

NORGES LANDBRUKSHØGSKOLE  
Meieriinstituttet  
Avdeling for meierimaskiner.  
Leder: Professor Olav Framhus.

---

NOEN REGULERINGSTEKNISKE OG VARMETEKNISKE UNDERSØKELSER  
AV EN PLATEVARMEVEKSLER FOR PASTEURISERING AV MELK.

Av  
Karl Magnus Staxrud

---

Ås-NLH 1973

## FORORD.

Under gjennomføringen av denne undersøkelsen har jeg vært ansatt ved meieriinstituttet, avdeling for meierimaskiner. Undersøkelsen er utført i sin helhet ved denne avdeling.

Veiledende lærer har vært professor Olav Framhus som velvilligst har stilt forsøksutstyr til disposisjon, og lagt arbeidsforholdene til rette for å kunne gjennomføre undersøkelsen samt påtatt seg å utgi publikasjonen.

Konstruktør Werner Dahl har deltatt i den praktiske utførelsen av undersøkelsen. Han har dessuten montert forsøksanlegget og bidratt vesentlig i forbindelse med løsning av måle- og driftstekniske problemer.

Kontorfullmektig Palma Gjelsten har skrevet manuskriptet på maskin og tegnet figurene på stensil.

Jeg takker dem alle for god hjelp og godt samarbeide ved gjennomføringen av arbeidet.

Ås-NLH, april 1973.

Karl Magnus Staxrud.

## INNHOLD.

	Side
1. Innledning. ....	4
2. Tidligere undersøkelser. ....	5
3. Beskrivelse av platepasteuren. ....	7
4. Beskrivelse av oppvarmingssystemene. ....	12
4.1. Pasteurisering ved oppvarming med varmtvann. ....	12
4.2. Pasteurisering ved oppvarming med vakuumdamp. ....	15
5. Beskrivelse av regulatoren. ....	17
6. Målemetoder. ....	21
6.1. Væskestrømsmåling. ....	21
6.2. Trykk. ....	23
6.3. Temperatur. ....	25
7. Driftsforhold som gir ustabil regulering. ....	30
7.1. Generell beskrivelse av regulering i forbindelse med pasteurisering. ....	31
7.2. Varierte driftsforhold ved pasteurisering ved oppvarming med varmtvann. ....	34
7.2.1. Damptrykket. ....	35
7.2.2. Åpning av strupeventilen i vakuumsystemet ved dampreguleringsventilen. ....	38
7.2.3. Gjennomstrømmet mengde melk. ....	42
7.2.4. Melkens innløpstemperatur. ....	45
7.2.5. Plassering av regulatorens temperaturføler. ....	47
7.2.6. Gjennomstrømmet mengde varmtvann. ....	51
7.2.7. Resultater. ....	58
7.3. Varierte driftsforhold ved pasteurisering ved oppvarming med vakuumdamp. ....	65
7.3.1. Resultater. ....	68
8. Undersøkelse av noen varmetekniske forhold ved platepasteuren	70
8.1. Varmegjennomgangstallet ved varierende gjennomstrømning. ....	70
8.2. Regenerativvirkning ved varierende gjennomstrømning. ....	76
8.3. Varmetap i pasteuravdelingen. ....	80
8.4. Trykktap i platepasteuren. ....	82
8.5. Temperaturfordelingen over platene i pasteuravdelingen	85
8.6. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom platene i pasteuravdelingen. ....	105
9. Sammendrag. ....	110
10. Summary. ....	113
Litteratur. ....	117

## 1. Innledning.

Ved pasteurisering av melk i platepasteur er det vesentlig to oppvarmingssystemer som er i bruk. Det ene er oppvarming med sirkulasjon av varmtvann og det andre oppvarming med vakuumdamp.

Det har vært gjenstand for diskusjon hvorvidt det ene systemet har fordeler fremfor det andre. Noen fullstendig undersøkelse og sammenligning mellom de to oppvarmingsystemene har ikke vært offentliggjort tidligere. Denne undersøkelsen tar derfor sikte på å undersøke noen faktorer som har innvirkning på regulerings- og driftsforholdene ved de to oppvarmings-systemene.

Undersøkelsen er utført i to deler. Den ene delen omhandler praktiske forhold vedrørende regulering av pasteuriseringstemperaturen. Det ble gjort forsøk på å finne grensene for å holde stabil pasteuriseringstemperatur under varierte driftsforhold. Undersøkelsen omfatter variasjon av: damptrykket, åpning av strupeventilen i vakuumsystemet ved dampreguleringsventilen, gjennomstrømmet mengde melk, gjennomstrømmet mengde varmtvann, plassering av regulatorens temperaturføler og melkens innløpstemperatur.

Den andre delen omhandler varmetekniske undersøkelser av: regenerativvirkning, temperaturfordeling over platene i pasteuravdelingen, varmetap i pasteuravdelingen, varmegjennomgangstall og trykktap. De varmetekniske undersøkelsene ble utført ved varierende gjennomstrømming av "melk". Det ble av praktiske grunner nyttet vann i stedet for melk ved gjennomføringen av undersøkelsen. Variasjon i sirkulasjon av varmtvann ble også undersøkt ved det systemet som hadde varmtvann til oppvarming.

Undersøkelsen ble lagt opp på en slik måte at de resultatene en kom frem til, kunne danne grunnlag for sammenligning mellom pasteurisering ved oppvarming med varmtvann og oppvarming med vakuumdamp.

## 2. Tidligere undersøkelser.

De første platevarmevekslerne for pasteurisering av melk kom i 1922. Siden den gang har det vært en kontinuerlig utvikling av varmeveksleren både med hensyn til materiale i platene og formen på strømningsløpet mellom platene.

Et av de problemer som har vært gjenstand for stor oppmerksomhet, er hvor hurtig en kunne måle en temperaturforandring og hvor nøyaktige målesystemene var. Hall (17) konkluderte med at temperaturmåling med termoelement var å foretrekke både med hensyn til nøyaktighet og hurtig reaksjonsevne fremfor termometerfølere som var gass eller kvikksølvfylt. Årsaken til hurtig reaksjonsevne til termoelementer er hovedsaklig at massen til et termoelement kan gjøres svært liten.

Tidsforsinkelsen mellom forandring i temperaturen i produktet og den temperaturen instrumentet viser er undersøkt av flere (9, 17). Tidskonstanten for et temperaturmåleutstyr påvirker også den foran nevnte tidsforsinkelse og er undersøkt av (16, 18, 23, 24).

Steighart (27) har målt hastigheten av temperaturforandring i en platepasteur. Han konkluderer med at skal en måle hurtige svingninger i temperaturen på  $0,5^{\circ}$  C pr. sekund, vil en ikke kunne måle svingningene dersom en plasserer føleren etter holdercellen p.g.a. at raske temperatursvingninger blir dempet i holdercellen.

Ved Meieriinstituttet ved Norges landbrukshøgskole er det undersøkt flere systemer for måling av pasteuriseringstemperaturen (10, 11, 12, 25).

