

FORSØG OG KOMMERCIEL UDNYTTELSE AF PROCES TIL TØRRING AF KORN MED OVERHEDET DAMP OG ENERGIGENVINDING MED MEKANISK VANDDAMPKOMPRESSION

Direktoratet for Fødevarerhverv, projekt j.nr. 93S-2466-Å01-01487

November 2004

Gunnar Minds, Teknologisk Institut

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. FORORD	3
2. RESUMÉ OG KONKLUSION	4
2.1 RESUMÉ	4
2.2 KONKLUSION	4
3. FEASIBILITY UNDERSØGELSER	5
3.1 BAGGRUND OG FORUDSÆTNINGER.....	5
3.1.1 Princip for tørring med overhedet damp og rekompresion.....	5
3.2 PROCESTEKNISKE FORUDSÆTNINGER.....	7
3.2.1 Energiforbruget.....	7
3.3 INDLEDENDE LITTERATURSTUDIER.....	8
3.4 INDLEDENDE BEREGNINGER OG OVERVEJELSER.....	8
3.4.1 Indledende undersøgelser og beregning med opvarmning af korn ved ledning.....	10
3.4.1.1 Resultater – 10 min. - "Uden omrøring"	11
3.4.1.2 Resultater - 40 min. - "Uden omrøring"	12
3.4.1.3 Resultater - 10 min. - "Med omrøring"	13
3.4.2 Konklusion af indledende undersøgelse for varmeovergang ved ledning.....	14
3.5 UNDERSØGELSE OG BEREGNING MED OPVARMNING AF KORN VED KONVEKTION.....	14
3.5.1 Konklusion på tørring ved konvektion.....	17
4. LABORATORIEFORSØG	18
4.1 FORSØGSOPSTILLING.....	18
4.2 FORSØGSRESULTATER.....	18
4.2.1 Indflydelse fra kornlagets tykkelse.....	18
4.2.2 Indflydelse fra temperaturniveauet	19
4.2.3 Indflydelse fra "trykdifferens" (temperaturdifferens)	19
4.3 KONKLUSION AF FORSØG.....	20
5. ER ANVENDELSEN AF ET FORVARMERSYSTEM FORDELAGTIG?	21
5.1 KONKLUSION PÅ ANVENDELSE AF FORVARMERSYSTEM.....	21
6. VALG AF KOMPRESSOR	22
7. OPBYGNING AF TESTANLÆG	22
7.1 FORELØBIG KONKLUSION FOR OPBYGNING AF TESTANLÆG.....	23
8. INVESTERINGS- OG OMKOSTNINGSKALKULATION	23
9. SAMMENLIGNING AF ENERGIFORBRUG MED TRADITIONELT ANLÆG	24
9.1 ENERGIFORBRUG FOR PROCES TIL VAKUUMTØRRER MED REKOMPRESION.....	24
9.2 ENERGIFORBRUG FOR TRADITIONEL TØRREPROCES MED OPVARMET LUFT.....	25
10. ENDELIGT DESIGN	26
11. RESUMÉ	30
12. SUMMARY	31
13. REFERENCER	32
14. BILAG	33

1. Forord

Denne rapport gengiver resultaterne af et projekt vedrørende statstilskud m.v. fra Direktoratet for FødevareErhverv projekt j.nr. 93S-2466-Å01-01487 med titlen "Forsøg og kommerciel udnyttelse af proces til tørring af korn med overhedet damp og energigenvinding med mekanisk vanddampkompression".

Rapporten er udarbejdet på grundlag af undersøgelser, målinger og beregninger udført af Teknologisk Institut i perioden april 2002 til november 2004.

Projektet har til formål at udvikle og demonstrere et energibesparende og miljøvenligt korn-tørringsanlæg baseret på kendt teknik med baggrund i energitilbageførsel.

For velvillig bistand ved gennemførelsen af projektet bringer Teknologisk Institut hermed en varm tak til:

Dir. Peter F. Collet, Gl. Kjøgegaard

hvis medvirken har bidraget væsentligt til gennemførelsen af projektet.

November 2004
Teknologisk Institut
Center for Køle- og Varmepumpeteknik

Gunnar Minds

2. Resumé og konklusion

2.1 Resumé

Projektet startede i april 2002 med et feasibility studie bestående af indledende litteraturundersøgelse, screening og forsøg med opvarmning af korn ved ledning, beregning af konvektiv tørreproces og vurdering af konvektion kontra ledning.

Disse indledende vurderinger (se afsnit 3.5), som medførte en ændring i den oprindelige beslutning om at tilføre energien, der medgår til fordampning af vandet i kornet direkte ved kontaktvarmeveksling i stedet for indirekte ved opvarmning med overhedet damp, blev efterfulgt med etablering af et beslutningsgrundlag baseret på laboratorieforsøg, hvor der blev tilvejebragt resultater for parametervariation enten ved ledning mellem den varmeafgivende varmeveksler – og kornet. Herunder måling af parametrene betydning for tørretider. Målingerne danner grundlag for fastlæggelse af tørretider og mulige praktiske løsninger. Der er udarbejdet energi- og investeringsøkonomiske beregninger for endelige anlægskonfigurationer. De energiøkonomiske beregninger er fastholdt med grundlag i omkostningsniveauet pr. november 2002.

På grundlag af ovenstående blev arbejdet herefter videreført med skitsering og beregning af et testanlæg og indhentning af priser herfor. Udarbejdelse og specifikation af styring af forsøgsopstilling og forsøgsplan. Til slut er der udarbejdet energi- og investeringsøkonomiske overslag over anlæg baseret på den optimale tekniske løsning, som er sammenlignet med kendt teknik.

Det var i projektet forudsat, at der skulle gennemføres en test af det skitserede anlæg, men da en af projektdeltagerne, som skulle fremstille testanlægget, udtrådte af projektet, før det var færdigt, blev den praktiske test ikke gennemført.

Den afsluttende rapport indeholder derfor kun resultatet af:

- Feasibility og litteraturstudie
- Etablering af beslutningsgrundlaget gennem laboratorieforsøg
- Udarbejdelse af tegninger for forsøgsanlægget.

2.2 Konklusion

De gennemførte laboratiemålinger og efterfølgende kalkulationer har vist, at anlæg til korntørring med fordel kan udføres, hvis de er baseret på en teknologi, hvor man tørrer kornet ved opvarmning gennem ledning under vakuum. Ved anvendelse af rekompresion, og dermed tilbageførsel af den energi, der bruges til fordampning af vandet i kornet i forbindelse med processen, mindskes energiomkostningerne til mellem 10 og 35% af omkostningerne ved traditionel tørring. Under forudsætninger, som angivet i bilag 08, vil afskrivningstiden for et anlæg baseret på ovennævnte teknik være knap 3 år. Målingerne viser også, at det er muligt at halvere tørretiden i forhold til kendt teknik med lufttørring og derved mindske anlægsstørrelsen.

3. Feasibility undersøgelser

3.1 Baggrund og forudsætninger

For optimalt at kunne udnytte den fordel, der er ved at anvende varmepumpeteknologi, har Teknologisk Institut gennem en årrække med positivt resultat undersøgt og kørt forsøg med kommerciel anvendelse af tørring og inddampning af vandholdige temperaturfølsomme produkter under vakuum.

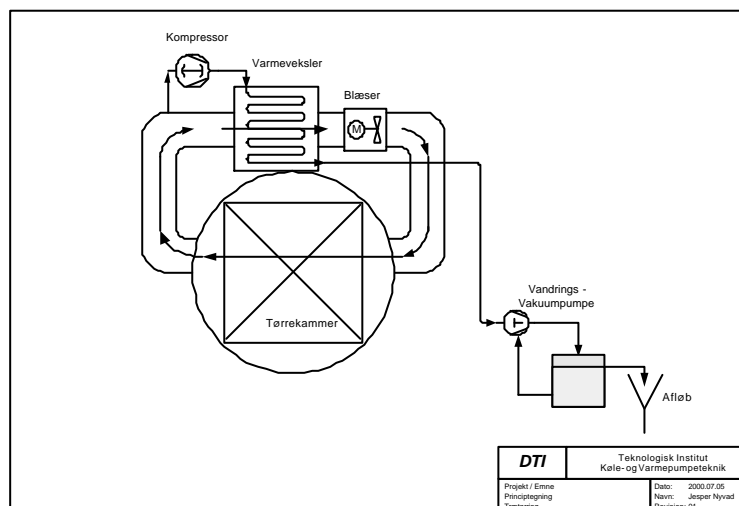
Forsøgene er udført med så forskellige produkter som:

- Proteiner som f.eks. valle, fiskeaffald, foderstoffer
- Æg
- Møbeltræ og træflis.

Dette har naturligt medført overvejelser, om ikke den samme proces kunne anvendes ved korntørring.

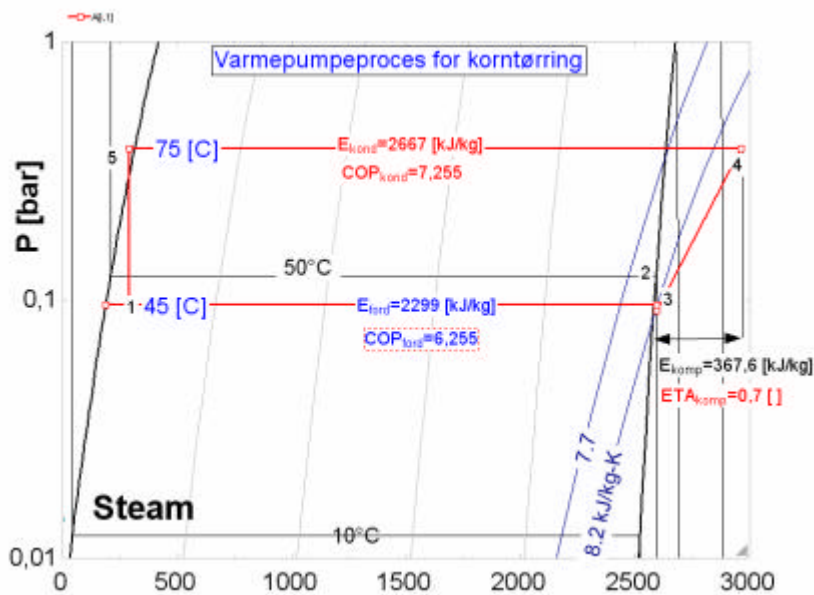
3.1.1 Princip for tørring med overhedet damp og rekompresion

Tørreprincippet, der er baseret på anvendelsen af rekompresion af den energi, der medgår til opvarmning af kornet, fremgår af nedenstående figur 1, hvor en delstrøm (1 til 3%) af den afdampede vanddamp fra kornet rekomprimeres i en kompressor, hvorefter dampene kondenseres og afgiver energi i en varmeblæse, som igen opvarmer hovedstrømmen af damp. Den kondenserede vanddamp ledes bort via et vakuumsystem. Princippet er en typisk varmepumpeproces.



