

■ www.energy.sintef.no ■

**SINTEF Energiforskning AS**

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

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Energibruk i klippfisk industrien

SAKSBEARBEIDER(E)

Ola Magnussen og Tom Ståle Nordtvedt

OPPDRAGSGIVER(E)

FHL

TR NR.	DATO	OPPDRAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR.
TRA6285	2006-01-06	Frank Jakobsen	16X568
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.)	GRADERING
060106tsn124852		Tom Ståle Nordtvedt	Åpen
ISBN NR.	RAPPORTTYPE	FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.)	OPPLAG SIDER
82-594-2995-0		Inge Gran <i>Inge R. Gran</i>	6 19
AVDELING	BESØKSADRESSE		LOKAL TELEFAKS
Energiprosesser	Kolbjørn Hejes vei 1D		73 59 39 50

RESULTAT (sammendrag)

Klippfisk er saltet, saltmodnet fiskeprodukter tørket til et vanninnhold vanligvis mellom 43 og 47 % og som derved har en spesiell smak, konsistens, mv. og svært god holdbarhet. Tørkingen foregår i dag alt vesentlig i tunneler hvor tørr luft blåses over produktene. For å sikre effektiv tørking og jevn produksjon uavhengig av klimatiske forhold benyttes i dag varmpumper og energibruken er i hovedsak for drift av kompressorer og vifter for luftsirkulasjon.

For forståelse av tørkeanleggenes effektivitet og energibruk er kunnskap om luft, luftfuktighet og energiforhold i vanddamp – luftblandinger (fuktig luft) viktig. Kunnskap om og bruk av diagram (Mollier diagram) er viktig hjelpemiddel for synliggjøring av prosessene og spesielt oppfukning av luft i tørka. Sammen med målinger av temperaturer og fuktighet er dette viktig for bedre styring og drift av anleggene.

For energieffektiviteten i tørkene er det avgjørende at tørkelufta utnyttes ved at den blir mest mulig oppfukta etter tørkeseksjonen. For klippfisktørking er dette spesielt utfordrende siden saltingen gjør at væskas damptrykk maksimalt tilsvarer 76 % relativ fuktighet. Arrangement, dimensjonering og bruk av tunnelene er at avgjørende for å oppnå energieffektiv tørking. Overslagsberegning viser at en langblåst tunnel og vanlig halvkontinuerlig uttak og innsetning av vogner vil kunne oppnå et anslått energiforbruk (dh/dx) på ca. 6 900 kJ/kg vann fjernet. Ved bruk av en rimelig effektiv varmpumpe vil effektfaktor på ca. 3,8 (ved temperaturer 2 °C/30 °C) er beregnet energibruk ca. 0,59 kWh/kg vann eller (SMER – forhold) på ca. 1,7 kg vann pr kWh tilført energi. Med vanninnhold i saltet vare på 55 % og klippfisk med 45 % vann vil dette tilsvare 0,13 kWh pr kg klippfisk

I samarbeide med prosjektet "Fremtidens klippfiskbedrift" gjennomført omfattende målinger på 3 klippfiskanlegg/tørker, to tilnærmet langblåst "langblåst" og en "tverrblåst". For alle tørkene er SMER verdiene betydelig lavere enn beregnet for en rimelig god tørke. Dette skyldes i hovedsak for dårlig styring av luftstrømmen som gir høyt energibruk for vifter og for korte tunneler og lav oppfukning. Spesielt dårlig er den tverrblåste batch –tunnel med stort energiforbruk til vifter og liten oppfukning i det meste av tørketiden.

STIKKORD

EGENVALGTE	Klippfisk	
	Energibruk	

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1	INTRODUKSJON..... 3
2	FUKTIG LUFT 4
2.1	FUKTIG LUFT DIAGRAM 6
3	TØRKING I TUNNELER..... 8
3.1	TØRKING MED FORVARMET LUFT ("HORDETØRKER")..... 8
3.2	TØRKING MED KONTROLLERT TØRKELUFT VED VARMEPUMPE..... 9
3.3	ENERGIEFFEKTIVITET OG DRIFT AV TØRKEANLEGGET..... 11
3.4	ENERGIBRUK MED VARMEPUMPESYSTEM..... 13
4	ENERGIVIRKNINGSGRAD VED TØRKING; SMER-FORHOLDET..... 14
5	MÅLINGER AV ENERGIBRUK VED ANLEGG..... 16

1 INTRODUKSJON

Denne rapporten er en del av prosjektet Fremtidens Enøk bedrift i fiskeindustrien.

Tørking og salting er konserveringsmetoder benyttet så langt tilbake i historien som vi kjenner til. Begge metoder gir langtidsstabile produkter, men har begrenset holdbarhet avhengig av forholdene. Tørket fisk påvirkes lett av høy fuktighet eller vann som absorberes og med øket vanninnhold og høy temperatur reduseres eller ødelegges tørket fisk raskt av sopp og mugg. Saltet fisk er usatt for angrep av salttolerante bakterier mv. ved omgivelsestemperaturer. En prosess hvor fisk saltes og saltmodnes og derpå tørkes til et vanninnhold på 40 - 45 % gir derfor et produkt med spesielt god holdbarhet samt gode egenskaper som råstoff til en rekke matretter. Teknikken kommer fra portugisisk/spansk havfiske hvor fisken måtte konserveres ved salting om bord og tørking etter landing for å øke holdbarheten. I Norge har salting og tørking av fisk vært og er fortsatt et svært viktig produkt for eksport. Med økende konkurranse på markedene er det et stort behov for bedret kvalitet, øket produksjonseffektivitet og reduserte kostnader. Med de betydelige energikostnader med tørking i tunneler vil teknologi, prosesser og drift være svært viktig for kvalitet og total økonomien.

2 FUKTIG LUFT

Ved arbeide med tørking er det viktig å ha kunnskap om hvordan egenskapene til luft varierer med fuktighetsinnhold, temperatur og trykk. I de aller fleste tilfeller innen tørking anvendes luft som medium for både tilførsel av varme til materialet som tørkes og til transport av vann som damper av fra det materialet. Andre gasser som nitrogen, karbondioksid og overhettete damp kan også benyttes.

Fuktig luft er en blanding av tørr luft og overhettete vanndamp. Både luften og vanndampen kan ved aktuelle betingelser regnes som ideelle gasser. Daltons lov for ideelle gassblandinger sier at hver gass kan behandles som om den eksisterte alene ved sitt deltrykk og ved blandingens temperatur og volum. Hvis vanndampens deltrykk og blandingens temperatur er kjent, kan de termodynamiske egenskapene til vanndampen i blandingen finnes fra tabeller, diagrammer eller formler. Ved at en betrakter fuktig luft som en ideell gass, vil trykket ikke ha noen betydning for størrelser som entalpi og spesifikk varmekapasitet.