Wälzholz (30) har stilt opp retningslinjer for kopling, montasje og drift av oppvarmingssystemer til f.eks. pasteurisering av melk.

Caffyn (8) har redegjort for følsomhet og reaksjonsevne ved måling av pasteurisering i en platepasteur. Han har dessuten beskrevet oppvarming med varmtvann og metoder til å måle oppholdstiden for melken i holdercellen.

Ved Meieriinstituttet ved Norges landbrukshøgskole er det undersøkt tre forskjellige systemer for regulering av pasteuriseringstemperaturen. Døvle, Framhus og Sauge (10) har undersøkt et pasteuriseringssystem (pumpe stopp systemet) som hadde elektrisk overføring fra temperaturføleren til dampreguleringsventilen. Systemet hadde ikke omløpsventil i melkeløpet. Når temperaturføleren målte for lav pasteuriseringstemperatur, ble melkestrømmen gjennom pasteuren stoppet ved at melkepumpen automatisk ble utkopleet. Når pasteuriseringstemperaturen igjen var høy nok, startet melkepumpen. Døvle, Framhus og Sauge (11) undersøkte også et pasteuriseringssystem med omløpsventil og pneumatisk overføring fra regulatoren til dampreguleringsventilen. Temperaturføleren var væskefylt med kapillarrørforbindelse til regulatoren. Det tredje systemet for regulering av pasteuriseringstemperaturen ble undersøkt av Døvle og Sauge (12). Dette var et relativt komplisert system med tre kontakttermometre som styrte dampreguleringsventilen, omløpsventilen og temperaturskriver. Dampventilen og omløpsventilen ble styrt hydraulisk. Overføringen fra kontakttermometrene var elektrisk og termometrene styrte på den måten magnetventiler i det hydrauliske systemet som igjen styrte dampreguleringsventilen og omløpsventilen.

Plock og Wälzholz (10) har redegjort for flere systemer for temperaturregulering av pasteuriseringstemperaturen. I tillegg har forfatterne beskrevet riktig plassering av en temperaturføler i en røralbue.

Undersøkelser over temperaturfordelingen på platene i pasteuravdelingen har en ikke funnet offentliggjort, men Mo (21) har undersøkt overflatetemperaturen langs sidene av en plate i pasteuravdelingen. Hassan (19) undersøkte temperaturfordelingen langs midten av en enkel plate i regenerativavdelingen i en platepasteur under normal drift med melk.

Varmegjennomgangstallet er undersøkt av en rekke forfattere (5, 7, 15, 19, 20, 21, 32). McKillop og Dunkley (20) har stilt opp differensialligninger for varmeballansen i hvert

løp i pasteuravdelingen. Differensialligningene ble løst numerisk på datamaskin og lokalt og totalt varmegjennomgangstall ble utregnet som funksjon av væskens strømnings-hastighet.

Ved platevarmevekslere har en mulighet for effektivt å gjenvinne varme i regenerativavdelingen. Regenerativ-virkningen er undersøkt av (15, 21, 31, 32). Framhus (14) har dessuten utledet formel for å beregne den økonomiske optimale regenerativvirkning.

Trykktapet i platepasteurens enkelte avdelinger er avhengig av måten løpene mellom plantene er koplet på. Når antall løp koplet i parallell reduseres øker trykktapet. Det samme gjør seg gjeldende når en øker antallet grupper av parallellkoplede løp i serie. Forholdene vedrørende trykktapet er undersøkt av (7, 21, 29, 32).

### 3. Beskrivelse av platepasteuren.

Typebetegnelsen på den undersøkte platepasteuren var P5-RB og produsent var firmaet Alfa Laval A.B., Sverige (1). Den var dimensjonert for pasteurisering av 2000 liter melk pr. time og driftstemperaturene oppgitt fra fabrikken, var følgende:

Innløpstemperatur	5 °C
Temperatur ut fra regenerativavdelingen	55 "
Pasteuriseringstemperatur	72 "
Temperatur ut fra regenerativavdelingen	22 "
Temperatur ut fra kjøleavdelingen	4 "

Det var planlagt å variere gjennomstrømningen av melk fra 1000 til 3000 liter melk pr. time. Det viste seg at trykktapet økte så kraftig ved øket gjennomstrømning at en ikke oppnådde 3000 liter pr. time med den melkepumpen som var montert. Ved å kople fra isvannsavdelingen ble trykktapet redusert tilstrekkelig til at en oppnådde gjennomstrømning av 3000 liter melk pr. time.



Platepasteuren var bygd for å kunne oppvarmes enten med vakuumdamp eller med sirkulasjon av varmtvann. For oppvarming med varmtvann, var pasteuren dimensjonert for sirkulasjon av 6000 liter pr. time ved 75° C.

Figur 3.1. viser koplings skjema for pasteuren med regenerativ, pasteuravdeling og holdercelle. Målestedene er merket med  $t_1$  til  $t_7$ .

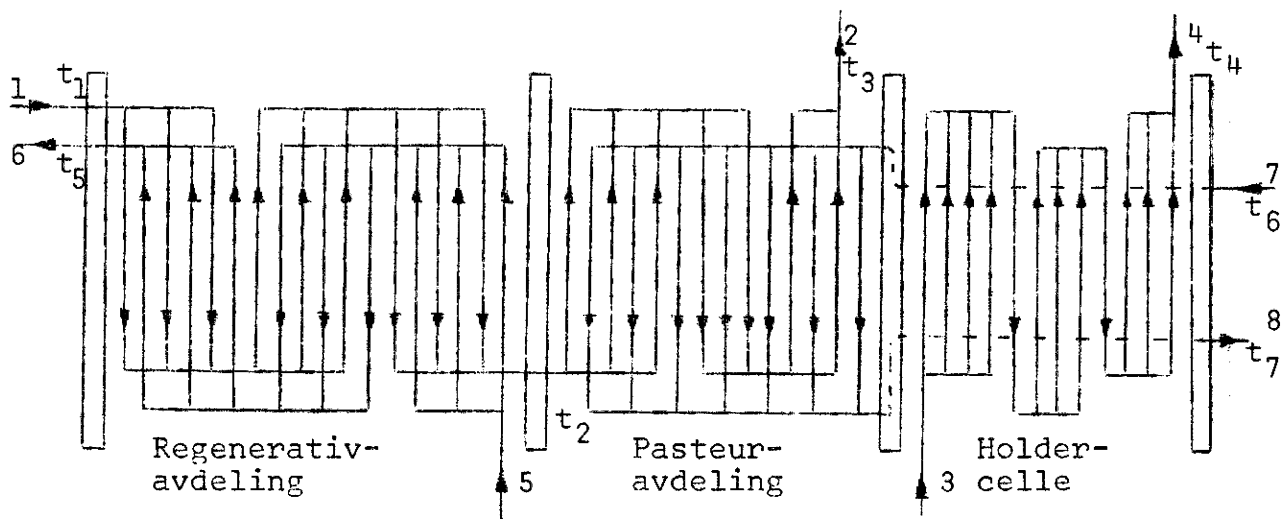


Fig. 3.1. Koplings skjema for platepasteuren.