Figur 1: Princip for tørring med overhedet damp.

En varmepumpeproces er typisk karakteriseret ved, at en lille tilført energimængde flytter en meget stor energimængde som f.eks. angivet i nedenstående h,log-p diagram. Se figur 2.



Figur 2: $h, \log-p$ diagram for sugetryk/afgangstryk kompressor 0,074 / 0,311 bar.

For at kunne få den størst mulige nytte af varmepumpeprocessen er det en fordel, at kunne lade den væske (vand), der er frigjort ved fordampning fra produktet, indgå direkte som procesmiddel i tilbageførslen af energi til og fra stoffet, der skal tørres.

Det fremgår eksempelvis, at man ved at tilføre 367,6 kJ/kg el-energi til kompressoren, får flyttet 2299 kJ/kg svarende til at fordampe 1 kg vand.

Hvis man sammenligner varmepumpens energiforbrug med energiforbruget ved eksempelvis lufttørring, hvor man kan beregne det tabsfrie¹ energiforbrug til min. 3500 kJ/kg fordampet vandmængde bliver:

$$\text{energiudnyttelsesfaktoren minimum } 3500/367,6 = 9,5 \text{ gange.}$$

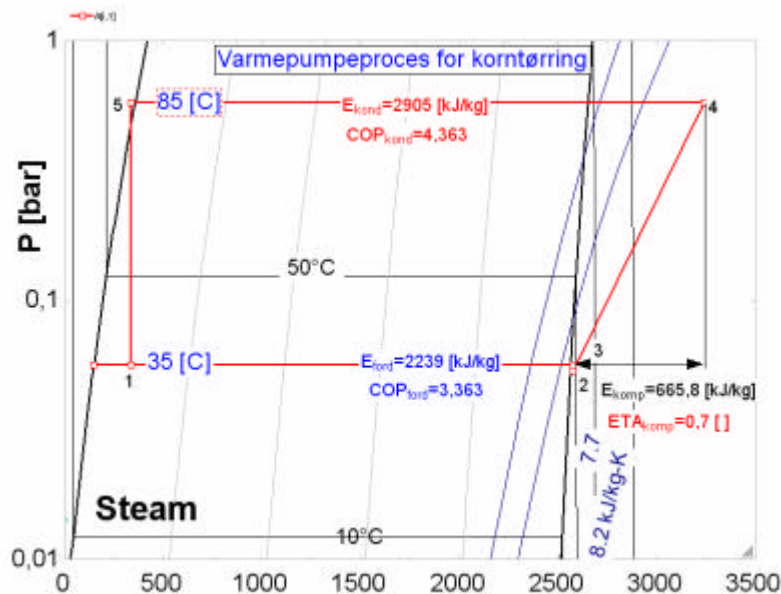
For at muliggøre denne udnyttelse må man nødvendigvis acceptere, at tørringen foregår ved et tryk lavere end atmosfæretryk, fordi vand ved temperaturer under 100°C fordamper ved tryk lavere end atmosfæretryk.

¹En "tabsfri" proces er en proces, hvor alle mekaniske og termiske tab og tab til omgivelserne ikke er medtaget.

3.2 Procestekniske forudsætninger

3.2.1 Energiforbruget

Som det fremgår ved sammenligning af ovenstående figur 2 og nedenstående figur 3, stiger energiforbruget jo større trykdifferensen mellem kompressorens suges- og afgangstryk er. Jo højere differens mellem de to tryk, jo mere kompressionsarbejde og dermed højere energiforbrug.



Figur 3: h,log-p diagram for sugetryk/afgangstryk kompressor 0,042/0,473 bar.

Energiforbruget til processen stiger altså fra 367,6 til 665,8 kJ/kg fordampet vand. Svarende til ca. 80%.

Jo højere afgangstrykket er, jo højere er temperaturen af den energimængde, der afleveres til kornet, og det medfører, at vandet i kornet fordamper. Jo højere temperatur kornet får i forhold til damptrykket i tørreren, jo hurtigere foregår tørringen.

Baggrunden for en energieffektiv proces er at skabe en optimal varmeoverførsel til kornet enten gennem ledning fra en vekslerflade til kornet eller gennem konvektion mellem overhedet damp og kornet.

Jo mindre den nødvendige temperaturdifferens er mellem kornet og "varmeveksleren", vist i figur 1, jo lavere bliver det afgangstryk, som kompressoren skal præstere, og jo lavere bliver energiforbruget.

Projektet har dermed først og fremmest haft til opgave at finde den mest optimale varme-transmissionsmodel mellem overhedet vanddamp og korn ved konvektion eller ved ledning mellem en varmeplade og kornet.

3.3 Indledende litteraturstudier

Litteraturstudiet er gennemført ved:

- Hjemtagelse og undersøgelse af relevante patenter
- Deltagelse i kursus om tørreprocesser
- Indhentning af brochurer fra relevante leverandører af traditionelle korntørningsanlæg.

3.4 Indledende beregninger og overvejelser

For tørring med luft, gælder ifølge en amerikansk standard (ASAE, 1996, Standard D245.4) følgende for ligevægtsvandindholdet i korn og den omgivende tørreluft:

$$m_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-K(t + C)} \right]^{1/N} \quad \text{for } t \text{ i området } 0 < t < 50^\circ\text{C}$$

hvor

m_e er ligevægtsvandindholdet på tør basis (Dry bulb), [-]

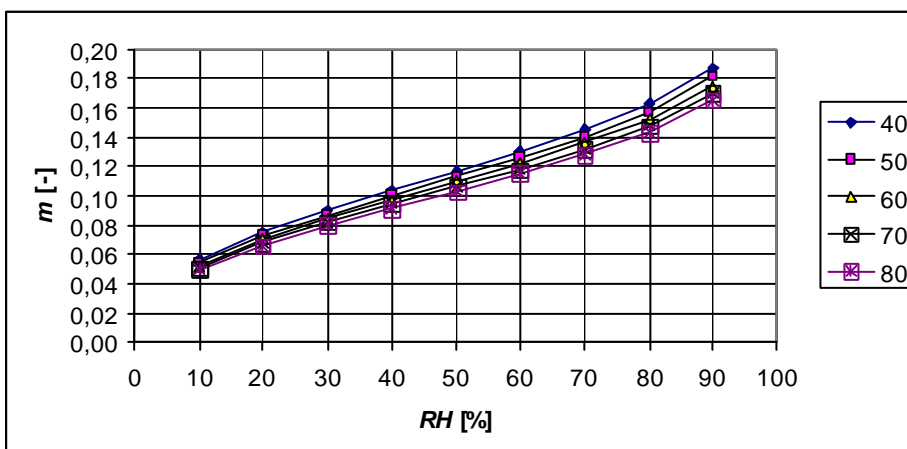
RH er relativ fugtighed i luften [-]

t er temperaturen af luften [$^\circ\text{C}$]

og konstanterne kan tages fra nedenstående tabel:

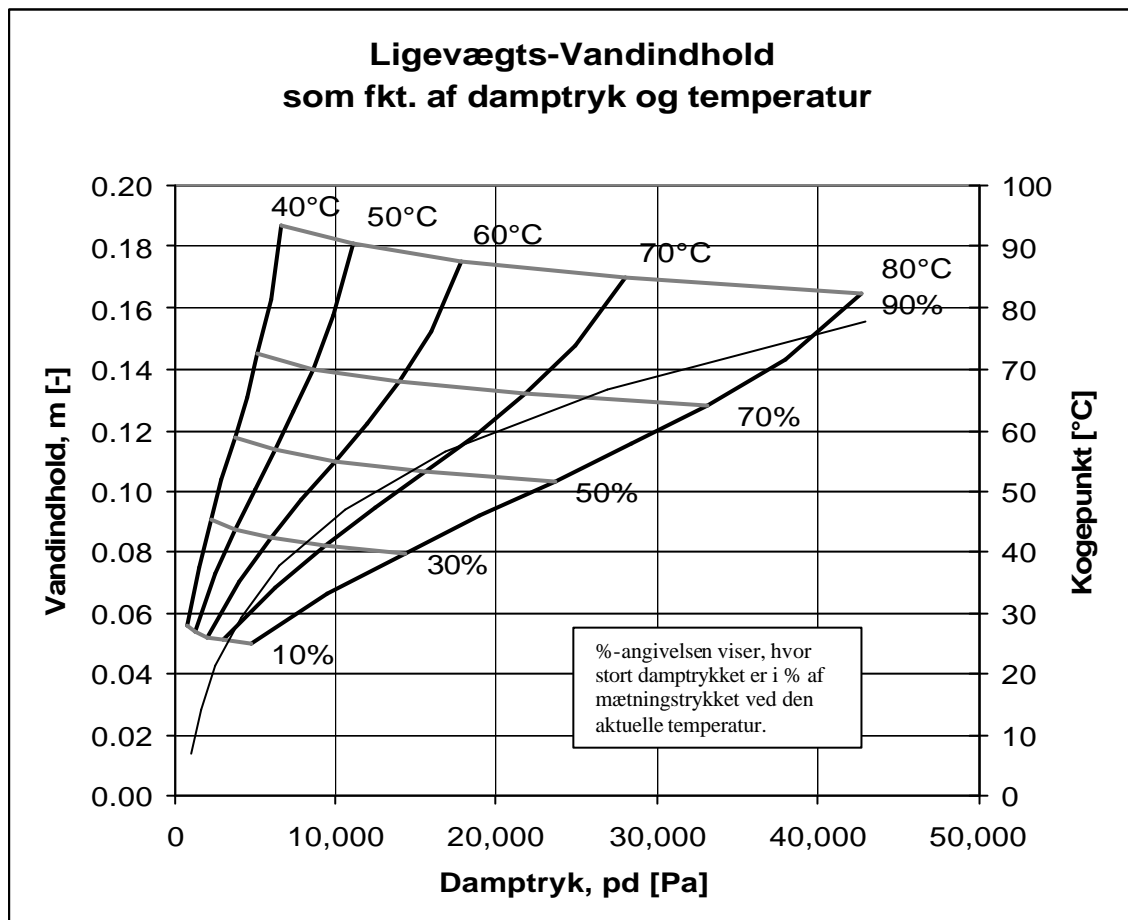
Hvedetype	K	N	C
Hard	2,3007E-5	2,3857	55,815
Hard, red	4,3295E-5	2,1119	41,565
Soft	1,2299E-5	2,558	64,346

Benyttes tallene for "soft-hvede" fås følgende sammenhæng: Se i øvrigt bilag 01.