Egenskapene for fuktig luft er vanlig å oppgi pr. kg tørr luft. Dette er å foretrekke på grunn av at mengden fuktig luft gjennom en tørkeprosess forandrer seg som funksjon av hvor mye vann luften inneholder, mens mengden tørr luft typisk er konstant. Viktige parametere ved tørking i fuktig luft er:

Absolutt fuktighet (X) er definert som forholdet mellom antall kg vanndamp (= M_v) og antall kg tørr luft (= M_l).

$$X = \frac{M_v}{M_l} \left[\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg tørrluft}} \right] \quad [1]$$

Den absolutte fuktigheten kan uttrykkes ved hjelp av deltrykket til vanndampen og blandingens totaltrykk. Ved bruk av den ideelle gassloven og innsetting av verdiene for molekylvekt for vanndamp og luft kan en få følgende uttrykk for sammenhengen mellom absolutt fuktighet, totaltrykk og vanndamptrykket:

$$X = 0.622 \frac{P_v}{P_{TOT} - P_v} \quad [2]$$

Mettet absolutt fuktighet er definert som det maksimale fuktighetsinnholdet som fuktig luft kan inneholde ved en spesifikk temperatur og et spesifikt totaltrykk, og kan skrives slik:

$$X_{sat} = 0.622 \frac{P_{v,sat}}{P_{TOT} - P_{v,sat}} \quad [3]$$

hvor $v_{,sat}$ er metningstrykket til vann ved temperaturen til den fuktige luften.

Forholdet mellom absolutt fuktighet og mettet absolutt fuktighet (X/X_{sat}), kalles for *metningsgraden*, og denne størrelsen gir informasjon om hvor fuktet luften er i forhold til det

maksimale vanninnholdet i luften ved en spesifisert tilstand. En annen og mer vanlig måte å angi graden av fuktighet på er såkalt *relativ fuktighet* (ϕ). Denne størrelsen er definert som forholdet mellom det aktuelle partialtrykket til vanndampen i luften og metningstrykket til vanndamp ved den fuktige luftens temperatur. Dette kan uttrykkes slik:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad [4]$$

Sammenhengen mellom absolutt og relativ fuktighet er:

$$X = 0.622 \frac{\phi \cdot P_{v,sat}}{P_{TOT} - \phi \cdot P_{v,sat}} \quad [5]$$

Duggpunktet ("dew point") for fuktig luft er definert som den temperaturen hvor fuktige luft ved et gitt trykk og fuktighetsinnhold er mettet på vanndamp. Hvis temperaturen senkes under duggpunktet så vil noe av vanndampen kondensere fra den fuktige luften. Duggpunktstemperaturen fås ved å finne partialtrykket til vanndampen i den fuktige luften, og deretter å finne metningstemperaturen for vanndamp ved dette trykket.

Spesifikk varmekapasitet (c_p) er den varmemengden som skal til for å øke temperaturen til 1 kg tørr luft pluss vanndampen som er tilstede med 1 K eller 1 °C. Spesifikk varmekapasitet er definert som:

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad [6]$$

Imidlertid benyttes ofte spesifikk varmekapasitet i strid med denne definisjonen ved at for eksempel varmen som tilføres en strøm regnes ut som spesifikk varmekapasitet multiplisert med en endelig temperaturdifferanse. I dette tilfellet benyttes derfor følgende definisjon av spesifikk varmekapasitet:

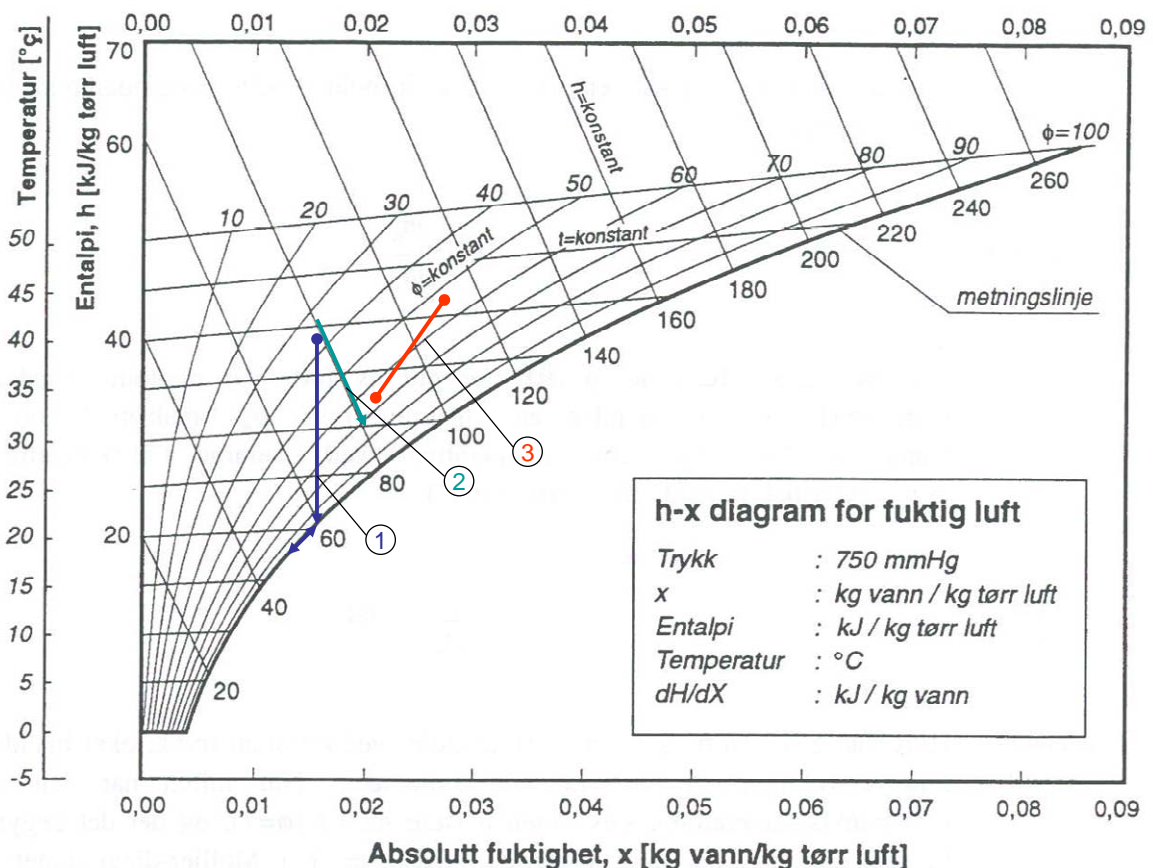
$$c_p \equiv \frac{h_1 - h_0}{t_1 - t_0} \quad [7]$$

Definisjonene gitt i Ligning 9 kan man kalle en *lokal* spesifikk varmekapasitet, mens definisjonen i Ligning 10 kan kalles en *global* spesifikk varmekapasitet.