1. Innløp til regenerativavdelingen
2. Utløp fra pasteuravdelingen
3. Innløp til holdercellen
4. Utløp fra holdercellen
5. Innløp til regenerativavdeling i returløp
6. Utløp fra regenerativavdeling
7. Innløp av varmtvann, vakuumdamp
8. Utløp av " " " " "

Platene var presset av rustfritt stål med tykkelse 0,8 mm. Stålkvaliteten var 18% Crom 12% nikkell og 2% molybden. Stativet og koplingsplatene var kledd med rustfritt stål.

Avdelingene i platepasteuren var koplet på følgende måte:

$$\text{Regenerativavdelingen: } \frac{\text{Melk}}{\text{Melk}} = \frac{3+3+3}{3+3+3}$$

$$\text{Pasteuravdelingen: } \frac{\text{Melk}}{\text{Varmtvann/Vakuumdamp}} = \frac{3+2+2}{7}$$

$$\text{Holdercelle: } \text{Melk} = 4+1+3+1+3$$

Tallene i brøken representerer antall løp som var koplet i parallell. Plusstegnet mellom tallene markerer at det var seriekopling mellom de løpene som var koplet parallelt.

I firmaets katalog finner en data for effektiv heteflate, volum pr. løp mellom to plater osv. De dataene som var av interesse for denne undersøkelsen ble kontrollmålt. Effektiv varmeoverføringsflate pr. plate ble målt til  $0,1359 \text{ m}^2$ .

I følge spesifikasjoner fra fabrikken var varmeoverføringsflaten  $0,14 \text{ m}^2$  og dette flatemålet ble brukt i de senere beregningene. Kontrollmåling av avstanden mellom platene ble utført ved en sammenspenning på 12 mm fra merket for minimal sammenspenning. Ved målinger med modellkitt presset mellom platene viste det seg at avstanden varierte mellom 2,0 og 4,8 mm. Det er hovedsaklig for å sikre turbulent strømming at løpet er utformet på denne måten. En målte også plateavstanden i kjøleavdelingen ved å måle opp det vannet som skulle til for å fylle avdelingen. Volumet av forbindelseskanalene ble beregnet og trukket fra. Volumet av netto hulrom mellom platene var 3,38 liter fordelt på 8 løp.

$$\text{Volumet pr. løp: } \frac{3,38}{8} = \underline{0,422 \text{ liter}}$$

Ved denne sammenpressingen av platene ble forsøkene utført og den midlere avstand mellom platene kan beregnes ut fra de målte data.

$$\text{Den midlere avstand: } \frac{422000 \text{ mm}}{140000} = \underline{3,01 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom pakningene i den rektangulære delen av plate-siden ble målt til 200 mm. På grunnlag av dette kan en beregne den midlere hastighet over platen ved varierende gjennomstrømming. Beregningene er utført for de løp som ble undersøkt. Første og andre løp ved innløpet til pasteuravdelingen og nest siste og siste løp ved utløpet. Ved innløpet var 3 løp koplet i parallell og ved utløpet 2.

I tabell 3.1 finner en derfor to væskestrøms hastigheter i pasteuravdelingen og hastigheten i regenerativavdelingen er den samme som ved innløp til pasteuravdelingen.

Gjennomstrømmet mengde  
Løpstrømsnitt · antall parallelle løp (m/s)

Tabell 3.1. Gjennomsnittlig vækehastighet i løpet mellom to plater på melkesiden, meter pr. sekund.

	Gjennomstrømmet mengde melk				
	1000	1500	2000	2500	3000
Ved innløpet til past.avd. m/s	0,15	0,23	0,29	0,37	0,45
Ved utløpet av past.avd. "	0,23	0,34	0,45	0,56	0,68
Regenerativavdelingen "	0,15	0,23	0,29	0,37	0,45

I pasteuravdelingen var løpene for oppvarming med varmtvann eller vakuumdamp koplet i parallell. Ved varmtvannsoppvarming ble det derfor en væskestrøms hastighet langs platen som vist i tabell 3.2.

Tabell 3.2. Gjennomsnittlig vækehastighet i løpet mellom to plater på varmtvannssiden, meter pr. sekund.

Gjennomstrømmet mengde varmtvann	4000	5000	6000	7000
Gjennomsnittlig vækehastighet m/s	0,25	0,32	0,39	0,45

I tabell 3.3. er den effektive heteflate i hver avdeling gjengitt.

Tabell 3.3. Effektiv heteflate i hver avdeling.

	Antall effektive platesider à 0,14 m <sup>2</sup>	Effektiv varmeoverføringsflate m <sup>2</sup>
Regenerativ tur = returside	17	2,38
Past.avd. melkeside	13	1,82
Past.avd. varmtvannvakuumdampside	13	1,82

Volumet av holdercellen ble kontrollmålt ved å måle volumet av tre parallell-løp ved utløpet. Dette ble utført ved å stenge åpningen ved innløpet til de tre parallell-løpene ved hjelp av en gummiplate og måle opp det volumet vann som gikk med til å fylle løpene samt forbindelsesledningen. Volumet i forbindelsesledningen og åpningen i hjørnene ble beregnet på grunnlag av målte data og trukket fra og volumet av hvert effektivt plateløp ble 0,992 liter. Fabrikantens spesifikasjoner oppgav volumet pr. plateløp til 1,0 liter.

Holdertiden til den raskeste partikkelen ble målt ved hjelp av en metode utviklet av APV, England. Ved innløpet til holdercellen sprøytet en inn ca. 5 cm<sup>3</sup> konsentrert nikkelklorid ved hjelp av en fjærbelastet injeksjonssprøyte. En prøvekran ved utløpet ble innstilt slik at et stativ med 10 prøveglass kunne fylles i løpet av 10 sekunder, dvs. hvert glass skulle fylles i løpet av 1 sekund. Prøveglassene ble fylt med 1 cm<sup>3</sup> oppløsning av dimetylglyoxim. En startet fyllingen av prøveglassene f.eks. 10 sekunder etter at nikkelkloriden ble sprøytet inn. Det antall ufargede glass i stativet pluss 10 ble da holdertiden for den raskeste partikkelen gjennom holdercellen. Det ble målt parallellprøver ved 2000 og 3000 liter pr. time. Ved 1000 liter pr. time ble det målt 3 ganger.

Holdercellens virkningsgrad er forholdet mellom oppholdstiden for den raskeste partikkelen og den midlere teoretiske holdertiden. Når en skal måle holdercellens virkningsgrad, må en imidlertid ta med volumet fra albuen ved innløpet hvor injeksjonssprøyten var plassert, volumet i spaltene pluss volumet i åpningen i hjørnene og volumet av utløpsrøret til albuen med prøvekranen. Volumet av holdercellen mellom albuen ved innløpet og albuen ved utløpet ble beregnet på grunnlag av de 3 målte spaltene ved utløpet til 13,58 liter.

På grunnlag av de målte oppholdstidene for den raskeste partikkelen og den beregnede midlere oppholdstiden, ble holdercellens virkningsgrad beregnet for gjennomstrømning av 1000, 2000 og 3000 liter pr. time. Resultatene er gjengitt i tabell 3.4.