Figur 3.1: Ligevægtsvandindhold som funktion af relativ fugtighed og temperatur (legends yderst til højre viser temperatur).

Omregner man RH (relativ fugtighed i luft) fra figur 3.1 til damptryk, hvor man tilsvarende kan indtegne ligevægtstilstanden, fås nedenstående figur 4.



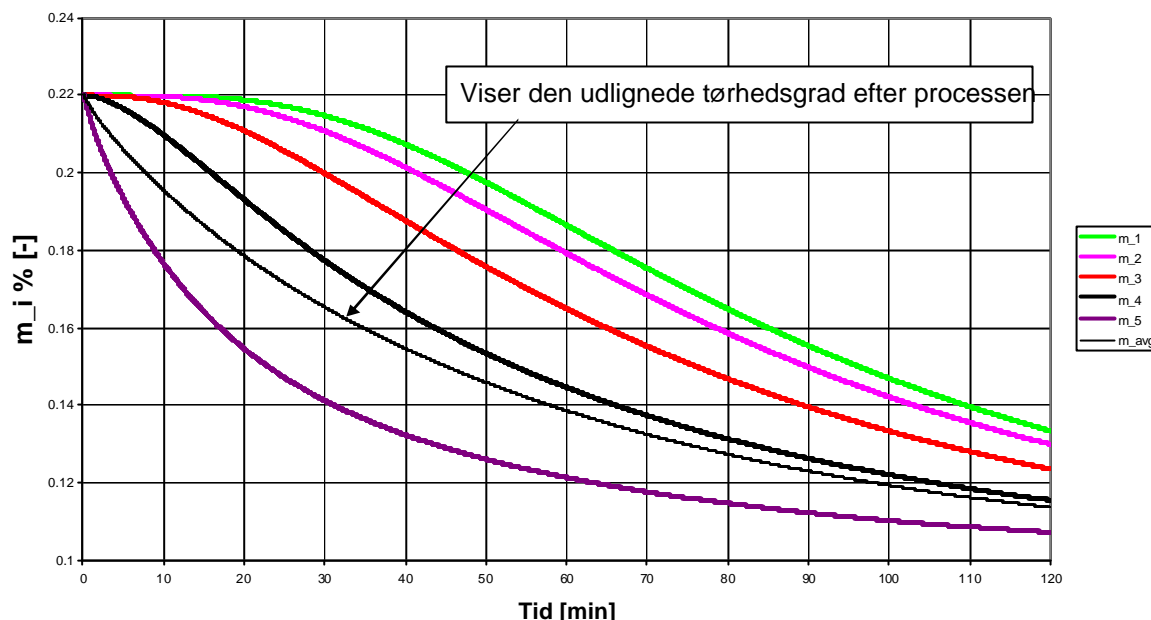
Figur 4: Ligevægtsvandindhold som funktion af relativ fugtighed og temperatur (legends yderst til højre viser kogepunktstemperaturen for vand).

Ovenstående diagram, figur 4, danner sammenhængen mellem vandindhold, temperaturer og damptryk og er dermed uafhængig af, om kornet tørrer i ren vanddamp eller i luft og vanddamp. Der er indledningsvis foretaget en vurdering af et forventeligt resultat, baseret på beregninger ud fra allerede kendt viden om "et-lags diffusionsmodel for plantørringsanlæg" se i øvrigt bilag 02: Damptørring af korn – et-lags diffusionsmodel.

Beregninger på dette grundlag giver følgende vandindhold i kernens center og de efterfølgende lag afhængig af tid og relativ fugtindhold i luften eller det tilsvarende damptryk i ren vanddamp. Se figur 5.

Med baggrund i disse undersøgelser, som er baseret på kendt viden om tørring af korn i anlæg med lufttørring, forventer vi således som minimum at kunne tørre kornet (nedbringe vandindholdet med 5% på ca. 27 minutter).

Vandindhold i kernen



Figur 5: Beregning af vandindhold i kernen som funktion af tiden og de enkelte lag i kernen. (Legends til højre betyder en teoretisk lagdelingsnit i et korn). Med udtrykket m_i i % menes fugtighedsprocenten i de enkelte lag med et udgangspunkt på 22% vandindhold ved starten.

Imidlertid er det vor forventning, baseret på erfaringer fra træ- og flistørring, at denne tørretid kan afkortes betydelig ved tørring under vakuum og med anvendelse af damp som varmeoverføringsmiddel. Typisk har vore og andre forsøg med tørring af træ [ref. 4] vist, at tørretiden kan afkortes til ca. $\frac{1}{3}$ sammenlignet med tørring med luft i traditionelle træ- og flistørringsanlæg.

Folk med erfaring inden for træ- og flistørring - se eksempelvis [ref. 6] - har givet forskellige forklaringer på dette forhold, men de fleste hælder til den anskuelse, at forskellen ligger i at vanddamp og luft ved tørreanlæg med luft, skifter plads i kornet, hvorfor denne proces tager længere tid, end hvis blot vanddampen alene vandrer ud af kornet.

3.4.1 Indledende undersøgelser og beregning med opvarmning af korn ved ledning

Der er som udgangspunkt for de fremtidige laboratorieforsøg udført en simpel undersøgelse ved at tørre korn i fri luft over en varmeplade med styret temperatur.

Disse indledende undersøgelser godtgjorde, at det ville være fordelagtigt, hvis man kunne overføre den energi, der er nødvendig til fordampning af vandet i kornet, ved direkte kontakt mellem kornet og den varmeplade, hvor kompressoren afleverede den komprimerede damp.

Dels havde de indledende undersøgelser vist, at varmeovergangstallet blev større, og dels at man sparede energiforbruget til ventilatorerne, som skulle cirkulere den primære overhedede damp gennem kornlaget.

Forsøgsomfanget blev derfor udvidet til også at omfatte forsøg med varmeovergang gennem ledning.

Resultatet af beregningerne og overvejelserne er gengivet i:

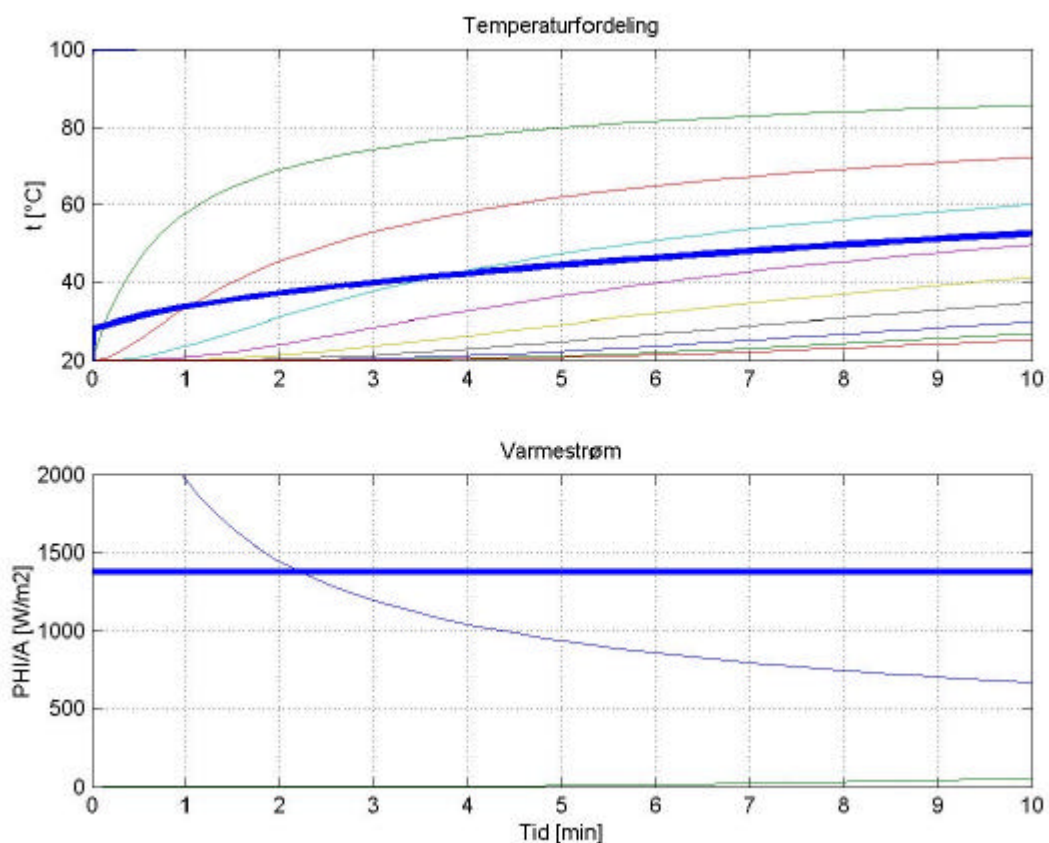
Bilag 03: Dynamisk varmeledning igennem en tykvægget mur

Bilag 04: Damptørring af korn – Anlægsberegning med "Varmeledning"

Bilag 05: Damptørring af korn – Varmeledning gennem kornlag

Disse indledende beregninger er sammenholdt med et simpelt forsøg, hvor varmetilførslen kommer fra en elektrisk varme fladeplade, og kornet er udlagt i en "Gryde": Se bilag 05.

3.4.1.1 Resultater – 10 min. – "Uden omrøring"



Figur 6: Forløb over 10 minutter.