2.1 FUKTIG LUFT DIAGRAM

Det mest vanlige diagrammet for fuktig luft er det såkalte *Mollier*-diagrammet (se Figur 1). Fordi verdien av fordampningsvarmen er stor i forhold til varmekapasiteten, gjorde den tyske professor Mollier et kunstgrep med diagrammet slik at linjene for konstant entalpi løper på skrå. Det området som interesserer blir dermed større.

Langs den venstre randskalaen i figur 1 er temperatur ($^{\circ}\text{C}$) fremstilt. Linjene for konstant temperatur går på skrå oppover til høyre til de treffer en buet linje som starter ned til venstre i diagrammet. Denne buede linjen er metningslinjen hvor luftens relative fuktighet er lik 100 %. Fra venstre og på skrå ned mot høyre går linjer for konstant entalpi. Langs den horisontale akse har en absolutt fuktighet X . Figur 1 viser diagrammets form og linjer for konstant temperatur, entalpi og relativ fuktighet.



Figur 1. Mollierdigram for fuktig luft i aktuelt tørkeområde for klippfisk. 1: Kjøling av umettet luft. 2: "Tørkelinje" mot våtkuletemperatur. 3: Blandingslinje for to umetta luftmasser

I Figur 1 er også inntegnet noen tilstandsendringer for fuktig luft som er viktig for tørking.

1. Ved kjøling av umettet luft vil temperaturen senkes ved konstant fuktinnhold. Prosessen vil i diagrammet følge $x = \text{konstant}$ linja til metningslinja. Dette skjæringspunkt benevnes "duggpunktet" siden videre kjøling vil kondensere vanndamp. Videre kjøling vil gi utfelling og ved likevekt vil prosessen følge $\phi = 100\%$. Ved "tørr" (uten vanntilsetning) oppvarming vil tilstanden tilsvarende følge en vertikal linje ($x = \text{konstant}$ linja).

2. Når en stor luftmengde stryker over et fuktig produkt med høyre vanndamptrykk vil, så lenge varmen til fordampingen tas fra luften, tilstanden for luften bevege seg langs $h =$ konstant. (vanlig antagelse ved tørking). En liten vannholdig masse utsatt for stor luftstrøm vil derfor anta en temperatur som er kurvens kryssing av linja $\phi = 100 \%$. (kalles vanligvis "våtkuletemperaturen" eller "kjølegrensen"). Dersom vannet eller det fuktige stoffet på forhånd er varmere enn luften, vil det kjøles av til det når kjølegrensen.
3. Ved blanding av to fuktig luft mengder vil slutttilstanden ligge på den rette linjen mellom de to utgangstilstandene. Punktet vil ligge i tyngdepunktet når en tenker seg de to luftmengdene plassert i utgangstilstandene.

For å finne tilstanden av fuktig luft kan en måle tørr- og våtkuletemperaturen. Luftens tilstand finnes ved å trekke en linje gjennom en temperaturlinje (våtkuletemperaturen) med retning som anvist av *våtkuleisotermene*. Skjæringspunktet med temperaturlinjen for tørrkuletemperaturen gir luftens tilstand

3 TØRKING I TUNNELER

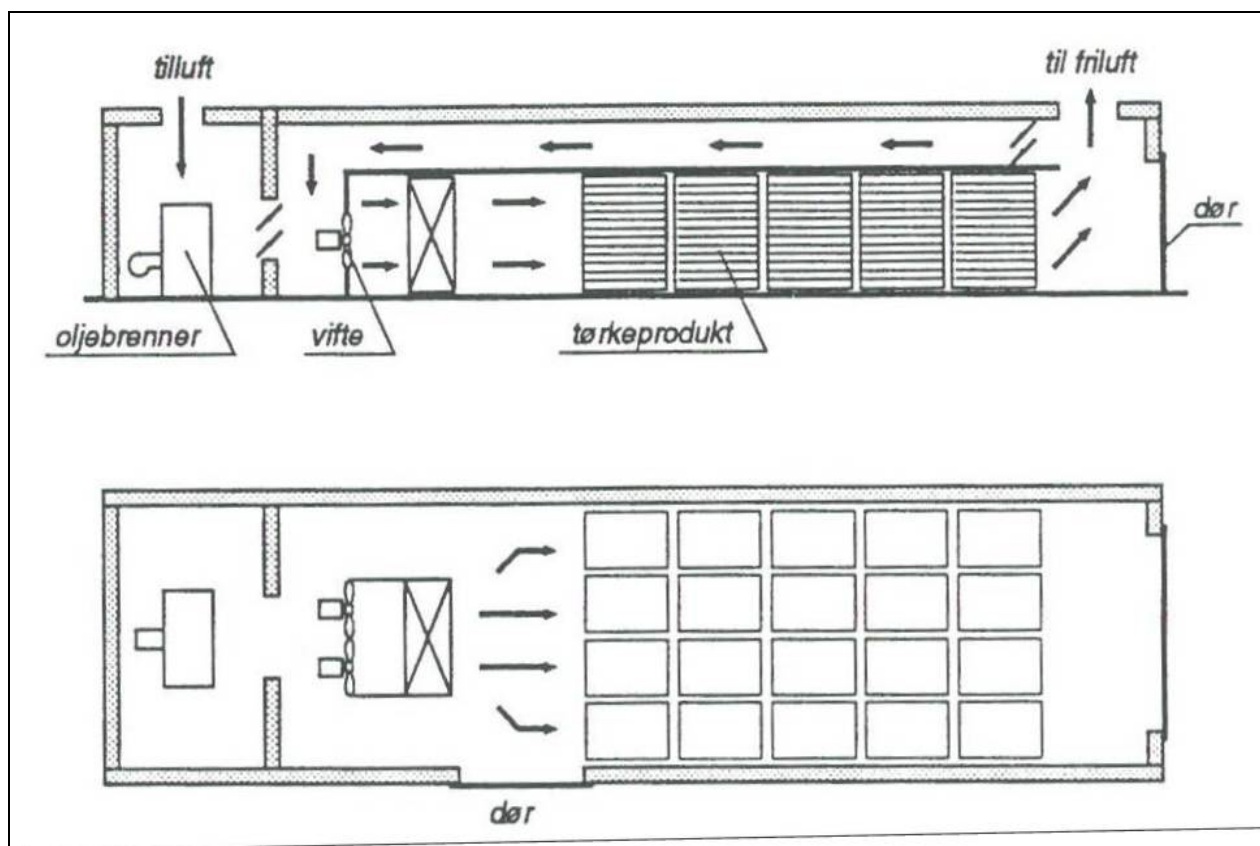
Den tradisjonelle klippfisktørring var svært arbeidskrevende av mange årsaker. For å få god tørring måtte hver enkelt fisk legges ut på rent berg eller fjæresteiner. Værforholdene måtte være riktig med tørr luft for å få tørring og lite sol for å unngå ”brenning” ved høy produkttemperatur. Hver kveld, og ofte på dagtid ved ugunstige tørkeforhold, måtte fisken legges sammen på treplatter og med ”hatter” (taklokk) over. Tidlig på 1900-tallet ble spesielt ettertørring innendørs tatt i bruk og etter hvert ble tørketunneler tatt i bruk. Tørring på berg og stein var imidlertid i bruk i større skala til tidlig på 1950-tallet.