Tabell 3.4. Oppholdstid for den raskeste partikkelen i holdercellen, den midlere teoretiske oppholdstid og holdercellens virkningsgrad.

Gjennomstrømning liter pr. time	Oppholdstid for den raskeste partikkelen i sekunder	Den midlere teoretiske oppholdstid i sekunder	Holdercellens virkningsgrad i prosent
1000	31	47,5	65
2000	16	23,8	67
3000	12	15,9	75

De norske pasteuriseringsforskriftene krever at melk skal oppvarmes til  $70 - 72^{\circ}$  C i minst 15 sekunder. Volumet av holdercellen skal da være minst 1:200 av timeavvirkningen for pasteuren. Måler en rominnholdet fra utløpet fra pasteuravdelingen gjennom holdercellen fram til omløpsventilen, får en et volum på 15,9 liter. Dette tilfredsstiller pasteuriseringsforskriftene for en timeavvirkning på 3000 liter pr. time. Den midlere teoretiske oppholdstiden blir for hele holdercellen 19 sekunder. Holdercellen var derfor rikelig dimensjonert.

#### 4. Beskrivelse av oppvarmingssystemene.

Undersøkelsen omfattet to systemer for oppvarming av melk til pasteuriseringstemperatur. Det ene var oppvarming med varmt vann og det andre var oppvarming med vakuumdamp.

##### 4.1. Pasteurisering ved oppvarming med varmtvann.

Prinsippet for pasteurisering med varmtvann er å anvende varmt vann som varmebærer på den ene siden av en plateinnsats og melk som skal oppvarmes på den andre. Varmtvannet sirkulerer i et lukket system og oppvarmes i dette tilfelle med damp som tilføres vannet direkte gjennom en dampreguleringsventil (4). Oppvarmingssystemet er skissert i figur 4.1.

I figur 4.1. ser en at oppvarminssystemet består av et varmtvannsagregat med pumpe, dampinnblåsningsrør og dampreguleringsventil. Pasteuren er forbundet med varmtvannsagregat

med 51 mm rustfritt rør. I rørledningen er det koplet inn en strupeventil og en gjennomstrømningsmåler av typen "Rota". Måleren var kalibrert for vann ved  $75^{\circ}$  C. Med den monterte pumpen var det mulig å regulere gjennomstrømningen mellom 1000 og 10000 liter pr. time.

Vakuumpumpen for temperaturreguleringen hadde en kapasitet ifølge fabrikanten på 25 liter luft pr. time ved  $0,68 \text{ kp/cm}^2$  vakuum. Dette vakuum var tilstrekkelig til å operere dampreguleringsventil og returventil.

Systemet for dampinnblåsing som var levert i forbindelse med apparatet var svært støyende og det ble derfor bygget om. Innblåsningsrøret etter ombygningen var et 25 mm rustfritt rør med 132 hull med diameter 1 mm. Rundt dette røret var det sentrert et 38 mm rustfritt rør som hadde påsveiset en ring i den ene enden slik at væskestrømmen ble presset mellom dette røret og damprøret. Væskestrømmen fikk på denne måten en hastighetsforandring fra 0,7 til 3,1 meter pr. sekund i det område den møtte dampen.

Dampventilen 8 type SRV-5, var produsert av Alfa-Laval og hadde 13 mm åpning ved ventilsetet. Ventilkjeglen hadde logaritmisk karakteristikk, men ble dreid av slik at formen ble mer spiss. Ventilkarakteristikken ble ikke målt, men kjeglen hadde målene som vist i figur 4.2.

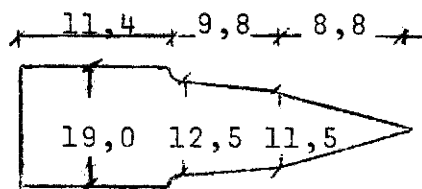


Fig. 4.2. Målsskisse av ventilkjeglen i dampreguleringsventilen.

Maksimal slaglengde på dampventilen ble innstilt til 15,0 mm.

Pasteuriseringstemperaturen ble regulert ved hjelp av regulatoren 5. Regulatoren fikk sin impuls fra føleren i melkestrømmen ut fra pasteuravdelingen. Dampreguleringsventilen ble styrt fra regulatoren ved hjelp av vakuum.

Vakuuemet ble holdt på et tilfredsstillende nivå ved hjelp av vakuumpumpen 10.

Strupeventilen 9 var koplet inn for å ha mulighet til manuelt å regulere vakuuemet i dampreguleringsventilen. Dette var føst og fremst aktuelt dersom vakuumpumpen skulle betjene flere reguleringsventiler.