Forklaring:

Øverste diagram: Temperaturer i de 10 lag, samt middelværdi.

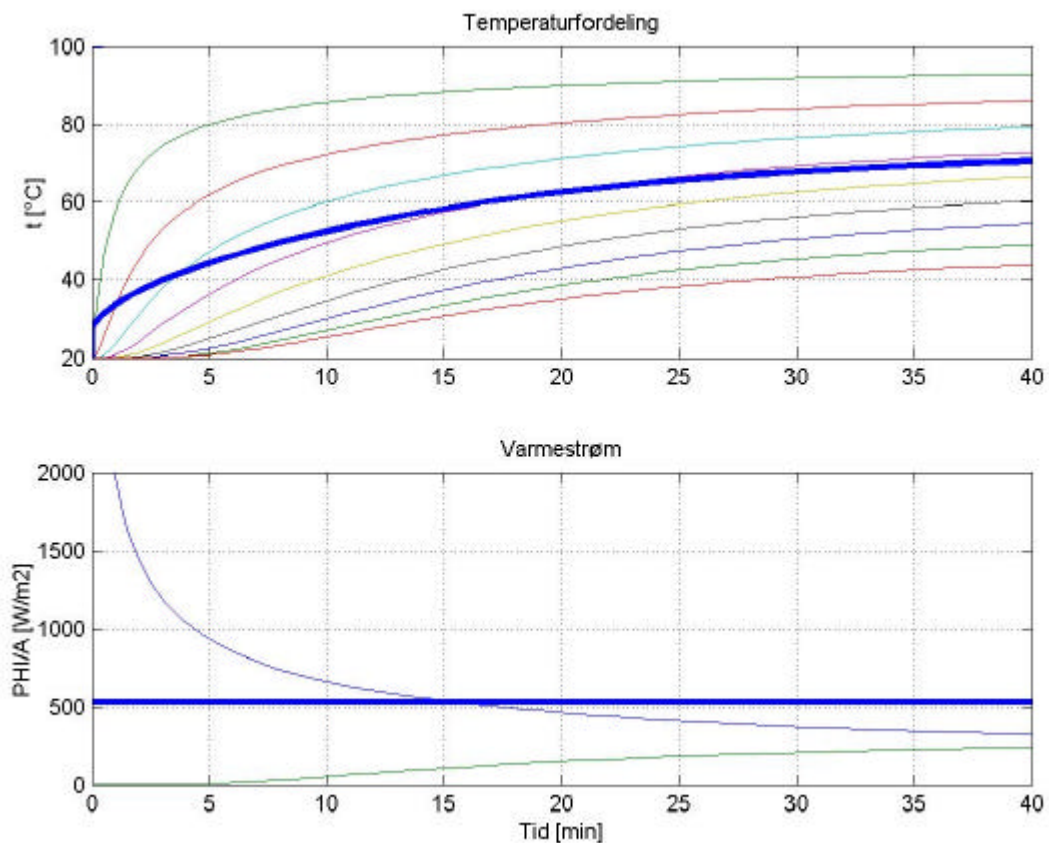
Nederste diagram: Tilført effekt ved den varmeafgivende flade og udvendig overflade af kornet (nederste kurve), samt middelværdi af indvendig væg over de 40 min. (fed kurve).

Kommentarer

Slut-middeltemperaturen er 53°C, og forsøgene viste 50°C.

Middeleffekten over de 10 min. er ca. 1400 W/m².

3.4.1.2 Resultater - 40 min. - "Uden omrøring"



Figur 7: Forløb over 40 minutter.

Kommentarer

Slut-middeltemperaturen er 70°C, og forsøgene viste 60°C.

Middelvarmestrømmen over de 40 min. er ca. 500 W/m².

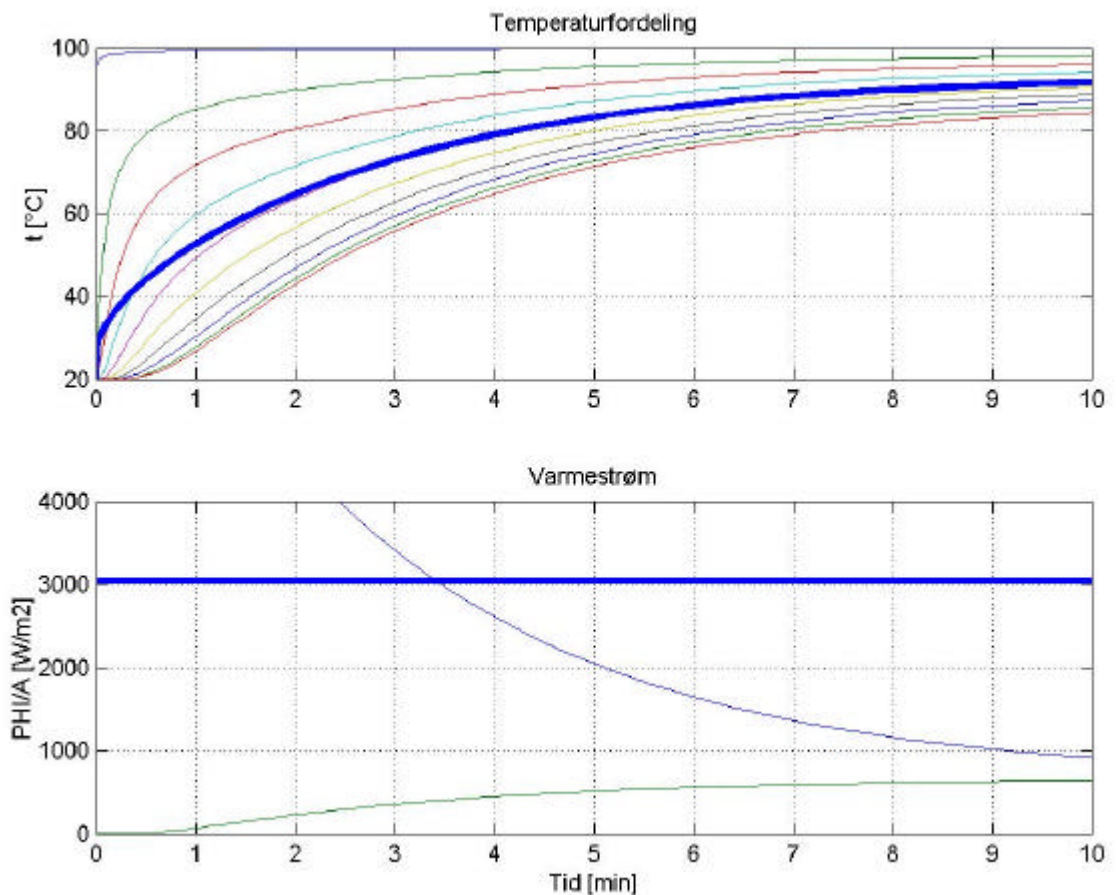
Konklusion

Målinger giver lidt lavere temperaturer end beregnet, hvilket kan forklares ved begyndende fordamning, specielt ved forsøget over 40 min.

3.4.1.3 Resultater - 10 min. - "Med omrøring"

Nusselts tal udtrykker "forholdet mellem varmeovergangstallet ved konvektion og varmeovergang ved ledning" altså $Nu = \alpha / (k/L)$, hvor k er varmekonduktiviteten. Ved laminar strømning vides, at Nusselts tal er 3,6.

Vi sætter nu Nu -tallet skønsomt til 10, og får nedenstående resultat.



Figur 8: Med "omrøring".

Kommentarer

Slut-middeltemperaturen er 91°C, og forsøgene viste 68°C.
Middelvarmestrømmen over de 10 min. er ca. 3000 W/m².

Konklusion – med omrøring

Målingerne giver igen lidt lavere temperaturer end beregnet, hvilket kan forklares ved begyndende fordampning. Specielt her, hvor der er god omrøring, og kornet i slutfasen er målt til 68°C, vil der sikkert ske en god fordampning.

3.4.2 Konklusion af indledende undersøgelse for varmeovergang ved ledning

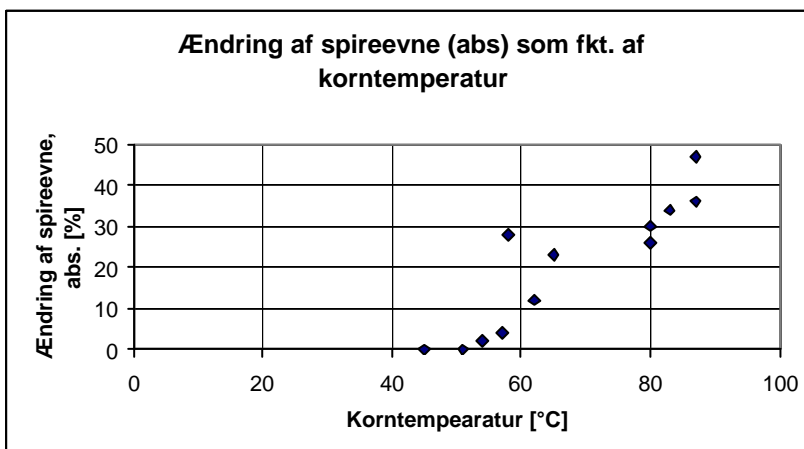
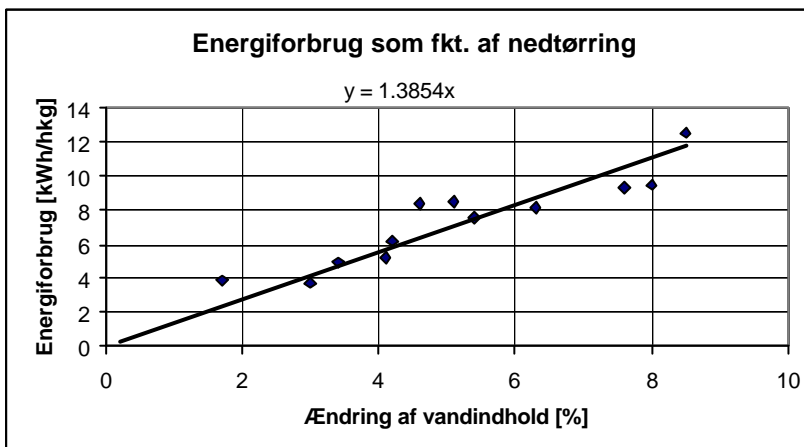
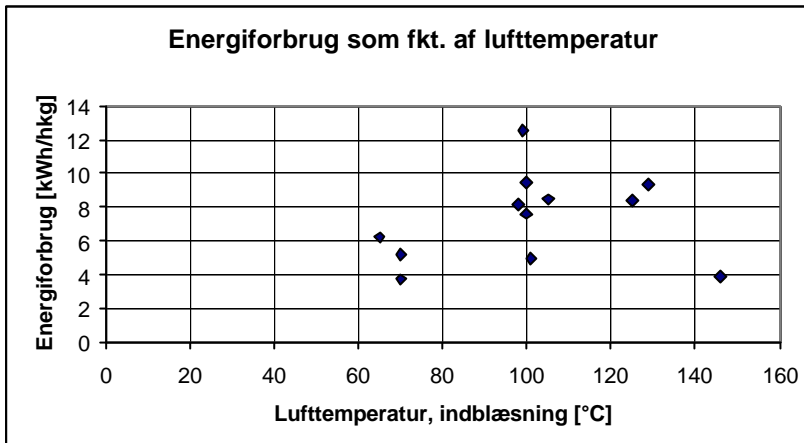
Disse indledende undersøgelser og forsøg viser, at det er muligt at overføre den nødvendige energi til kornet baseret på ledning, selvom lagtykkelsen ikke må blive for stor, og der er behov for en form for "omrøring".