3.1 TØRKING MED FORVARMET LUFT (”HORDETØRKER”).

Prinsippene og arrangementer for hordetørker er vist i for en relativt moderne utgave i figur 2. Fisken ble lagt på hyller eller brett i vognene og satt inn i tunnelene. Egnert lufttilstand (temperatur og fuktighet) skaffes ved å blande friskluft og returluft, som deretter oppvarmes til ønsket temperatur. Kritisk for å få rask tørring er uteluft tilstanden som må ha et vanddamptrykk lavere enn fiskens damptrykk ved tørketemperaturen. Oppvarmingen skjer ved hjelp av olje eller elektrisk strøm. Slike tørker finnes i flere generasjoner fra de helt enkle, hvor all regulering skjer manuelt, til de mer avanserte hvor returluftmengde og varmetilførsel reguleres automatisk etter ønsket lufttilstand.

Ved de enkleste tørkene ble all fisk stuert inn i tunnelen og anlegget startet. Fisken har da fuktig overflate og en får rask tørring og oppfuktning av luften når den strømmer innover i tunnelen. *Siden vannet i fisken er saltmettet reduseres vanddamptrykket (vanddampaktiviteten) over fiskevæska tilsvarende ca. 76 % av rent vann. Kurva for 76 % kan derfor anses som saltfiskens metningstrykk) og ved tilstrekkelig stor flate/lang tunnel vil tørkelufta ta opp fuktighet til den når relativ fuktighet nær 76 %.*

Etter at overflatevannet er fjernet vil tørkehastigheten avta på grunn av vanntransportmotstand i varen og varmestrøm innover. Derved avtar vannopptaket i lufta og ved samme tørkeflate vil luftfuktigheten ved utløp avta og dermed også utnyttelsen av tilført varme. For å unngå dette resirkuleres ofte luft tilbake til innløpet, men dette vil igjen redusere tørkepotensialet og øke tørketiden. Etter hvert har en funnet fram til en mer kontinuerlig prosess med vogner med fuktige produkt som settes inn ved luftutløp og så beveges periodisk gjennom tunnelen i motsatt retning av tørkelufta. Fordelen med dett er at den stadig mer fuktige luft møter mer lett tørkelige varer og en opprettholder vanddamptrykk differansen og oppfuktningen mer jevnt over perioden.

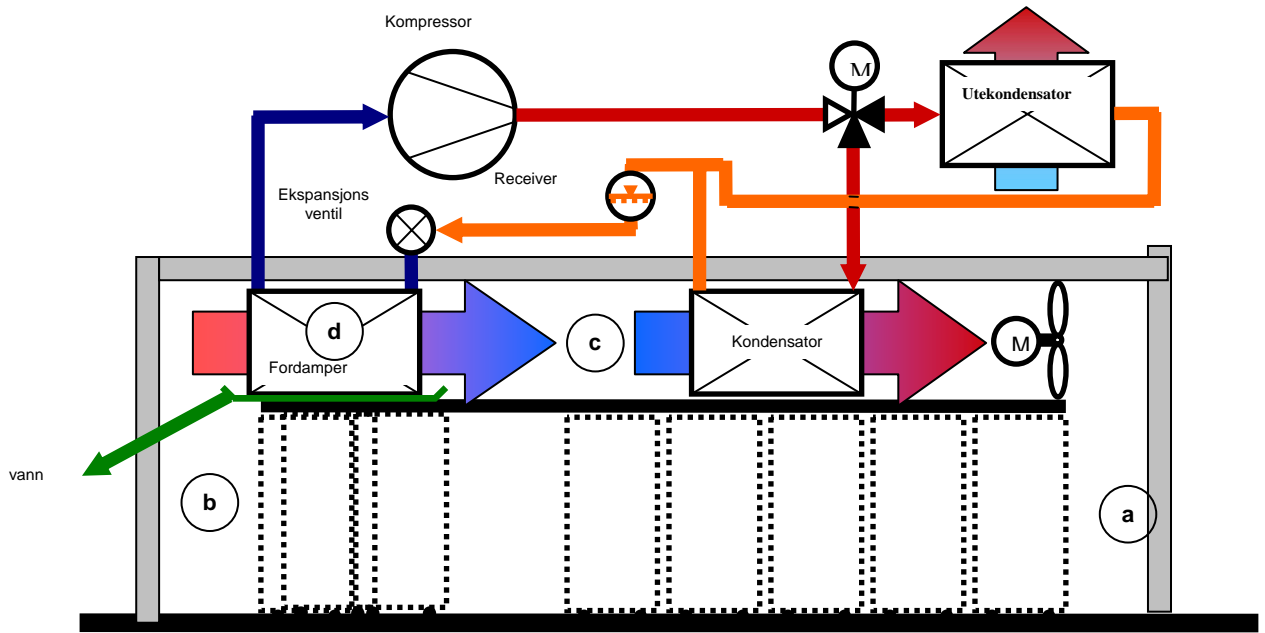


Figur 2. Prinsipiell skisse av "hordetørke" og resirkulering av tørkelufta.