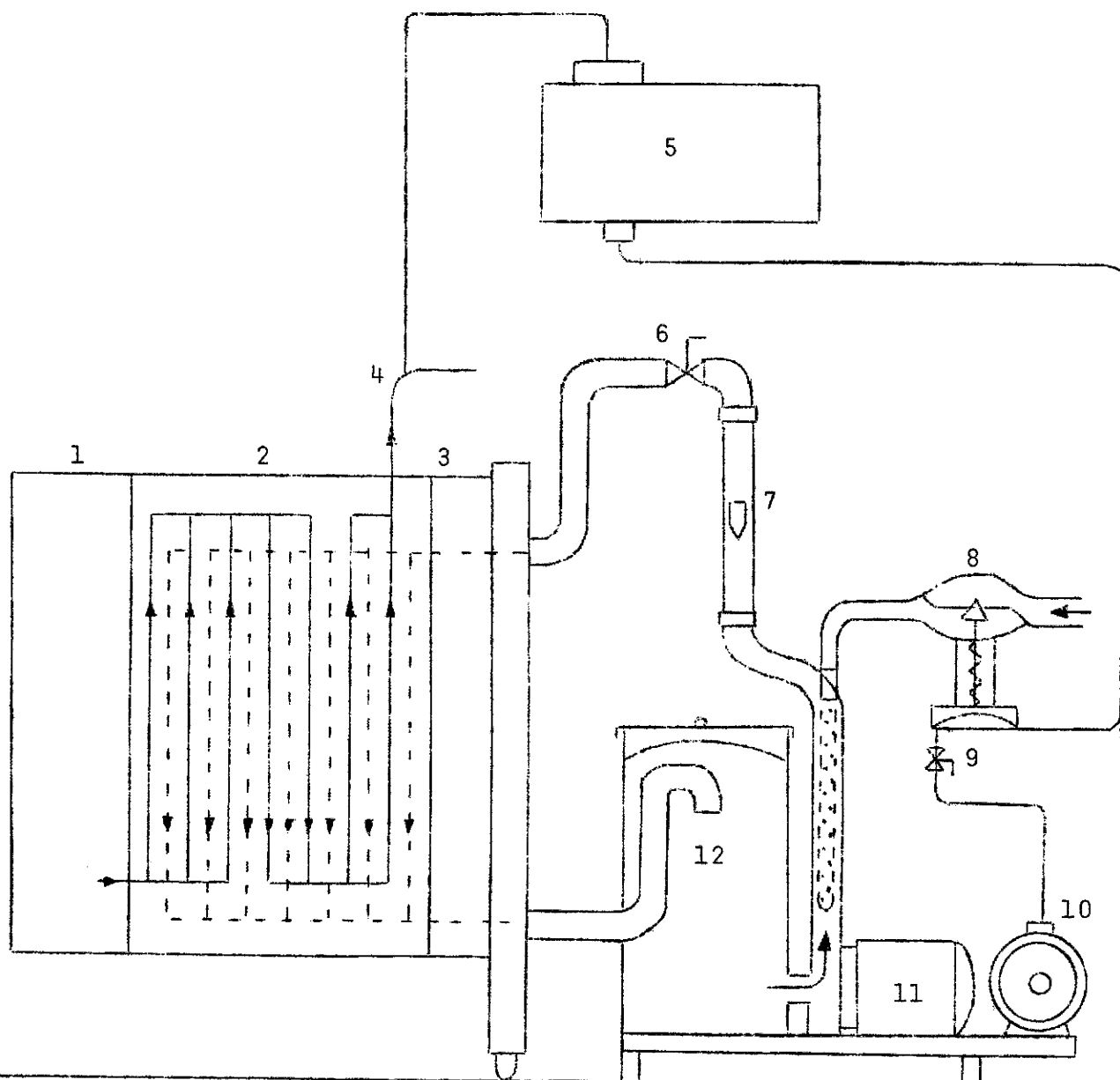


Fig. 4.1. System for pasteurisering ved oppvarming med varmtvann.

- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1. Regenerativavdeling | 7. Gjennomstrømningsmåler |
| 2. Pasteuravdeling     | 8. Dampreguleringsventil  |
| 3. Holdercelle         | 9. Strupeventil           |
| 4. Temperaturføler     | 10. Vakuumpumpe           |
| 5. Regulator           | 11. Varmtvannspumpe       |
| 6. Strupeventil        | 12. Varmtvannsbeholder    |

#### 4.2. Pasteurisering ved oppvarming med vakuumdamp.

Ved pasteurisering med vakuumdamp var platene i pasteuravdelingen koplet på samme måte som ved oppvarming med varmtvann.

Prinsippet for oppvarming med vakuumdamp er at rommet fra dampreguleringsventilen gjennom pasteuravdelingen fram til vakuumpumpen blir satt under vakuum. Vakuumpumpen må være konstruert på en slik måte at den samtidig evakuerer luft og kondens. Vakuumpumpen som ble anvendt ved denne undersøkelsen bygger på ejektorprinsippet og den tilfredsstillende kravene fullt ut.

Dampens temperatur faller etter dampreguleringsventilen til den temperatur som svarer til trykket i pasteuravdelingen. For å unngå at dampen blir overopphetet var det koplet inn en dyse som fører inn kondensat fra vakuumpumpen inn i dampen rett etter at den har passert dampreguleringsventilen. Den fuktige dampen passerer deretter platene i pasteuravdelingen og blir ytterligere avkjølt av melken som skal oppvarmes. Vakuumdampen kondenserer derfor på platene og avgir varme til melken. Oppvarmingssystemet er skissert i fig. 4.3.

Figur 4.3. viser at regulatoren arbeider på samme måte som med varmtvann. Dampreguleringsventilen kan i dette tilfelle plasseres så nær innløpet til pasteuravdelingen som det er praktisk mulig å montere den.

Vakuumpumpen, type VAD3, var produsert av Alfa Laval. Den arbeider etter ejektorprinsippet. En pumpe sirkulerer vann gjennom tre dyser. Vakuomet oppstår ved den trangeste delen i ejektoren. På grunn av at vakuumpumpen suger varmt kondensat og at pumpearbeidet og friksjonstap blir overført til varme i vannet, må vakuumpumpen kjøles. Det er derfor innebygget en kjølespiral i vanntanken og temperaturen på det sirkulerende vannet bør være minst  $20^{\circ}$  C lavere enn temperaturen til vakuumdampen for å oppnå tilfredsstillende vakuum.



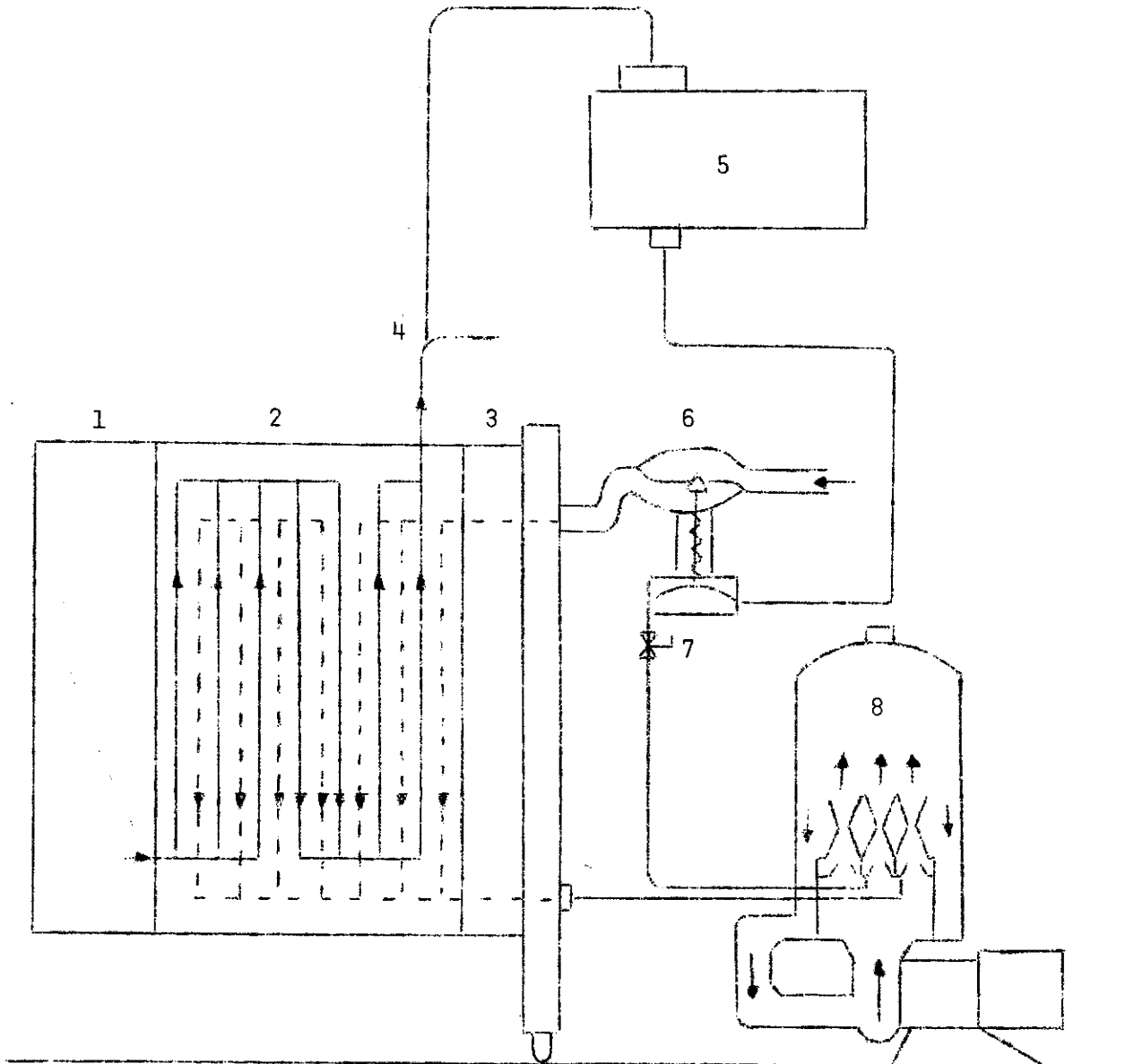


Fig. 4.3. System for pasteurisering ved oppvarming med vakuumdamp.