3.5 Undersøgelse og beregning med opvarmning af korn ved konvektion

Disse undersøgelser blev gennemført ved hjælp af matematiske analyser, idet det blev vurderet, at kendskabet til varmetransmission mellem vanddamp og korn var så høj, at laboratorieforsøg ikke ville give et væsentlig anderledes resultat, end den man ville få ved en beregning.

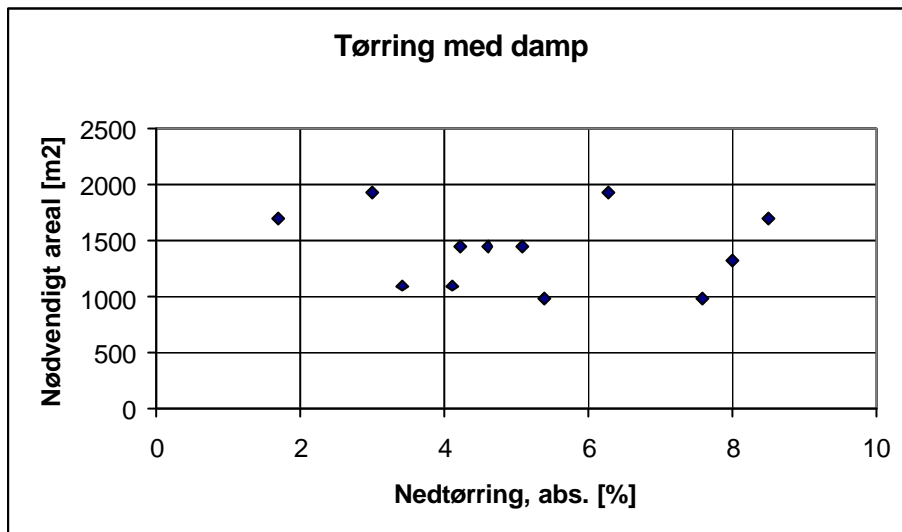
Resultatet af beregningerne er gengivet i bilag 06: Tørring af korn – beregning som "Gennemløbstørreri".

Beregningen er gennemført som en analyse, foretaget af Bioteknisk Institut, ref. [5], over det faktiske energiforbrug ved gennemløbstørrerier. Se figur 7. Det forudsættes, at lufttemperaturen ikke overskrider 80°C af hensyn til kornets spiringsevne.



Figur 7: Tørring af korn – gennemløbstørreri.

Beregningerne viser samtidigt et andet problem, nemlig at det kræver en meget stor "varme-flade", hvis man vælger at overføre energien til fordampning af vandet til kornet gennem konvektion. Beregningerne er gennemført ved en forudsætning om et kornlag på 25 mm. Se figur 7.1.



Figur 7.1: Nødvendig varmeoverførende overflade ved tørring af 20 ton korn/time.

Ved sammenligning med processen baseret på tørring under vakuum med rekompresion er der foretaget følgende indledende vurderinger:

Ifølge afsnit 3.1.1 figur 2 fordampes 1 kg vand med et energiforbrug på 367 kJ.

Til hjælpefunktioner såsom vakuumpumpe m.m. medgår yderligere 20% i energiforbrug. [Ref. 4].

Til tørring af 1 hkg korn fra 19% til 15% fugtindhold skal der således fordampes 4 kg vand.

Energiforbruget til fordampning af 4 kg vand er således $4 \cdot 367 \cdot 1,2 = 1761$ kJ.

Af figur 7 fremgår, at det faktiske energiforbrug til tørring i gennemløbstørrerier under de ovenstående betingelser er ca. 5,5 kWh/hkg korn svarende til ca. 19800 kJ/hkg korn.

Det forudsættes nu, at man kan opdele dette energiforbrug i 2 hovedposter:

Fordampningsvarmen (se figur 2) udgør	= $4 \cdot 2299 = 9196$ kJ/hkg korn
og resten, der stammer fra ventilatorer, tab m.v.	= $19800 - 9196 = 10604$ kJ/hkg korn

Eller med andre ord udgør tabene til ventilatorer, der forventes at være det samme for anlæg med damp-tørring, mere end en faktor 6 gange det samlede energiforbrug til processen under vakuum med rekompresion.

3.5.1 Konklusion på tørring ved konvektion

På ovenstående grundlag blev det derfor indledningsvis besluttet, at fortsætte forsøgene med tørring af korn baseret på en teknik, hvor varmetilførslen til kornet overvejende sker ved ledning. Efterfølgende beregninger, forsøg og kalkulationer er gennemført på dette grundlag.

4. Laborieforsøg

4.1 Forsøgsopstilling

Forsøgene er gennemført med en forsøgsopstilling, som angivet i billederne, se bilag 07.

I den gennemsnitlige tank er det våde korn anbragt på en opvarmet plade, hvis temperatur er styret af en regulerbar strømtilførsel. Den gennemsnitlige tank er forbundet til en vakuum-pumpe, hvis sugetryk er reguleret af en konstant-tryks-ventil.

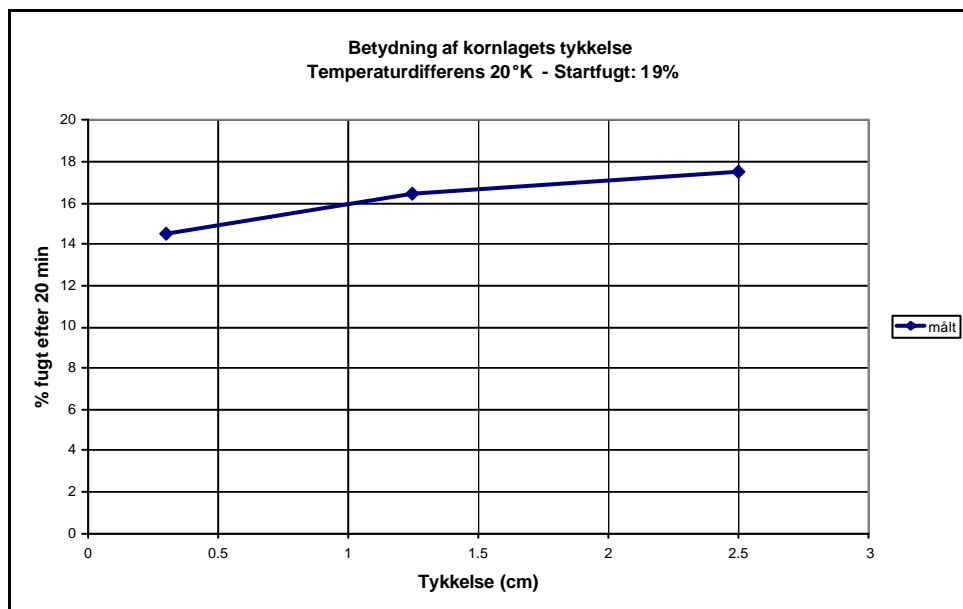
4.2 Forsøgsresultater

Hovedparten af forsøgsresultaterne er angivet i diagrammerne i bilag 07.

Det fremgår tydeligt, at 3 parametre spiller en væsentlig rolle for tørrehastigheden.

- Den ene er kornlagets tykkelse
- Den anden temperaturniveauet
- Den tredje er trykdifferensen mellem vanddamptrykket i kornet og trykket i kammeret.

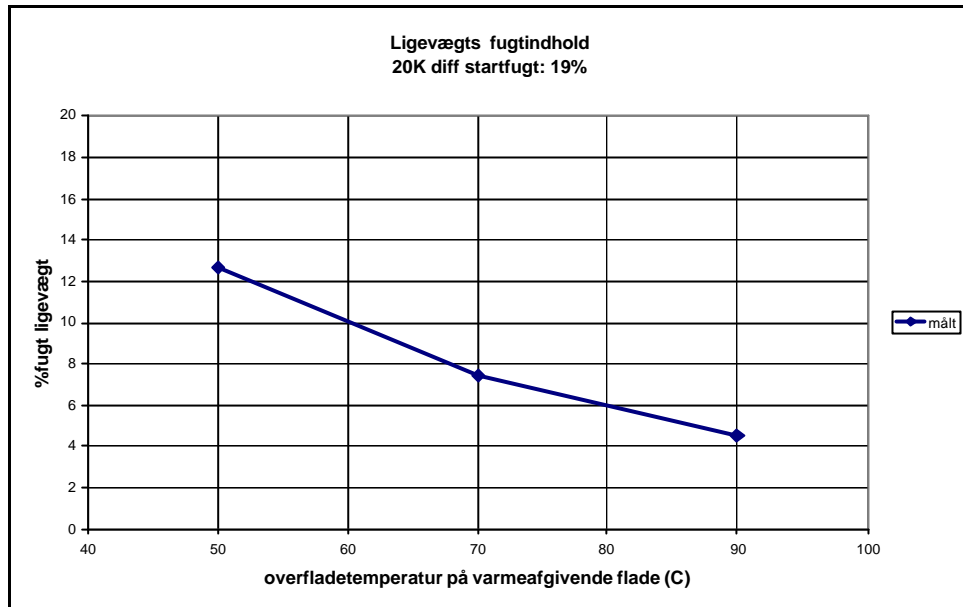
4.2.1 Indflydelse fra kornlagets tykkelse



Figur 10: Indflydelse fra kornlagets tykkelse.

