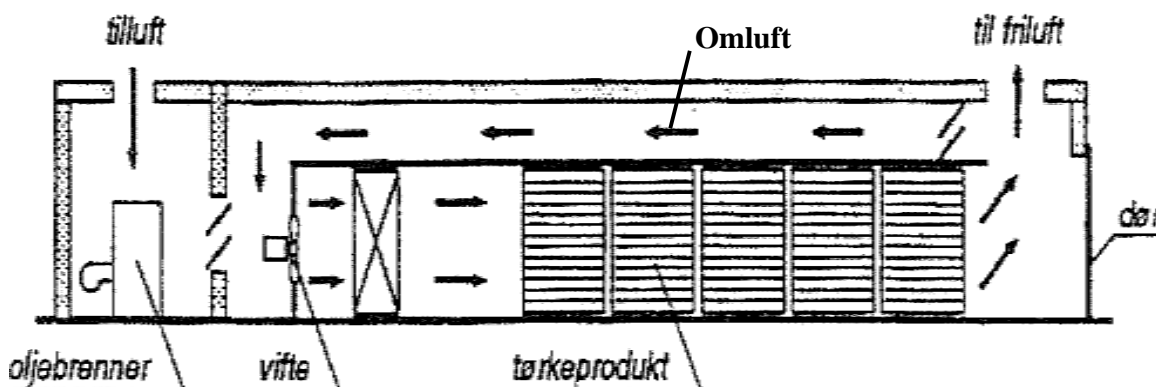
### 2.5.1 Utnyttelse av kondensatorvarmen for sluttørking

Under lufttørking er energiinnholdet i luften konstant gjennom tunnelen fordi energimengden som overføres til fisken som varme, er lik energimengden som avgis fra fisken som damp. Nedkjøling/kondensering av luften i varmepumpen vil derfor også kreve samme energimengde som oppvarmingen av luften igjen. Energien til "løfting" av varmen fra kjøler til kondensator (gjennom kompressoren), samt vifteenergien blir da overskudd og må fjernes (bortsett fra energibehovet for oppvarming av kald innsatt fisk). Ved de fleste produksjonsanleggene som er undersøkt blir denne energimengden dumpet til uteluft via en kondensator. Uten ekstra energikostnad kan denne energien nyttes til oppvarming av uteluft til tørkeformål, på tilsvarende måte som ved de tradisjonelle hordetørker.

Anlegg og arrangement for sluttørking må tilpasses hvert enkelt eksisterende anlegg. For å vise energipotensialet med å gå over til denne metoden, er data fra én av de undersøkte tørkene benyttet til overslag over kapasiteter:

Tunnelen har 3 x 18 vogner á ca. 350 kg saltfisk og energiforbruk til kompressor og vifter totalt ca. 40 kW. Selv med ca. 50 % falskluft som bidro lite til tørkingen, var luftfuktighet til fordampner 64 % og energiforbruket ca. 130 kWh/tonn klippfisk. Ved å redusere falskluft i denne tunnelen vil utgående fuktighet stige til et lavt anslag på 70 % RH. Dette vil etter overslagsberegning gi ca. 25 % økt avvanning, og man oppnår et energibruk på under 100 kWh/tonn klippfisk. Ved å ta ut fisk med tørrsjikt fra tunnelen, vil man oppnå en økning tørkekapasitet på i størrelsesorden på 20-40 %.

Siden tørkehastigheten ved sluttørkingen er mindre avhengig av lufthastighet og fuktighet, er utformingen av selve rommet til sluttørking mindre kritisk. Likevel kreves arrangement slik at luftstrøm og fuktighet kan styres, og kontroll av fiskens tørrhet på vognene må gjennomføres (bl.a. bør først inn - først ut prinsippet praktiseres). Et utgangspunkt til sluttørkingsanlegg kan, om forholdene tillater det, være den tradisjonelle hordetørka (Figur7), men uten behov for så lang luftvei over fisken. Behovet for luftmengder er også mindre, og oppvarmingen kan være direkte i tilluften så arrangementet vil bli enklere.