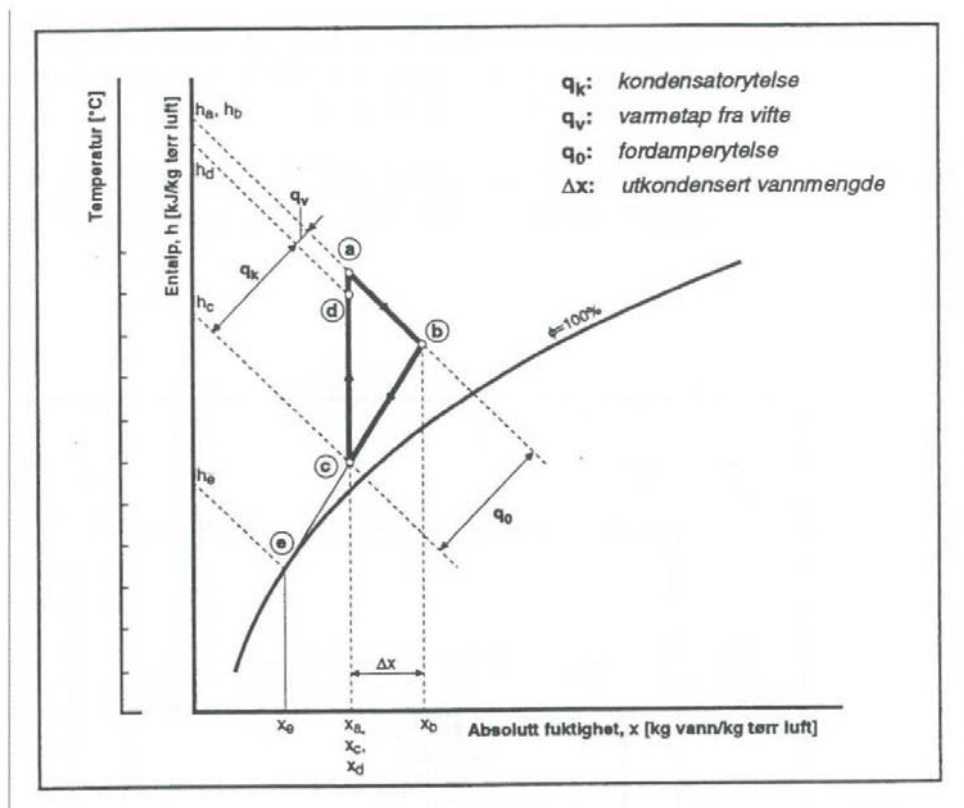
3.2 TØRKING MED KONTROLLERT TØRKELUFT VED VARMEPUMPE

Etter hvert som både arbeidskraft, energi og råstoff ble dyrere, ble det viktig å forbedre produksjonsteknologien. Særlig ble det viktig å finne energibesparende metoder, og spørsmål om optimal kjøreplan, økonomi og kvalitet sto sentralt. Forskningsmiljøet innen kulde- og varmepumpeteknologi og industribedrifter tok på slutten av 1970 tallet arbeidet med å fastlegge optimale tørkebetingelse, dimensjonering og arrangement av varmepumpetørker. Dette resulterte i oppbygging av en rekke slike tørker på 80-tallet og dette er i dag den mest vanlige teknologi for klippfisketørker.

Varmepumpetørkene (figur 3) baserer seg i hovedsak på det samme tunnelsystemet som "hordetørken", men med full resirkulering av all tørkeluft. I stedet for å slippe ut energien i den fuktige lufta overføres energien til varmepumpa ved at lufta kjøles, tilført vanndamp kondenseres og fjernes som vann fra fordampere. (Tilsvarende at varm fuktig utluft i naturen stiger til høyere og kaldere luftlag, vann kondenseres og kommer ned som regn) Den kalde lufta med lite fuktighet varmes derpå opp igjen uten fukttilførsel og relativ fuktighet avtar (se figur 1 og endringer lufttilstandene i Mollierdiagrammet). Forutsatt små varmetap vil vifte- og kompressorenergien gi systemet noe energioverskudd som fjernes ved en hjelpekondensator.



Figur 3. Klippfisktørke med varmepumpe for kontroll av temperatur og fuktighet



Figur 4. Tørkeprosessen ved bruk av varmepumpe vist i Mollierdiagram

Mollierdiagrammet er godt egnet til fremstilling av prosessen og beregninger og er vist i figur 4. Luft som gjennom fordamperen blir kjølt til a blandes med utløpsluft til punkt c og fjernet vann (ΔX) og fjernet energi; $q_0 = h_a - h_c$ kan finnes i diagrammet.

Varmepumpen avfukter tørkeluften etter at den har tatt opp vann fra produktet, og temperaturen justeres til ønsket nivå. Den varme, fuktige luften føres først forbi varmpumpens fordamper hvor den avkjøles. Ettersom luftens evne til å holde på fuktighet avtar med temperaturen, felles det ut vann på fordamperoverflaten. Med andre ord avtar luftens absolutte luftfuktighet (absolutt fuktighet $x = \text{kg vann pr. kg tørr luft}$). Den tørre, avkjølte luften blåses til slutt over kondensatoren, og varmes opp til ønsket temperatur før den blåses på ny inn i tørkekammeret.

3.3 ENERGIEFFEKTIVITET OG DRIFT AV TØRKEANLEGGET.

En viktig størrelse ved all luftbehandling er forholdet mellom endring av energiinnhold (dh) og endring av fuktighet (dx). For tørkeprosessen vist i Figur 10 ser vi at følgende kan utledes:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_b - h_c}{x_b - x_c} = \frac{q_0}{\Delta x} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgvann}} \right] \quad [8]$$

Ved fremstilling av tørkeprosessen i Mollierdiagrammet vil *vinkelen mellom avfuktingslinje b – c med x – akse angir energieffektiviteten* i avvanningen. Ved å tegne inn tørkeprosesser ved forskjellig tørketemperatur i det samme h-x-diagrammet (eksempelvis i Figur 1), vil en se at dh/dx -forholdet øker med avtagende tørketemperatur. Det betyr at det må brukes mer energi for å tørke ved lave temperaturer enn ved høye temperaturer. Når tørketemperaturen nærmer seg 0 °C og lavere, stiger dette forholdet spesielt hurtig.

Dersom luftens relative fuktighet ut av tørkekammeret avtar, øker dh/dx -forholdet (Figur 4). Det er altså om å gjøre å oppnå best mulig oppfukning av tørkeluften tørkekammeret (høyest mulig luftfuktighet ut av tørkekammeret). I de tilfellene hvor det trengs særlig lav luftfuktighet ved tørkekammerets innløp vil energiforbruket pr. kg fjernet vann øke om en kun tenker på forholdet dh/dx . Konklusjonen blir her at også luftfuktigheten ved tørkekammerets innløp bør være så høy som mulig. Denne siste konklusjonen må imidlertid balanseres med det faktum at sirkulert luftmengde G_{luft} i anlegget er direkte avhengig av Δx . En liten Δx fører til stor sirkulert luftmengde og høyt energiforbruk til vifter.

Som vanlig ved tørking av fisk, kjøtt, grønnsaker, mv. vil en i begynnelse av tørkeperioden ha en fuktig overflate og en høy relativ konstant tørkehastighet. Vanndamptrykket på overflaten vil da tilsvare væskens damptrykk (vanndampaktiviteten), ved klippfisk er dette en mettet saltløsning og tilsvarende $\phi = 76 \%$. Ved tilstrekkelig stor tørkeflate vil derfor ved klippfisktørking maksimal fuktighet ut av tunnel være 76 % (punkt b i Figur 4). Etter av overflatefuktigheten er fjernet vil vanndampen måtte strømme fra et økende lag av tørket materiale og gi en motstand som reduserer tørkingen (fallende tørkehastighet). En tørketunnel som fylles med fisk (batch-prosess) vil forutsatt riktig dimensjonering, oppnå nær maksimal mulig oppfukning og stor energieffektivitet (liten dh/dx) i starten. Etter som tørkingen avtar ved fallende tørkehastighet vil oppfukningen avta (punkt b flyttes nærmere punkt a i Figur 4) dh/dx avtar og energibruken øker. En mulighet er da å redusere luftmengden, men dette vil igjen påvirke tørkehastighet og tunnelens produktivitet. Ved vanlig driftsmåte for batch- tunneler vil den største del av tørketiden foregå med lav relativ fuktighet ut fra produktene og høy dh/dx og energiforbruk. Samtidig vil vifteenergien bli en stadig

større del av energibehovet for luftoppvarmingen og energisparingen ved bruk av varmepumpa avtar.