Det fremgår tydeligt af diagrammerne, at kornets lagtykkelse spiller en væsentlig rolle for tørrehastigheden. Jo tykkere lag, jo langsommere går tørringen.

4.2.2 Indflydelse fra temperaturniveauet

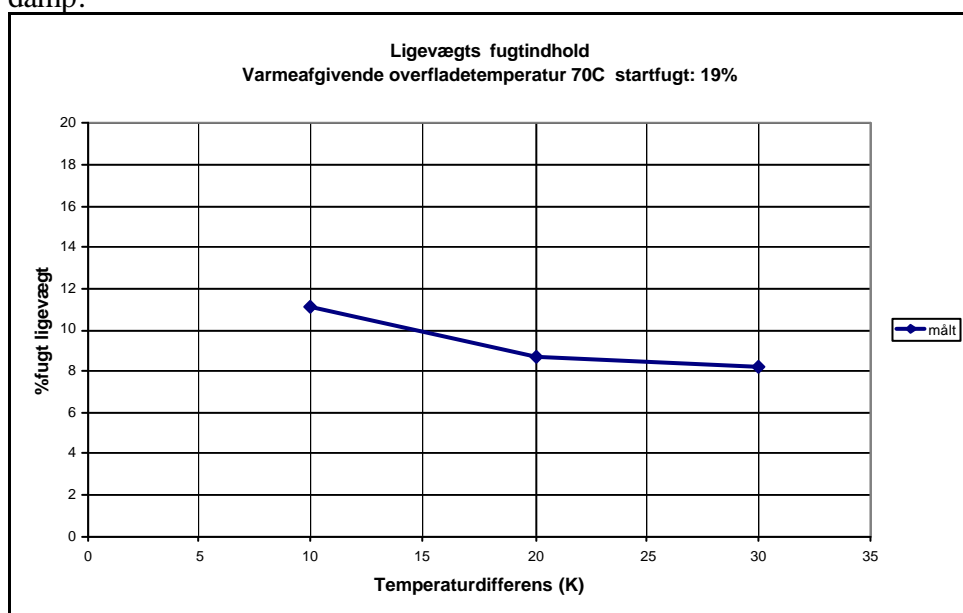


Figur 11: Indflydelse af temperaturniveauet.

Det fremgår, at temperaturniveauet har betydning for tørrehastigheden. Ved tørring af korn til spiring er den øverste grænse for temperaturniveauet formentlig ca. 60°C. Temperaturniveauet er angivet som temperaturen på overfladen af varmeveksleren.

4.2.3 Indflydelse fra "trykdifferens" (temperaturdifferens)

I denne sammenhæng er trykdifferens omregnet til mætningstemperaturdifferens for vand-damp.



Figur 12: Indflydelse fra temperaturdifferens.

Det fremgår af diagrammerne i bilag 07, at trykdifferensen - her angivet i form af mætnings-temperaturen - spiller en væsentlig rolle for tørrehastigheden. Valget af hvilken trykdifferens, der er optimal, sker på grundlag af vurderingen mellem anlægs- og driftsomkostninger.

4.3 Konklusion af forsøg

Denne vægtning mellem de forskellige parametre har medført, at der som konklusion af forsøgene er valgt et udgangspunkt for testanlægget som følger:

- Pladeafstand i varmeveksleren på 25 mm, svarende til en lagtykkelse på 12,5 mm og et temperaturniveau på 70°C for den varmeafgivende flade og en overfladetemperatur af kornet på 50°C.

Den reelle tørrehastighed skal valideres under forsøget. I forhold til de indledende beregninger viser forsøgene, at tørretiden kan bringes ned fra ca. 27 minutter til ca. 17 minutter. Det forventes imidlertid, at det endelige testanlæg vil tørre hurtigere end forsøgsopstillingen, idet temperaturfordelingen og den konvektive varmeovergang i kornet vil blive forbedret af den mere hensigtsmæssige udformning af varmetilførslen.

5. Er anvendelsen af et forvarmersystem fordelagtig?

Der er et teoretisk energispild, som hidrører fra opvarmning af kornet fra en temperatur på omkring 15°C til tørretemperaturen 50 til 60 °C, som i øvrigt også er den temperatur, kornet forlader tørreanlægget ved. Det synes umiddelbart at være en fordel, hvis det varme korn, der forlader tørreriet, bliver varmevekslet med det korn, der skal tilgå tørreriet.

En mulig løsning ville være at udvikle en slags "krydsvarmeveksler", hvor det varme korn, som forlader tørreanlægget, bidrager til at forvarme det korn, som tilgår tørreanlægget. En praktisk løsning ville være den, som er skitseret i bilag 12, hvoraf de detaljerede beregninger også fremgår.

Med en proces, hvor der anvendes varmepumpe til inddampningen, og hvor det meste af energitilførslen til kompressoren i princippet er overskudsenergi, er gevinsten imidlertid begrænset.

5.1 Konklusion på anvendelse af forvarmersystem

Beregninger (fremgår af bilag 12) viser en besparelse på ca. 11% (der er i denne forbindelse ikke taget hensyn til et væsentligt energiforbrug til blæsere, hvis forbrug ikke er beregnet, og som yderligere vil mindske fordelene).

Undersøgelsen godtgør, at "besparelsen", hvis en sådan overhovedet eksisterer, er minimal og konklusionen er derfor, at den udelades i kalkulationen og i oplægget til endeligt design, som fremgår af afsnit 10. Selve tørreriet er derfor øget med den nødvendige varmeffekte for at kompensere for energibehovet til fortørring.

6. Valg af kompressor

Der er indhøvet tilbud på kompressorer, der kan anvendes til formålet. Prisen er angivet i kalkulationen. Se bilag 08 for kalkulationer og beregninger. Der er tale om Roots-blæsere af en type, som man bl.a. kender fra mobile korntransportanlæg. Det er muligt at forsyne anlægget med en termisk kompressor, som alene anvender varme til kompressionsarbejdet. (En sådan er hverken beregnet eller kalkuleret).

7. Opbygning af testanlæg

Generelt:

Ifølge amerikanske eksperter [ref. 2] er det optimalt at lidt overhedet damp bevæger sig gennem kornlaget. Størrelsesordenen skal være 1% af den normale nødvendige mængde ved direkte opvarmning. Kontrolleret lækage ved vakuumsluser vil give en vis gennemstrømning af tør luft, som kan fjernes af vakuumpumpen i kondensatoren. Herved undgås besværlig udformning af ventilator, elmotor, ledningsføring og cyklonfilter. Konsekvensen af foranstående er en mulig reduktion af kondensatoreffektiviteten, øget vakuumpumpekapacitet og effektforbrug.

Krav: Beholderen skal være lodret stående af hensyn til ønske om minimum optaget grundareal.

Valg af metode og proces er sket ud fra økonomiske vurderinger af forskellige alternative løsningsmuligheder - se også afsnit 8 – "Investerings- og omkostningskalkulation" og afsnit 9 – "Sammenligning af energiforbrug med traditionelt anlæg, samt nedenstående vurdering over forskellige løsningsmuligheder". Se endvidere også bilag 11.

Beslutning:

Metoder:			
Indirekte opvarmning (konduktion via. kondensatorplader)	Funktion	Plusser:	Minusser
Ingen omrøring.		Ingen bevægelige dele Konstant kapacitet	Skævt tørreprofil, korn ved vægge tørrer først, og bliver måske for varmt.
Plugflow (første korn ind = første korn ud)		Kontinuerlig proces	Kræver lille effektiv kornlag, ved mange m2 varmeveksler areal, eller ved "omrøring" vha. brydning af kanalmønstret. Ex. strømning på tværs af rør, eller i kanaler som er forskudt ifht. hinanden.
Horisontal omrøring, fx stationære varmeplader, og omrøring vha. skraber eller vibrator.		Konstant kapacitet Kontinuerlig proces God fugt/temperatur fordeling	Bevægelige dele, evt. kan varmepladerne være stationære. Omrøring skal være på tværs af kornflowet, ellers ophører plug-virkningen.
Plugflow (første korn ind = første korn ud)			
Vertikal omrøring, fx stationære varmeplader, og omrøring vha. snegl		Konstant kapacitet Kontinuerlig proces God fugt/temperatur fordeling	Tilfældig opholdstid, og dermed skæv temperatur og fugtighed, med mindre beholderen opdeles i mindst 5 zoner, med individuel omrøring.
Mix-flow ved 1 eller få zoner Semi-plugflow ved mere end 5 zoner.		Omrøring burde kunne klares med en eller flere lodrette snegle.	Ved individuel omrøring vil der let opstå store spild-områder pga. 45° skridvinkel.
Batch kørsel med omrøring, fx lodret snegl.		God fugt/temperatur fordeling	Da forvarmeren bør køre kontinuerligt aht. optimal overførsel af varmen, er det generende at tørren kører batch vis. Anlægget skal lægge s ud for Qmax, og kører med meget svingende belastning.

Tabel 1: Analyse af forskellige løsningsmuligheder.

7.1 Foreløbig konklusion for opbygning af testanlæg

På baggrund af ovenstående er besluttet at tørrebeholderen fremstilles uden omrøring, og laver forsøg med tørring fra 19% til 15%, henholdsvis 19% til 11%, og tager først derefter stilling til endeligt layout.

Betydningen af cirkulation af overhededet damp efterprøves ved at lave kontrolleret lækage af opvarmet eller uopvarmet luft fra omgivelserne.

Der er udført en række skitser af forslag til testanlæg og indhentet priser på fremstillingen. Se bilag 07, 09 og 10.

8. Investerings- og omkostningskalkulation

Der er på grundlag af indhentede priser og kalkulationer udarbejdet en investerings- og omkostningskalkulation, hvoraf det fremgår, at ud fra kundens synspunkt under de givne forudsætninger er afskrivningstiden for et sådant noget dyrere anlæg knap 3 år. Se bilag 08.