*Figur 7. Snittskisse av tradisjonell hordetørke. Tilluft og omluft styres av spjeld.*

## 2.5.2 Sluttørking med uteluft

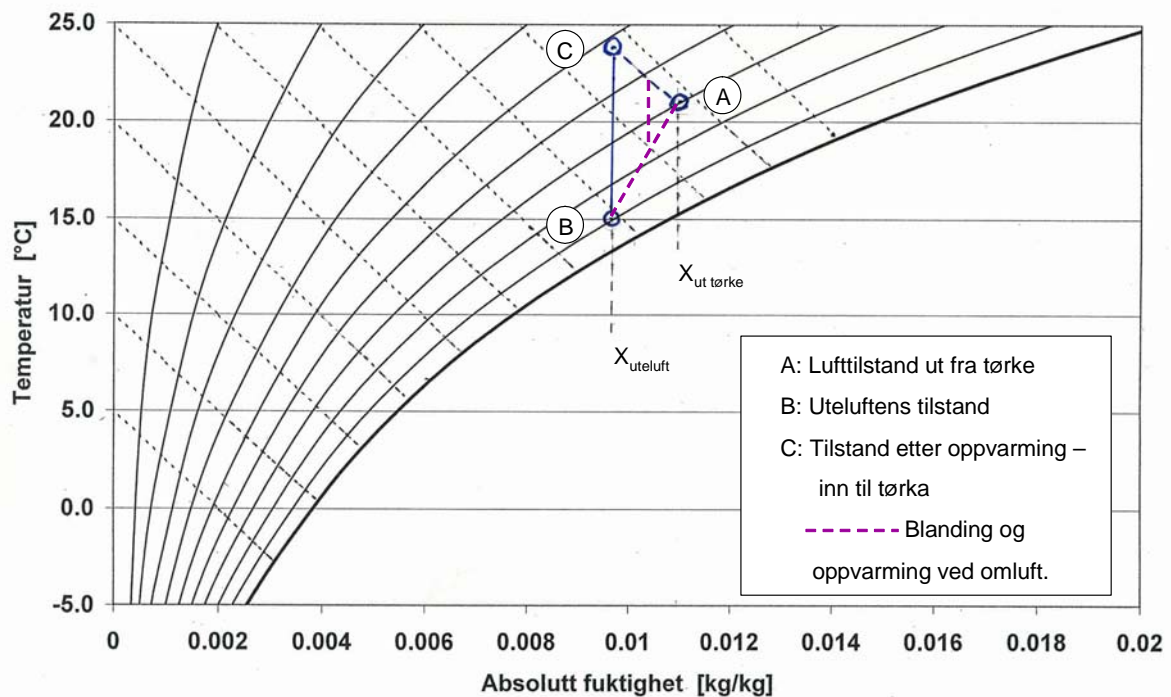
For å få ønsket luftfuktighet under sluttørkingen må fuktig romluft byttes ut med uteluft med lavere absolutt fuktighet. For en gitt vannmengde som avdamper under sluttørkingen (beregnet fra tørkeforsøk) vil nødvendig friskluft tilførsel (Figur 8) kunne bestemmes fra:

$$M_{FL} = (x_{ut\ tørke} - x_{uteluft}) \cdot L_{ut - inn} = \Delta x_{u-i} \cdot L_{ut - inn} \quad [\text{kg vann/time}]$$

For at den tilførte uteluften skal kunne blandes med omluften som gjenbrukes i tørken, samt at tilstanden denne opprettholdes, må luften oppvarmes til samme energiinnhold som utgående luft som finnes fra  $h - x$  diagrammet:

$$Q_{oppv.} = (h_C - h_B) \cdot M_{FL} = \Delta h_{C-B} \cdot M_F \quad [\text{kW}]$$

Forutsetningen for å kunne utnytte uteluft til tørking er at luftens vanninnhold er lavere enn ønsket fuktighet i tørkeluften (Figur 8). Med avtagende fuktighet i uteluften, og konstant temperatur reduseres behovet for inntak av uteluft omtrent lineært. Fra Figur 8 kan man finne at man samtidig øker energibehovet ( $\Delta h_{C-B}$ ) pr kg luft, men denne økningen er mindre enn i luftbehovet (eller økningen i  $\Delta x_{u-i}$ ).