Tilsvarende som ved hordetørkene vil en *tilnærmet kontinuerlig drift med "motstrøms" periodisk innføring av varene ved luftutløp og uttak av ferdig tørket fisk ved luftinnløp, gi betydelig økning av tunnelens energieffektivitet og produktivitet.* Denne driftsmåte har flere fordeler slik som at fisken etter som den tørker og tørkehastigheten avtar, stadig møter tørrere luft og økende drivkraft for tørkingen som bidrar til å opprettholde avvanningen. Slutt-tørkingen hvor fisken krever lavest fuktighet oppnås samtidig som den høye fuktighet i nyinnlagt fisk sikrer høy utløpsfuktighet i tørkelufta og derved høy energieffektivitet. Forutsetningen for at en skal kunne oppnå dette er at en har riktig luftmengde, lufthastighet over produktene, jevn luftfordeling over tunnelverrsnittet og tunnel lengde. For beregningen kreves data for tørkehastighet, overflate og vekt av fisken, varme- og vanntransport i varen, mv. Vanligvis overslagsberegnes dette for hovedproduktene og tilpasses etter driftserfaringer med anlegg og produktvarianter.

Et hovedproblem ved bygging og drift av tunneltørker er å unngå "falskluft" eller luft som passerer utenom fisken og ikke opptar fuktighet. Dette gjelder i første rekke luft som passerer mellom varene og vegger, tak, gulv og mellom reoler. Luft som passerer uten vannopptak vil ikke endre tilstand (punkt a i figur 4) og blandes med oppfuktet luft (punkt b) etter tørkesona og gi en blandingstilstand som flytter tilstanden tilbake mot utgangstilstanden. I tillegg til øket dh/dx vil vifteeffekten for sirkulasjon av falskluft være tap. På tilsvarende måte vil ujevn luftfordeling over tunnelverrsnittet resultere i lavere oppfuktning av både i soner med for høy og for lav lufthastighet.

Eksempler:

En klippfisktørke arbeider med en maksimal lufttemperatur på 23 °C for å sikre at en unngår brenning av skinnoverflaten (max. 24 – 25 °C). Tunnelen er bygget for periodisk innsetting (semi-kontinuerlig) av reoler i motstrøm og er dimensjonert for midlere fuktighet ut fra produktene på 65 %. Temperaturen på fordamperoverflata er valgt til 4 °C for å unngå frysing av vannet. Ut fra Mollierdiagrammet kan derved prosessen fastlegges:

Innløpstilstand (pkt. a i fig. 4): $x = 6,5 \text{ g/kg}$ og 23 °C , $h = 39,4 \text{ kJ/kg}$.

Utløp (pkt. b i fig 4): $h = \text{konstant}$ til $\phi = 65 \%$, $x = 8,35 \text{ g/kg}$.

Tilstand etter fordamper (pkt. c): $x = 6,5 \text{ g/kg}$, temperatur 10 °C , $h = 26,7 \text{ kJ/kg}$.

Beregnet energibehov: $dh/dx = 12,7/0,00185 = \text{ca. } 6\,900 \text{ kJ/kg vann fjernet.}$ (kan også tas direkte fra inntegnet målestokk i diagrammet)

Falskluft: Om en i tillegg eksempelvis har 20 % luft i tillegg som passerer uten fuktopptak og blandes etter vognene vil etter diagrammet utløpstilstanden bli $x = 8 \text{ g/kg}$ og $\phi = 58 \%$ som vil gi *energiebehov på ca. 8 000 kJ/kg vann fjernet.*

3.4 ENERGIBRUK MED VARMEPUMPESYSTEM

I en tørkeprosess er kjølingen for fjerning av vann og kuldeytelsen er bestemmende for størrelsen av anlegget. For energibehovet er derfor kuldefaktoren ε (Eng: COP) sentral og er gitt av:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P_{el}} \quad [9]$$

Her er:

Q_0 [kW] er fordamperytelsen;

P_{el} [kW] er tilført effekt til kompressormotorene.

Kuldefaktoren eller effektfaktoren angir hvor stor kuldeytelse Q_0 som leveres for hver enhet energi kompressoren bruker ved de gitte driftsforhold, og er et mål for hvor effektivt anlegget er. Typisk effektfaktor for en varmepumpetørke er $\varepsilon = 3-4$.

For overslagsberegning av effektfaktor i denne typen anlegg kan en ut fra systemets fordampings- og kondenseringstemperatur beregne Carnot virkningsgraden (teoretisk ideell prosess). Denne er gitt av ligningen nedenfor, hvor ε_c er Carnot-effektfaktoren for en kuldemaskin, T_0 er fordampningstemperaturen i grader Kelvin.

$$\varepsilon_c = \frac{(t_0 + 273)}{(t_k - t_0)} = \frac{T_0}{\Delta T} \quad [10]$$

Forholdet mellom effektfaktoren for et virkelige anlegget (ε) og Carnot-effektfaktoren (ε_c) betegnes Carnot-virkningsgraden (η_c).

$$\eta_c = \varepsilon_c / \varepsilon \quad \text{eller} \quad \varepsilon = \varepsilon_c \cdot \eta \quad [11]$$

For anlegg av denne type vil den ofte være i størrelse $\eta_c = 0,4 - 0,45$

Anleggets kuldefaktor er først og fremst avhengig av fordampnings- og kondenseringstemperaturen (t_0 og t_k), foruten kompressorens isentropiske virkningsgrad, (η_{iss}) og anleggets oppbygning. Ved nærmere vurderinger bør anlegget beregnes i detalj, eventuelt også benytte dataprogram og simulering ved varierende tilstander.

4 ENERGIVIRKNINGSGRAD VED TØR KING; SMER-FORHOLDET

Tø rking er en energiintensiv prosess og det er derfor av interesse å ha en karakteristisk størrelse som beskriver energiforbruket i en tørkeprosess. Begrepet *energiforbruk* i denne sammenheng er et uttrykk for hvor mye energi som tilføres tørkeprosessen i form av høyverdige energiformer som elektrisitet, damp, olje og gass. Det viktigste i denne sammenhengen er at man bruker like definisjoner, slik at forskjellige anlegg og forskjellige tørketyper kan sammenlignes.

Det er to definisjoner som ofte benyttes. *Energivirkningsgrad* er definert på følgende måte:

$$\text{Energivirkningsgrad} = \frac{\text{Energi til fordamping av fuktighet ved temperaturen}}{\text{Total energi tilført tørken}}$$

En annen størrelse som nå oftere benyttes er det såkalte *SMER*-forholdet (Specific Moisture Extraction Rate). Definisjonen er:

$$\text{SMER} = \frac{\text{vekt av ekstrahert vann}}{\text{forbrukt energi}} \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kWh}} \right] \quad [12]$$

SMER-faktoren angir hvor mye vann [kg] som fjernes fra produktet for hver kWh energi som tilføres anlegget og en energieffektiv prosess har derfor en høy SMER. Faktoren brukes som en nyttig indikator for effektiviteten til varmpumpetørker og er spesielt nyttig for å sammenligne forskjellige driftstilstander i anlegg av samme type.