9. Sammenligning af energiforbrug med traditionelt anlæg

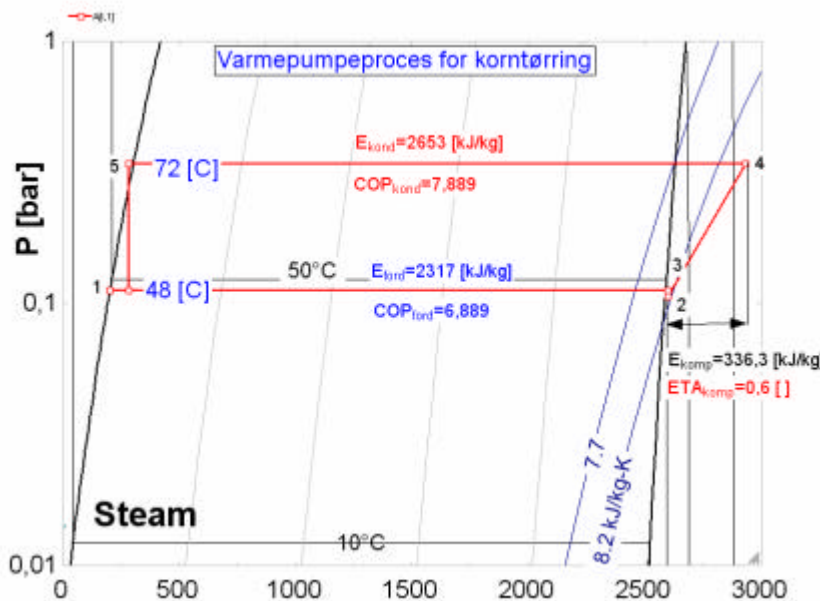
Alle energipriser er på prisniveauet fra år 2002.

9.1 Energiforbrug for proces til vakuomtørrer med rekompresion

Det specifikke energiforbrug, som er specielt til tørring under vakuum med mekanisk rekompresion af dampen, består af:

- Energiforbruget til kompressor
- Energiforbruget til vakuumpumpe
- Energiforbruget til ventilator på kondensator for overskydende damp
- Kondensatpumpe.

Energiforbruget til kompressor fremgår af figur 13.



Figur 13: Energiforbrug til kompressor.

Til fordampning af 1 kg vand medgår således 336 kJ til kompressoren.

Erfaringsmæssigt medgår derudover ca. 20% [ref. 4] af den nødvendige kompressoreffekt til vakuumpumpe, ventilator og kondenspumpe.

Det samlede energiforbrug udgør således $336 \cdot 1.2 = 430$ kJ/kg fordampet vand.

For at sammenligne med et traditionelt anlæg omregnes værdierne til et anlæg, der tørrer 20.000 kg korn/time fra 19% til 15% fugtindhold.

Der skal således fjernes 800 kg vand pr. time, hvilket svarer til $403 \cdot 800 / 3600 = 90$ kW.

Med en elpris på 0,5 kr. pr. kWh udgør omkostningen for tørring af 20 tons korn således:

$$\underline{\underline{90 \cdot 0.5 = 45 \text{ kr. svarende til } 0.23 \text{ kr./hkg}}}$$

9.2 Energiforbrug for traditionel tørreproces med opvarmet luft

Under henvisning til data fra bilag 13 fremgår følgende for et mobilt 20-tons-anlæg:

På basis af ovenstående, beregnes følgende for et 20-tons-anlæg:

Indfyret varmeeffekt	1280	kW
Elforbrug	30	kW
Specifikt energiforbrug	6.55	kWh/hkg
Elpris	0.5	kr/kWh
Gaspris	0.3125	kr/kWh
Varme-omkostning	400	kr/h
El-omkostning	15	kr/h
Driftsomkostning, i alt	415	kr/h
Specifik pris	2.08	kr/hkg

Energiforbruget i kr. er altså en faktor, der er 9 gange større for et mobilt tørreanlæg baseret på opvarmning med gas, end et tørreanlæg baseret på vakuum og rekompresion.

10. Endeligt design

Selve tørreriet tænkes opbygget af en række varmeplader, som er placeret i en afstand af 25 mm mellem hinanden.

Oprindeligt var forslaget at fremstille varmeveksleren, som vist i skitse nr. 1, 2 og 3 i bilag 07.

I denne udførelse fremstilles varmeveksleren af en pladesektion bestående af 3 plader i højden, som er forskudt en $\frac{1}{2}$ pladeafstand for at give omrøring i kornet. De enkelte sektioner er på dampsiden forbundet gennem rør, så dampen fra kompressoren kan gå ind i toppen af sektionen og kondensatet ud i bunden. Hele sektionen er placeret i en vakuumbeholder, hvor kornet går ind i toppen og forlader beholderen i bunden.

I forbindelse med pågående forhandlinger med andre interesserede samarbejdsplaner blev der imidlertid udarbejdet en alternativ løsning, som viste sig at være mere end 25% billigere end det oprindelige forslag. Se skitse nr. 1 og bilag 09 og 10.

Denne alternative løsning består af en række varmevekslerplader, som er placeret med en afstand på 25 mm mellem hver plade.

For at forhindre varmepladerne i at trykkes sammen på grund af det udvendige overtryk på op til 0,9 bar, er der placeret en række afstandsstykker (kunne også være optryk i pladen) med en afstand på ca. 100 mm mellem hver (se skitse nr. 1). Med denne placering kan der beregningsmæssigt opstå en udbøjning på op til 1 mm mellem understøtningerne (se nedenstående – EES-beregning). De 2 åbne sider er beklædt med 2 mm plader. Denne "kasse" danner det indvendige vakuumkanter, hvor kornet strømmer til foroven, tørres og forlader sektionen i bunden.

Afstandsstykkerne/eller optrykket tjener til omrøring af kornet. Pladerne har foroven og forneden et optryk, som svejses sammen og danner tilgang - henholdsvis afgang - for damp og kondensat.

Beregning af:

Vareflade understøtning

Programtekst:

Understøtning for plader i vakuum

$$U_{\max} = 0,5 \cdot (1/384) \cdot q \cdot L^4/E/I$$

$$q = 100000 \text{ N/m}^2$$

$U_{\max} = 0,001 \text{ m}$ Tilladelig nedbøjning

$$E = 0,21 \times 10^{12} \text{ Pa, N/m}^2$$

$$I = (1/12) \cdot b \cdot h^3$$

$$h = 0,0008 \text{ m}$$

$$b = 1 \text{ m}$$

Resultat:

$$b = 1 \text{ [m]}$$

$$E = 2,100 \times 10^{11} \text{ [N/m}^2]$$

$$h = 0,0008 \text{ [m]}$$

$$I = 4,267 \times 10^{-11} \text{ [m}^4]$$

$$L = 0,09108 \text{ [m]} \text{ Max. tilladelig af stand mellem understøtninger}$$

$$q = 100000 \text{ [N/m]}$$

$$U_{\max} = 0,001 \text{ [m]} \text{ [Tilladelig nedbøjning m]}$$

Den viste skitse er med de angivne dimensioner kun beregnet til en ydelse på tørring af ca. 200 kg korn/time. En udførelse beregnet for 10.000 kg korn/time vil således have udvendige dimensioner på:

$$\text{Længde} = \text{ca. } 7,07 \cdot 331 = 2.340 \text{ mm}$$

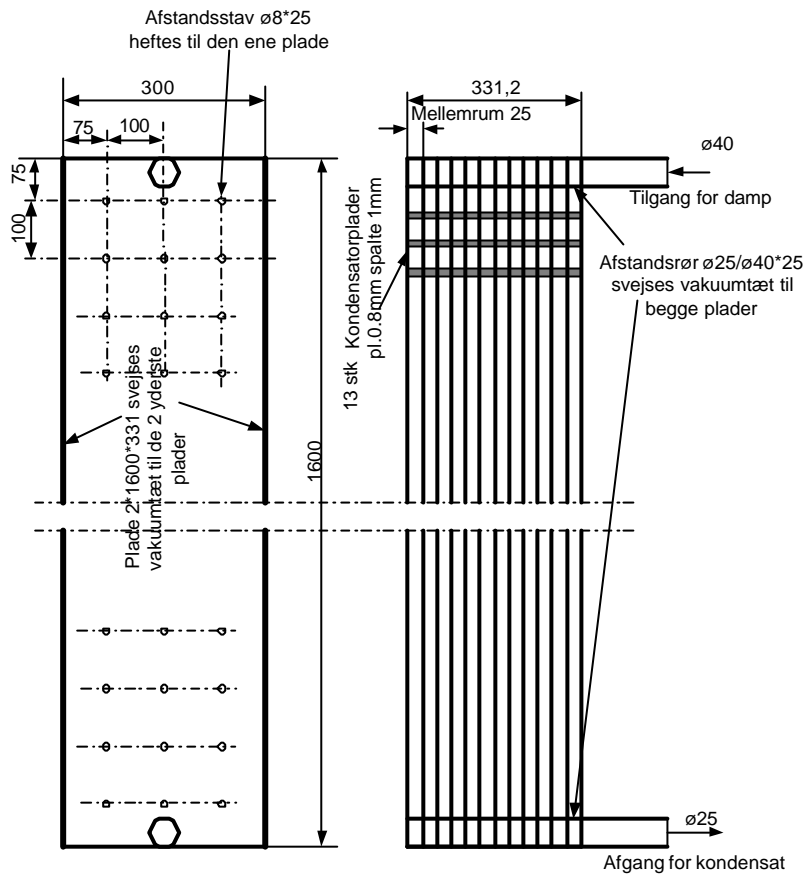
$$\text{Bredde} = \text{ca. } 7,07 \cdot 300 = 2.121 \text{ mm}$$

Højde af pladevarmeveksler = ca. 1600 mm

Dertil kommer vakuumslyse og ind- og udløbskonus, som tilsammen giver ca. 2*1500 mm.

Højde i alt ca. 4600 mm.

Det endelige komplette anlæg består af de i skitse nr. 2 viste komponenter:



Alle materialer AISI 304

Design tryk:

Mellem plader: 0,1 bar abs (vakuum)

I pladen : 1,0 bar abs (0,0 bar over atm.)