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Regenerativavdeling | 5. Regulator             |
| 2. Pasteuravdeling     | 6. Dampreguleringsventil |
| 3. Holdercelle         | 7. Strupeventil          |
| 4. Temperaturføler     | 8. Vakuumpumpe           |

5. Beskrivelse av regulatoren.

Temperaturregulatoren var av typen TC-1 produsert av Alfa Laval AB (2). Den var konstruert for å arbeide sammen med en dampreguleringsventil som arbeidet ved hjelp av vakuum. Figur 5.1. viser en skisse av regulatoren som arbeidet etter dyse-klaff systemet.

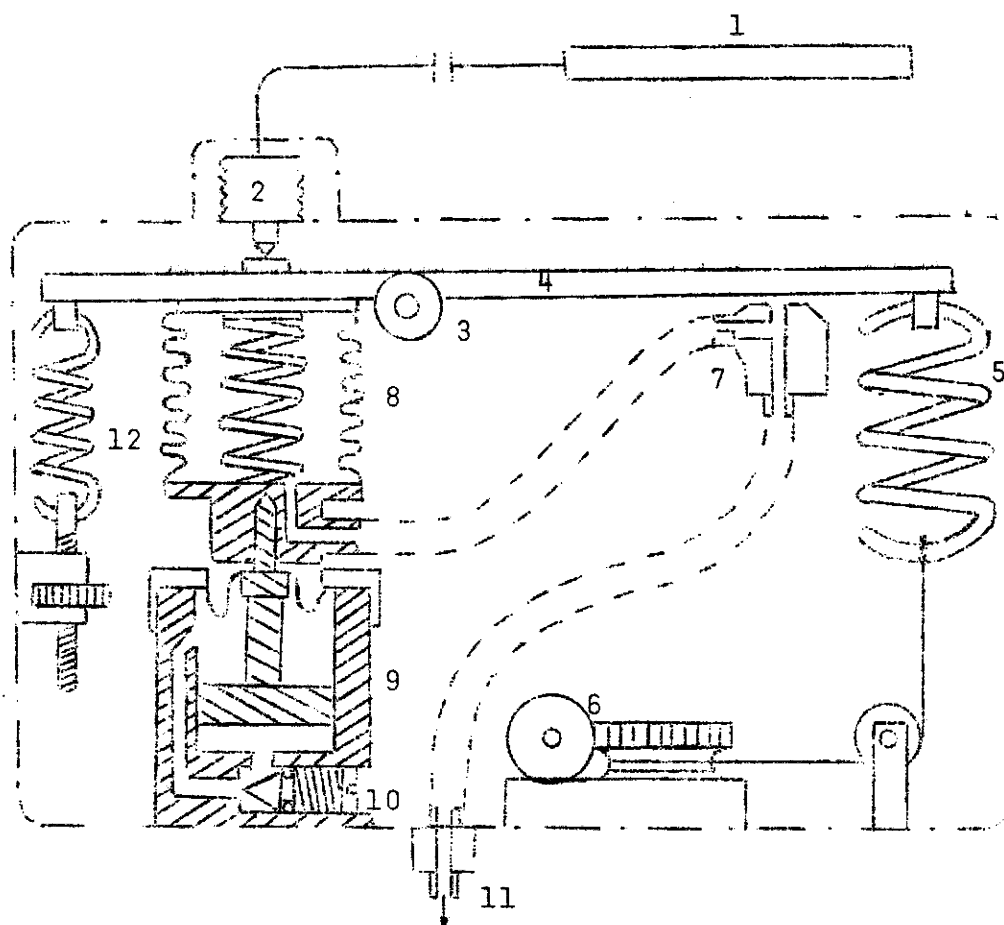


Fig. 5.1. Regulator type TC 1 med ønskeverdisammenligninger.

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1. Føler med kapillarrør          | 7. Munnstykke for luftinnslipp                |
| 2. Ekspansjonsbelg                | 8. Tilbakeføringsbelg med fjær                |
| 3. Opplagringspunkt               | 9. Dempningssylinder                          |
| 4. Arm som er dreibar om punkt 3. | 10. Nålvntil med skruespindel                 |
| 5. Fjær                           | 11. Vakuumrør til dampreguleringsventilen     |
| 6. Temperaturinnstilling          | 12. Skalaajusteringsfjær med skrueinnstilling |

Føleren er utformet av rustfritt stål og plassert direkte i væskestrømmen mellom pasteuråvdelingen og holdercellen. Føleren og kapillarrøret frem til ekspansjonsbelgen er fylt med en lett flyktig væske som har et damptrykk som varierer med temperaturen i melken. Ekspansjonsbelgen 2 påvirker armen 4 ved hjelp av en trykkspiss. På den andre siden av opplagringspunktet 3 hviler armen mot munnstykket for luftinnslipp 7 som er forbundet med vakuumkanmeret på dampreguleringsventilen. Armens avstand fra dette munnstykket bestemmer hvor mye luft som slippes inn i systemet. Derved endres dampreguleringsventilens manøverbakuum og ventilens posisjon. Luft tilføres regulatoren gjennom et filter i instrumentkassens bunn. På den siden munnstykket for luftinnslipp er montert, er armen forbundet med en fjær 5. Denne fjærens strekkkraft kan innstilles ved hjelp av en reguleringssskrue. Til regulerings-skruen er det montert en temperaturskala. Nullstilling av skalaen innstilles ved fjæren 12. Slakkes fjæren 12 øker væsketemperaturen i forhold til skalaen og strammes fjæren synker temperaturen. På hevarmen under følersystemets trykkspiss er det montert en tilbakeføringsbelg 8 med en fjærinnsats. Denne belgen er forbundet med munnstykket for luftinnslipp med en plastslange. Under tilbakeføringsbelgen er det montert et dempeledd utformet som en sylinder med stempel. Dempeleddet er fylt med olje. Det har variabel dempning som kan innstilles ved hjelp av nåleventilen 10.

Dampreguleringsventilen åpner for damptilførselen når det er oppnådd tilstrekkelig vakuum i systemet. Tilføres luft til dampreguleringsventilen, minker vakuomet og ventilen stenger.