**Figur 8.** Sluttørkeprosessen vist skjematisk i  $h - x$  diagrammet for fuktig luft.

### 2.5.3 Beregningsmetodikk - eksempel

Siden effekten av å benytte uteluft til sluttørking ikke er lett å se fra diagrammet (Figur 8), vises denne også med beregninger. Man tar fortsatt utgangspunkt i tidligere vist tørkeanlegg hvor man har gode målinger av forholdene. Anlegget har som nevnt 3 x 18 vogner som med middels stor fisk pålegges ca. 350 kg saltfisk. Om man forutsetter at man tar ut 1/3 av total kapasitet til sluttørking utgjør dette  $18 \times 350 = 6300$  kg pålagt fisk. Ut fra målinger av tørkehastighet for klippfisk har man vist at det er forskjeller i avvanningen under sluttørkingen på mellom 1-2 g/time mellom fiskeslag, størrelse, skjæring, saltmodning, mv. Som et utgangspunkt er det benyttet midlere verdi på 1,5 g/time per kg innlagt saltfisk. Dette vil da kreve et avvanningsbehov i størrelsesorden:

$$\text{Vanntap: } M_{FL} = 1,5 \cdot 6300 = 9450 \text{ g vann/time eller ca. } 9,5 \text{ kg vann/time.}$$

Dette synes rimelig sammenlignet med målt avvanning i den nevnte tørketunnelen på ca. 54 kg/time. 20 % av belastningen er flyttet fra tunnelen til sluttørken, og mengden fisk i tunnelen er økt med 33 % uten at energiforbruket er økt.

### 2.5.4 Energibehov for å varm uteluft

De fleste produksjonsanleggene ligger ved kysten, og middeltemperaturene i Trøndelag og Møre og Romsdal varierer i stort sett mellom 2-18 °C (Figur 9) og en vanlig temperatur vil være rundt 10 °C noe som er utgangspunktet i videre beregninger. Videre er det forutsatt at tørkeluften ut fra fisken under sluttørking skal ha en temperatur på 22 °C og 70 % relativ fuktighet

Ut fra Figur 8 får man energi i luften ut fra sluttørkingen:

$$x_{\text{ut tørke}} = 0,0116 \text{ kg vann/kg luft og } h_A = 51,5 \text{ kJ/kg luft.}$$

Ved vanlig utelufttemperatur på 10 °C og ugunstig vær med fuktighet på 90 % er energiinnholdet i uteluften på:

$$x_{\text{uteluf}} = 0,0069 \text{ kg/kg luft og } h_B = 27,3 \text{ kJ/kg luft.}$$

Nødvendig friskluft blir da:

$$M_{FL} = 9,5 = (x_{\text{ut tørke}} - x_{\text{uteluft}}) \cdot L_{\text{ut - inn}} = (0,0116 - 0,0069) \text{ som gir:}$$

$$L_{\text{ut - inn}} = 2\,021 \text{ kg/time} = 0,56 \text{ kg/s}$$

Nødvendig oppvarming av uteluften blir:

$$Q_{\text{oppv.}} = (h_C - h_B) \cdot M_{FL} = (51,5 - 27,3) \cdot 0,56 = 13,6 \text{ kW}$$

Dette utgjør bare 34 % av tilgjengelig kondensatorvarme som med antatte lufttilstander kan fjerne ca. 28 kg vann/time (eller i størrelsesorden 50 % av det den installerte tørken klarte opprinnelig).