For varmpumpetørker er det største energiforbruket knyttet til varmpumpa og spesielt drift av kompressorene. For mange industrielle tørker i dag er det imidlertid registrert at energibruk for tørkeviftene utgjør en betydelig del sammenlignet med kompressorene. En får da for klippfisktørkene:

$$\text{SMER} = \frac{\Delta x \cdot m_1}{(P_k + P_v)} \quad [12]$$

Hvor:

P_k [kW] er varmpumpekompressorens energibehov og

P_v [kW] er energibruk til vifter og eventuelle pumper, mv.

Innføres varmpumpas effektfaktor $\varepsilon = Q_0 / P_k$ eller $P_k = Q_0 / \varepsilon$ og benytter $P_k = \Delta h_0 \cdot m_1 / \varepsilon$ og $P_k = \Delta h_v \cdot m_1$ hvor: $m_1 =$ sirkulert luftmasse [kg/s] (se Fig. 4.) Vi kan da benytte følgende uttrykk:

$$\text{SMER} = \frac{1}{\left[\left(\frac{dh}{dx \cdot \varepsilon} \right) + \left(\frac{\Delta h_v}{\Delta x} \right) \right]} \left[\frac{\text{kg vann}}{\text{kWh}} \right] \quad [13]$$

Eksempler (fortsett):

Den semi-kontinuerlige klippfisktørka var forutsatt og arbeidet med en maksimal lufttemperatur på 23 °C dimensjonert for midlere fuktighet ut fra produktene på 65 %. Temperaturen på fordampoverflata var valgt til 4 °C for å unngå frysing av vannet. Et godt varmpumpesystem vil da kunne arbeide med kondenseringstemperatur ca. 30 °C og fordamping ved ca. -2 °C noe som gir Carnot effektiviteten på:

$$\varepsilon_c = (273 - 2) / (30 - (-2)) = 8,47, \text{ og med et bra anlegg } \eta_c = 0,425 \text{ blir anslagsvis}$$

$$\varepsilon_{VP} = 8,47 \cdot 0,425 = 3,6 \text{ [kW/kW]}$$

Energibruk til vifter (Δh_v) er svært avhengig av tunnelutforming, viftevalg og drift av anlegget, verdier mellom 0,6 og 0,8 er registrert på langblåste tunneler som hadde betydelig "falskluft". Ut fra dette burde en kunne forvente ved mer optimale konstruksjoner og vifter verdier i størrelsesordenen på $\Delta h_v = 0,4$ kJ/kg luft. Med $\Delta x = 0,00185$ kg vann/kg luft og beregnet $dh/dx = 6850$ kJ/kg vann fjernet vil innsetting i SMER ligningen gi:

$$SMER = 1 / [(dh / dx) / \varepsilon + (\Delta h_v / \Delta x)] = 1 / [(6\ 900 / 3.6) + (0,4(0.00185))] = 0,00047 \text{ kg vann/ kJ}$$

eller *1,7 kg vann fjernet pr kWh energi.*

Klippfisk

Forutsettes videre vanninnhold i råstoffet på 55 % og tørking til klippfisk med vanninnhold 45 % er vannmengde fjernet lik:

I klippfisk: vann = 0.45 kg/kg og tørrstoff = 0,55 kg/kg. Før tørking hadde denne tørrstoffmengde 55 % vann og da var: $0,55 = x_{v2} / (x_{tørrstoff} + x_{v2})$ eller $x_{v2} = 0,55 \cdot (0,55 + x_{v2})$ som gir vannmengde før tørking: $x_{v2} = 0,6722$ og fjernet vann: $\Delta x_{vann} = 0,6722 - 0,55 = 0.2222$ kg vann/kg klippfisk.

Energibehov pr kg klippfisk blir da:

$$\Delta W = x_{vann} / SMER = 0,2222 / 1,7 = 0,13 \text{ kWh/kg klippfisk}$$

Dette er da en verdi som forutsetter langblåst tunnel, riktig dimensjonert og driftet med de gitte forutsetninger. Det må forventes et stort spenn på denne verdien avhengig av anlegg og drift, klart mest uheldig er tverrblåste tunneler og med periodisk innfylling og tørking ("batch" drift).

5 MÅLINGER AV ENERGIBRUK VED ANLEGG.

Det er i prosjektet ”Fremtidens klippfiskbedrift” gjennomført omfattende målinger på 3 klippfiskanlegg/tørker, to tilnærmet langblåst ”langblåst” og en ”tverrblåst”. Målinger på slike anlegg under vanlig drift gir problem med flere av målingene og målenøyaktigheten er ofte problematisk på grunn av tilgjengelighet, varierende driftsbetingelser, varierende råstoff og tørrhet, mv. Flere av de viktigste parametere er derfor målt på flere måter for sammenligning og test av praktisk teknikk. Eksempelvis kan mengden vann som fjernes fra fisken bestemmes på minst 3 forskjellige måter:

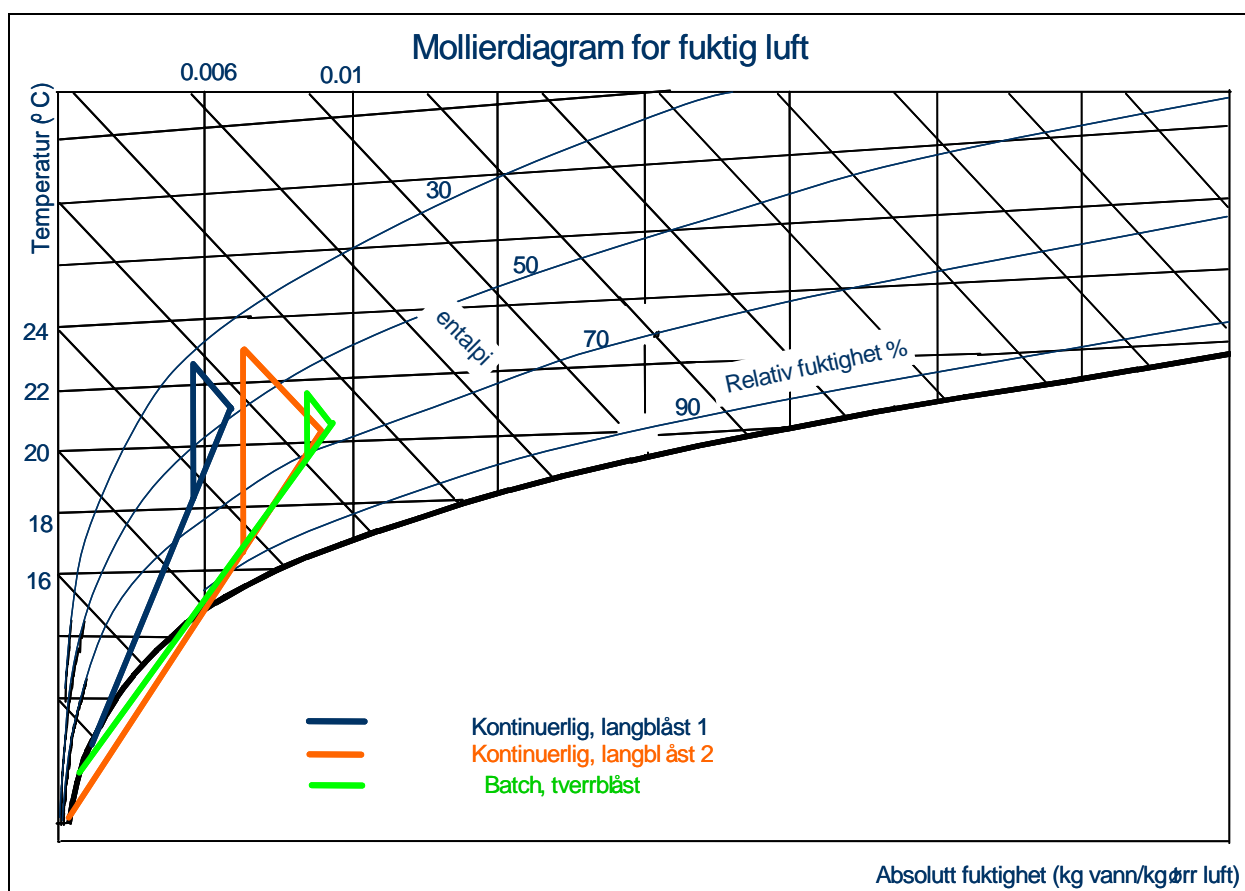
1. Vanninnhold på inn- og utgående fisk til tørken kan måle og totalmengde fisk registreres
2. Hvis tilstandene på tørkeluften og sirkulert luftmengde er kjent, kan opp- eller avfuktningen (over henholdsvis tunnel og fordamper) av luften beregnes
3. Drenert vannmengde fra varmepumpens fordamper måles.

Metode 1. er omstendelig og upraktisk idet det er nesten umulig å måle vanninnhold på andre fisker enn de som ligger i innmatnings- eller utmatningsenden av tunnelen. Det er oftest ikke tilkomst inne blant de andre reolene. Det blir ikke nøyaktig nok å registrere en midlere verdi for vanninnhold på våt og tørr fisk da dette varierer for mye.

Metode 2. krever målinger av sirkulert mengde som er vanskelig på grunn av tilgang inne i tunnelene og i returkanaler. Samtidig varierer hastigheten mye spesielt inne i tunnel og mellom varer, varer – vegger osv. samtidig som strømningsarealer er forskjellig. Lufttilstanden varierer også mye inne i tunnelen slik at målinger i returkanaler mv. er bedre om en har tilgang.

Metode 3. blir mye benyttet og målingene er greie om en har tilgang til og kontroll med avløpene. Vannstrømmen må måles kontinuerlig eller med korte mellomrom på grunn av varierende tørkehastighet, spesielt ved ”batch” tørking. Ofte er det grums i dryppannene og dette tetter tidvis/delvis igjen innløpet til rørene slik at vannmengden rørene veksler og strømmingen blir ujevn. Det antas likevel ofte at beregningen av kondensert vannmengde er mest pålitelig.

Tilsvarende er som allerede nevnt luftmengdemålinger ofte usikre på grunn av variasjoner i hastighet og strømningsareal. Også måling av midlere temperaturer og fuktighet er vanskelig på grunn av variasjoner over drift og tørkeperioden slik at mange målinger og målemetoder må benyttes. Målinger av el. energi er derimot i de fleste tilfeller enklere med tilkomst til tavler og motorer. For nærmere om måleteknikker og resultater vises til rapport fra prosjektet, mens hovedresultatene er vist i Figur 5 og Tabell 1.



Figur 5. Prosessen for tørkeluften for tre undersøkte industrielle klippfisktørker tegnet inn i Mollierdiagram for fuktig luft (tilnærmet midlere tilstander).

Som Figur 5 viser er oppfuktingen av tørkeluften til dels betydelig lavere enn den vanligvis forutsettes ved gode arrangement (se figur 4). Dette gjelder spesielt "Langblåst1" som har lavt fuktinnhold og som i stor grad skyldes at ca. 50 % av lufta går utenom varene (falskluft uten oppfukting). "Langblåst2" er den lengste tunnel som er målt, men også her kunne oppfuktingen vært noe bedre. Den tverrblåste "batch" har svært liten kort oppfuktingsflate for tørkelufta og derved liten oppfukting. Luftstrømmene er komplisert og "rotete" med mange vifter som delvis blåser mot hverandre, snuing av luftstrømmen med jevne mellomrom, osv. Den periodiske drift med innlegging av fisk med høy fuktighet som gir bra oppfukting. Figur 5 viser forholdene relativt tidlig i tørkingen hvor tørketemperaturen holdes lav for å sikre mot brenning. Ved tørking økes raskt tørkemotstanden i fisken, tørkehastigheten avtar raskt og gir store endringer i luftfuktighet etter utløp. Prosessen blir da rykket langt mot lav fuktighet og svært liten oppfukting av lufta.

Tabell 1. Nøkkeltall for de 3 undersøkte tørkene. Målinger er utført i juli og i september.

	<i>Langblåst1 Kontinuerlig</i>	<i>Langblåst2 Kontinuerlig</i>	<i>Tverrblåst Batch</i>
Målt vannfjerning kg/time	70	100	23 (22.5-40)
Energiforbruk kW			
- Vifter	12.00 – 19%	17.40 – 17%	14,65 – 37%
- Kompressor(er)	51.25 – 81%	84.60 – 83%	24.90 – 63%
- Totalt	63.25	102.00	39.55
Kuldemedium	R717	R22	R404a
Kuldeytelse kW (målt)/beregnet	236	310	110
COP	4.60	3.67	4.07-4.46
SMER	1.10	1.00	0.58-0.90
Energiforbruk, estimert kWh/år	455.400	734.400	284.760
energisparing kWh/år (SMER=2)	204.930	367.200	179.506

Energiforbruk på årsbasis er utregnet fra 7200 driftstimer.

Resultatene av målinger og beregninger på klippfisktørkene er vist i Tabell 1 og gir et mer For alle tørkene er SMER verdiene betydelig lavere enn beregnet for en rimelig god tørke. Dette skyldes i hovedsak for dårlig styring av luftstrømmen som gir høyt energibruk for vifter og for korte tunneler og lav oppfukning. Spesielt dårlig er den tverrblåste batch-tunnel med stort energiforbruk til vifter og liten oppfukning i det meste av tørketiden. Dette er som ventet ut fra beregninger og vurderinger, mens trenden i bransjen synes å gå mot denne type tørker. Det er derfor viktig å påpeke at denne utvikling vil gi sterk øket energibruk.

■ www.energy.sintef.no ■

■ www.energy.sintef.no ■



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

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