Den ønskede temperatur innstilles ved fjærstrekket i fjæren 5 som presser armen 4 mot munnstykket for luftinnslipp. Mot dette fjærtrykket virker summen av tre krefter ved andre enden av armen, nemlig skalajusteringsfjæren 12, motkopplingsbelgen 8 og trykkspissen fra følersystemet.

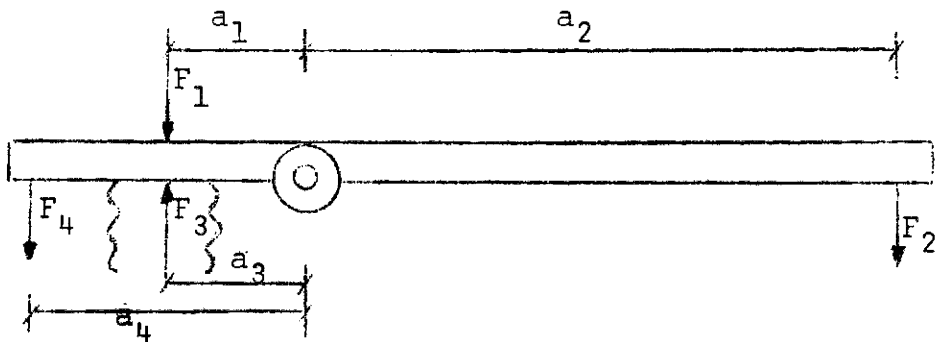


Fig. 5.2. Skisse som beskriver kreftene som virker på armen 4 i regulatoren.

I fig. 5.2. representerer  $F_1$  følerspissens trykk,  $F_2$  strekk-kraften i fjæren 5,  $F_3$  trykk-kraften i motkopplingsbelgen 8 og  $F_4$  strekk-kraften i fjæren 12. Kraftsystemet virker som en ønskeverdisammenligner. Den ønskede temperatur blir innstilt ved  $F_2$  og dersom likevekt oppnås må kreftene tilfredsstillende ligningen.

$$(1) \quad F_2 \cdot a_2 = F_1 \cdot a_1 + F_4 \cdot a_4 - F_3 \cdot a_3$$

Kreftene  $F_4$  og  $F_3$  er fast innstilt. Ønskeverdien innstilles ved  $F_2$  og den variable pasteuriseringstemperaturen er omsatt til kraften  $F_1$ . Går en ut fra stabil tilstand og øker  $F_1$  på grunn av temperaturstigning i melken, heves armen på høyre side og mer luft slipper inn i dampreguleringsventilens vakuumkanter. Vakuomet synker og ventilens spindel beveger seg i retning av stengt posisjon. Mot kraften  $F_1$  virker  $F_3$  som forhindrer at  $F_1$  gjør for store utslag som fører til store svingninger i temperaturen. Etter kort tid minker kraften  $F_1$  og armens høyre side går ned og stenger for luftinnsippet. Dette fører til at dampventilen åpner for mer damp. Dette skulle teoretisk føre til en svingning i pasteuriseringstemperaturen. For å motvirke dette er det i tillegg til fjærkraften  $F_3$  koplet inn en vakuummotkoppling i belgen 8. Mellom munnstykket 7 og belgen 8 er det dessuten en forsnevring som fører til en tidsforsinkelse for tilbakekoplingen. Når armen 4 har stengt for luftinnslipp øker også vakuomet i belgen 8 og når vakuumkraften er blitt større enn  $F_3$ , heves armen 4 i høyre side og slipper

mer luft inn. Dette fører til en svingning i utgangssignalet fra regulatoren som virker inn på dampventilen på en slik måte at ventilspindelen svinger kontinuerlig. På denne måten unngår en ulempene med å overvinne den statiske friksjon hver gang ventilspindelen har stått stille. For å hindre at denne svingningen skal innvirke på likevektstilstanden i kreftene rundt armen 4 er det under motkoplingsbelgen montert et dempeledd. Dette er innkoplet for at hurtige variasjoner ikke skal forstyrre likevektstilstanden. For at stemplet i dempnings-sylinderen skal kunne bevege seg, må oljen presses forbi nål-ventilen 10. Strupningen er innstilt slik at den hurtige svingning som forårsakes av tilbakeføringsbelgen foregår over dempnings-sylinderen. Ved rett innstilling skal svingningene være 1-2 perioder pr. sekund. Når en ny pasteuriseringstemperatur ønskes innstilt, må først dempningsstempelet presse oljen forbi nålventilen 10 før ny likevektstilstand kan oppnås. Reaksjonshastigheten ved temperaturforandring innstilles således ved nålventilen 10 uten at følsomheten derved minskes.

I figur 5.3. er TC regulatorens deler stilt opp i et blokkdiagram som viser den interne påvirkning av de forskjellige komponenter.

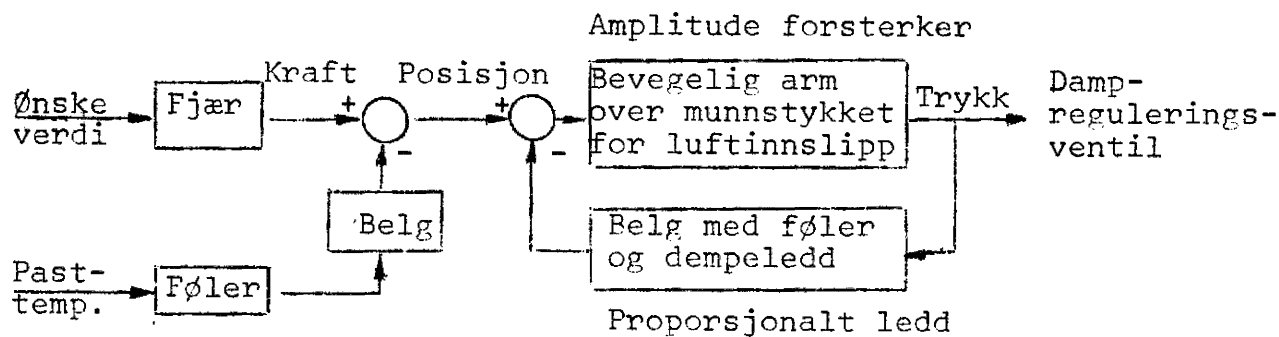


Fig. 5.3. Regulatorens enkelte deler stilt opp i blokkdiagram.

## 6. Målemetoder.

### 6.1. Væskestrømsmåling.

Til væskestrømsmålingen ble det brukt to stykker gjennomstrømningsmålere av typen "Rotameter" som hadde skala hvor en kunne avlese direkte gjennomstrømmet volum pr. tidsenhet (liter pr. time).

Rotameteret hører inn under gruppen målere som bygger på det fysiske grunnlaget at det eksisterer en sammenheng mellom det dynamiske trykket i en væske og strømningshastigheten (26). Denne sammenheng er uttrykt i Bernoullis ligning for ideelle væsker. I rotametrene har en konstant trykkfall over forsnevringen, men arealet rundt den varierer. Figur 6.1. viser en prinsippskisse av et rotameter.