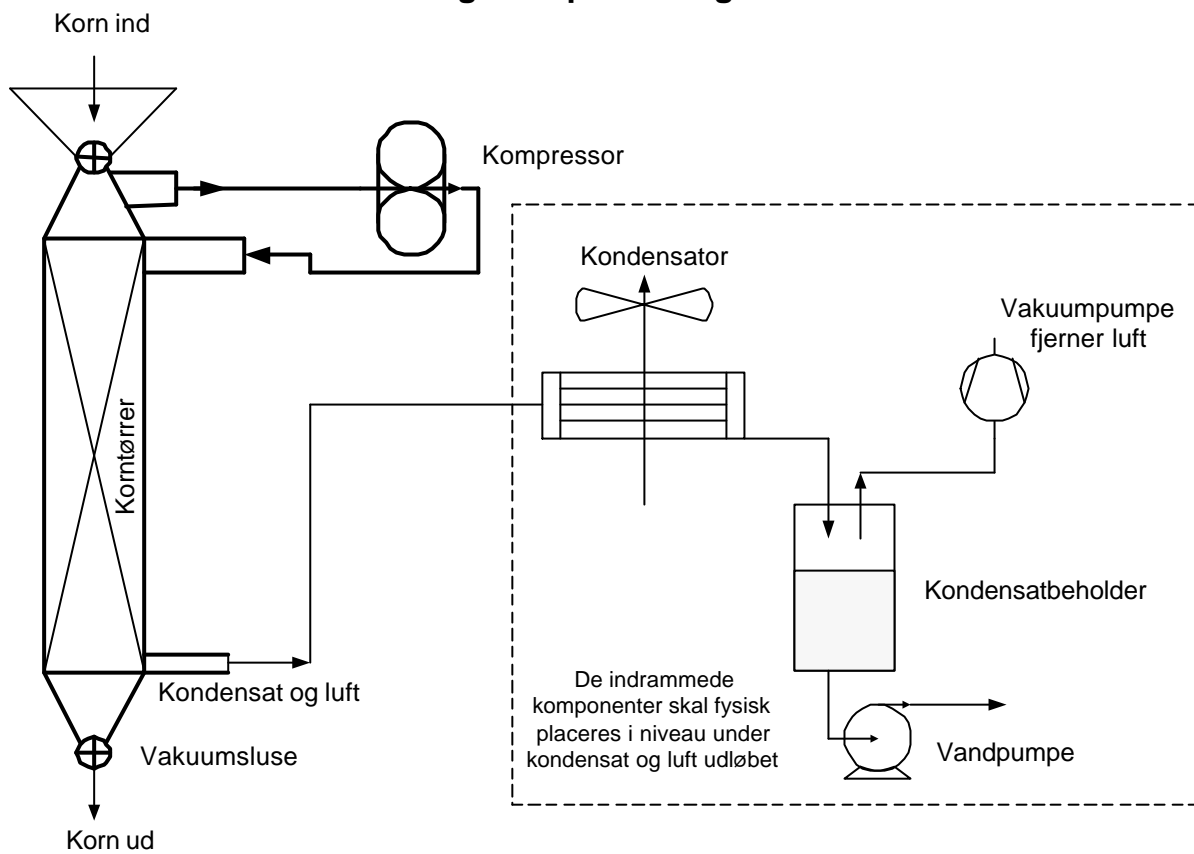
Design temperatur 100°C

Pladevarmeveksler

Tegn. GMI 1 rev.1

Skitse nr. 1: Design af endelig udformning.

Endeligt komplet anlæg



GMI nov. 2004

Skitse nr. 2: Endeligt komplet anlæg.

11. Resumé

Denne rapport gengiver resultaterne fra et projekt vedrørende statstilskud m.v. fra Direktoratet for FødevarerErhverv projekt j. nr. 93S-2466-Å01-01487 med titlen "Forsøg og kommerciel udnyttelse af proces til tørring af korn med overhedet damp og energigenvinding med mekanisk vanddampkompression".

Rapporten er udarbejdet på grundlag af undersøgelser, målinger og beregninger udført af Teknologisk Institut i perioden april 2002 til november 2004.

Projektet har til formål at udvikle og demonstrere et energibesparende og miljøvenligt korn-tørringsanlæg baseret på kendt teknik med baggrund i energitilbageførsel.

Projektet startede i april 2002 med et feasibility studie bestående af indledende litteraturundersøgelse, screening og forsøg med opvarmning af korn ved ledning, beregning af konvektiv tørreproces og vurdering af konvektion kontra ledning.

Disse indledende vurderinger, som medførte en ændring i den oprindelige beslutning om at tilføre energien der medgår til fordampning af vandet i kornet direkte ved kontaktvarmeveksling i stedet for indirekte ved opvarmning med overhedet damp, blev efterfulgt med etablering af et beslutningsgrundlag baseret på laboratorieforsøg, hvor der blev tilvejebragt resultater for parametervariation ved ledning eller konvektion. Herunder måling af parametrene betydning for tørretider. Målingerne danner grundlag for fastlæggelse af tørretider og mulige praktiske løsninger. Der er udarbejdet energi- og investeringsøkonomiske beregninger for endelige anlægskonfigurationer. De energiøkonomiske beregninger er for omkostningsniveauet pr. 1. november 2002.

På grundlag af ovenstående blev arbejdet herefter videreført med skitsering og beregning af et testanlæg og indhentning af priser, udarbejdelse og specifikation af styring, forsøgsopstilling og forsøgsplan.

Til slut er der udarbejdet et energi- og investeringsøkonomisk overslag over anlæg baseret på den optimale tekniske løsning, som er sammenlignet med kendt teknik.

De gennemførte laboratoriemålinger og efterfølgende kalkulationer har vist, at anlæg til korn-tørring med fordel kan udføres, hvis de er baseret på en teknologi, hvor man tørrer kornet ved opvarmning gennem ledning under vakuum. Ved anvendelse af rekompresion, og dermed tilbageførsel af den energi, der bruges til fordampning af vandet i kornet, i forbindelse med processen, mindskes energiomkostningerne til mellem 10 og 35% af omkostningerne ved traditionel tørring. Under forudsætninger, som angivet i bilag 08, vil afskrivningstiden for et anlæg baseret på ovennævnte teknik være knap 3 år.

Målingerne viser også, at det er muligt at halvere tørretiden i forhold til kendt teknik med lufttørring og derved mindske anlægsstørrelsen.

12. Summary

This report states the results from a project concerning government subsidies etc. from the Danish "Directorate for Food, Fisheries and Agri Business", project file number 93S-2466-Å01-01487 with the Danish title "Forsøg og kommerciel udnyttelse af proces til tørring af korn med overhedet damp og energigenvinding med mekanisk vanddampkompression".

The report has been prepared on the basis of investigations, measurements and calculations carried out by Danish Technological Institute during the period from April 2002 till November 2004.

The objective of the project is to develop and demonstrate an energy saving and environmentally friendly grain dryer based on a well-known technology in the light of energy reversal.

The project started in April 2002 with a feasibility study consisting of initial information investigation, screening and test with heating of grain through conduction, calculation of convective drying process and evaluation of convection versus conduction.

These initial evaluations that resulted in a change in the original decision to supply the energy used for evaporation of water in the grain through contact heat exchange instead of indirectly through heating with superheated steam were followed by the establishment of a basis for decision based on laboratory tests that provided results of the parameter variation through conduction or convection - including the measurement concerning the importance of the parameters for the drying times. The measurements form the basis of the determination of drying times and possible practical solutions. Energy and investment economic calculations have been prepared for the final plant configurations. The energy economic calculations is the cost level as on 1. November 2002.

In the light of the above, the work continued with an outline and calculation of the test plant and collection of prices, preparation and specification of control, test set-up and test plan.

Finally, an energy and investment economic estimate has been prepared of plants based on the optimum technical solution which has been compared with a well-known technology.

The laboratory measurements and subsequent calculations that were carried out have shown that plants for grain drying with advantage can be implemented if they are based on a technology where the grain is dried through heating via conduction under vacuum. By using recompression and in that way reversal of the energy used for evaporation of the water in the grain in connection with the process the energy costs are lowered to between 10 and 35% of the costs from traditional drying. Under the assumptions stated in enclosure 08 the depreciation time of a plant based on the above-mentioned technique will be close to 3 years.

The measurements also show that it is possible to reduce the drying time by 50% compared to a known technique with air drying and in that way reduce the size of the plant.

13. Referencer

Følgende referencer er anvendt:

1. US Patent 529 1668.
2. Drying 96. Volume A og B. Editors: C. Strumitto og Z. Pakowski
3. "Forsøg med luftfri tørring under vakuum med rekompresion", Energistyrelsens projekt for SKAMOL A/S, af Gunnar Minds, Jesper Nyvad og Kim G. Christensen, Teknologisk Institut.
4. Forsøg og kommerciel udnyttelse af proces til tørring af træ med overhedet damp og energigenvinding med mekanisk rekompresion – Energistyrelsens projekt j.nr. 731327/01-0090, af Gunnar Minds, Teknologisk Institut.
5. Målinger gennemført på Bioteknisk Institut i 1980. Resultater iht.: "Energibesparelser ved korntørring - Delrapport II", Bioteknisk Institut, 1980, Jacobsen, E. E.; Mogensen, S.N.
6. Trætrøkkning 1b.- Praktisk trøkkning af Bjørn Esping udgave 1996 (ISBN 91-88170-23-3) Kapitel 9.6.3 Vakuumtrøkkning.

14. Bilag

- Bilag 01: Damptørring af korn – Ligevægtsvandindhold
- Bilag 02: Damptørring af korn – Ét-lags diffusionsmodel
- Bilag 03: Dynamisk simulering
- Bilag 04: Damptørring af korn – Anlægsberegning med "Varmeledning"
- Bilag 05: Damptørring af korn – Varmeledning gennem kornlag
- Bilag 06: Damptørring af korn – Beregning som "Gennemløbstørreri"
- Bilag 07: Laboratorieforsøg
- Bilag 08: Energi- og investeringsøkonomisk sammenligning
- Bilag 09: Oplæg til endelig testanlæg
- Bilag 10: Forsøgsopstilling – endelig testanlæg
- Bilag 11: Metoder: Indirekte opvarmning
- Bilag 12: Krydsvarmeveksler til korn
- Bilag 13: Energiforbrug ved mobile anlæg