Ved ugunstige værforhold for tørking: 15 °C og 90 % fuktighet blir:

$$M_{FL} = 9,5 = (0,0116 - 0,00964) \cdot L_{\text{ut - inn}} \text{ som gir:}$$

$$L_{\text{ut - inn}} = 4318 \text{ kg luft/time} = 1,2 \text{ kg/s}$$

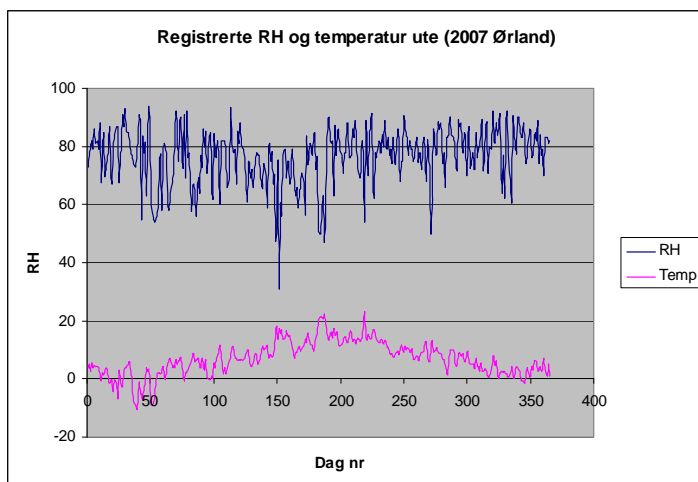
Oppvarmingsbehovet for uteluften i dette tilfellet blir:

$$Q_{oppv.} = (51,5 - 39,4) \cdot 1,2 = 14,3 \text{ kW}$$

Dette er bare en liten økning i forhold til ved 10 °C siden energibehovet pr kg luft øker bare litt mindre enn behovet for luftutvekslingen øker.

### 2.5.5 Begrensninger i bruk av uteluft

De energimessige begrensningene for sluttørkingen er når temperaturen ute nærmer seg tørketemperaturen og luftfuktigheten er høy. Ut fra h – x diagrammet (Figur 8) ser man at ved omkring 17 °C og 90 % fuktighet er vannmengden i lufta ute og inne lik og uteluften gir ikke lenger tørkepotensial og kan ikke nytte uten at tørketemperaturen økes. Man nærmer seg da nært temperaturen på 26 °C for brenning av skinn. Figur 9 viser temperaturforløpet og relativ fuktighet på Ørland gjennom ett år. Man ser ut fra denne at periodene man vil få problemer med sluttørking med bruk av uteluft er svært begrenset.



**Figur 9:** Temperatur og relativ fuktighet i uteluften på Ørland gjennom året 2007.

Selv om det her er vist eksempel på å benytte en hordetørke til sluttørking, kan dette gjøres enklere ved å benytte et ordinært lagerrom ved å ta inn uteluft som varmes opp over en kondensator inne i rommet mens avluften går ut gjennom ventiler. Så lenge en bruker uteluft vil beregning av luftmengder og energibehov være det samme som for hordetørken. For alle typer anlegg som utnytter uteluft som vil luftmengden variere ut fra fuktighet, temperatur og ønsket klima i rommet. Det er da enklere å utnytte hele overskuddet av energi fra kondensatoren til tørking ved å overføre fisk fra hovedtørkingen tidligere og derved få en totalløsning som vil gi øket kapasitet og lavt energiforbruk.

**REFERANSER:**

- [1] I. C. Clausen, Ola. M. Magnussen; Optimal Klippfisktørring. SINTEF Energiforskning AS, Teknisk rapport TR A6770, 2008-12-02.
- [2] E. Indergård, et. al., Teknisk rapport TR Axxxx ”Tørkeluftens påvirkning på tørkehastighet av klippfisk”, SINTEF Energiforskning AS, (Under utarbeidelse)