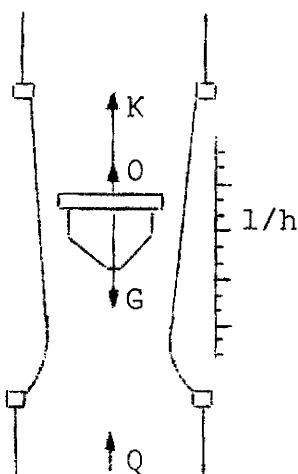


Fig. 6.1. Skisse av et rotameter.

Rotametrene består av et konisk glassrør som væsken strømmer nedenfra og opp igjennom. Røret inneholder et målelegeme utformet av rustfritt stål slik som skissen viser. Legemet har en konisk form med spissen vendt mot væskestrømmen. I den øverste kanten er det presset inn skråstilte spalter som er årsak til at målelegemet roterer når det strømmer væske gjennom. Dette er hovedsakelig gjort for at legemet skal flyte i væskestrømmen så rolig som mulig slik at en ved å sikte over toppen kan avlese gjennomstrømningen relativt sikkert.

Målelegemet stiller seg inn på grunn av en likevekt som oppstår mellom kreftene som virker på det:

$$(2) \quad G = K + 0$$

$$(3) \quad V \cdot s_K = C_W \cdot F \frac{v^2}{2g} + V \cdot s_M$$

hvor  $V$  = legemets volum ( $\text{dm}^3$ )

$s_K$  = legemets spesifikke vekt ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$s_M$  = væskens " " ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$C_W$  = konstant avhengig av legemets form ( $\text{kp}/\text{dm}^3$ )

$F$  = legemets tverrsnitt loddrett på væskestrømmen ( $\text{dm}^2$ )

$v$  = væskestrømmens hastighet ( $\text{dm}/\text{s}$ )

$g$  = tyngdens aksellerasjon ( $\text{dm}/\text{s}^2$ )

Av denne ligning ser en at den eneste variable størrelse er væskens hastighet  $v$ . Målelegemets posisjon er altså et mål for 2. potens av væskestrømmens hastighet:

$$(4) \quad h = k \cdot v^2$$

hvor  $h$  = legemets posisjon

$k$  = konstant

$v$  = væskestrømmens hastighet

Gjennomstrømningen er dessuten avhengig av tverrsnittet i måleren og sammenhengen er:

$$r = k_1 \cdot h$$

hvor  $r$  = radien i målerøret

$k_1$  = konstant avhengig av konusens åpningsvinkel

$h$  = legemets posisjon

Tverrsnittet av målerøret ved målelegemets posisjon  $h$  er:

$$(5) \quad F = \pi \cdot r^2 = \pi k_1^2 \cdot h^2$$

$$(6) \quad \text{og } h = \sqrt{\frac{F}{k_1^2}}$$

At utslaget  $h$  er avhengig av kvadratet av hastigheten  $v$  og samtidig av kvadratrotten av målerørets tverrsnitt gjør at skalaen for gjennomstrømningsmengden tilnærmet blir lineær.

Det ene rotameteret var plassert i melkestrømmen mellom melkepumpa og pasteureren. Det hadde et måleområde på 600 - 6000 liter pr. time med delestrek hver 50 liter pr. time.

Rotameteret var på forhånd kalibrert for vann med temperatur på 20° C. Vannets inngangstemperatur ved forsøkene varierte mellom 3 og 4° C og rotameteret ble derfor kalibrert i dette temperaturområdet ved gjennomstrømning av 1000 - 1500 - 2000 - 2500 og 3000 liter pr. time. Til kalibreringene ble det brukt et justert 100 liters målespann. Det ble tatt kontrollprøve før og etter at pasteuriseringsprøvene var over, 10 ganger ved hver kapasitet og en fant aldri avvik på mer enn  $\pm 10$  liter pr. time. Dette viser at en kunne regne med at nøyaktigheten på målingene lå innenfor  $\pm 1\%$  ved 1000 liter pr. time og  $\pm 0,3\%$  ved 3000 liter pr. time.

Det andre rotameteret var plassert i varmtvannssystemet med måleområdet 1000 - 10000 liter pr. time. Rotameteret var kalibrert både ved 20 og 75° C. Det hadde en skala som var kalibrert ved 75° C. Temperaturen varierte under prøvene fra 71 - 77° C og denne variasjon ble det ikke korrigert for. På selve måleglasset var det avsatt en millimeterskala til bruk ved kalibrering av rotameteret. I forhold til denne skalaen og fabrikantens kalibreringstall, ble det foretatt en kontroll. Målingen ble utført ved 4° C og kapasitet 4000 liter pr. time. Det viste seg at fabrikantens kalibrering var like pålitelig ved denne måleren som kalibreringen ved melkerotameteret.

## 6.2. Trykkmålinger.

Trykk er definert som kraft pr. flateenhet og de fleste trykkmålere er basert på måling av kraften som virker på en kjent flate (26).

De trykkmålerne som ble brukt ved denne undersøkelsen var av type med bourdonrør. Bourdonrøret består av et flatklemmt rør formet som en stor C. Enden på røret er tettet og når det påvirkes av trykk i den andre enden, vil røret forsøke å rette seg ut. Dette medfører en bevegelse i den tette enden som kan overføres ved hjelp av mekaniske ledd til en viser.



Skalaen på de manometrene som ble anvendt var 0-4 kp/cm<sup>2</sup> og 0-6 kp/cm<sup>2</sup>. Skalaen hadde delestrek hver 0,1 kp/cm<sup>2</sup> så avlesning med to desimaler var noe usikker, men ble likevel gjennomført. Manometrene som ble brukt, var av klasse 1,0 og samtlige ble kalibrert mot et presisjonsmanometer av klasse 0,6. Målernøyaktigheten kan derfor maksimalt variere mellom  $\pm 0,6\%$  av full skalaverdi. Presisjonsmanometeret hadde et måleområde på 1-16 kp/cm<sup>2</sup> med et variasjonsområde på  $\pm 0,1$  kp/cm<sup>2</sup>. Skalaene på de anvendte manometrene hadde vesentlig mindre område, og derfor ble nøyaktigheten større for disse selv om klassen var 1,0. Kalibreringen ble utført mot presisjonsmanometeret fordi dette var levert med justerbevis. Manometerskivens diameter var for samtlige manometre 135 mm.

Når en skal måle trykkfallet over en avdeling i platepasteuren, må en ta hensyn både til det statiske og til det dynamiske trykket. Det statiske trykket målte en som kp/cm<sup>2</sup> overtrykk med de beskrevne manometrene. Det dynamiske trykket avhenger av strømningshastigheten etter ligningen

$$(7) \quad P_d = \frac{v^2}{2g} s \text{ mVS}$$

hvor  $P_d$  = dynamisk trykk (mVS)

$v$  = væskens strømningshastighet (m/s)

$s$  = væskens spesifikke vekt (kg/dm<sup>3</sup>)

$g$  = tyngdens aksellerasjon (m/s<sup>2</sup>)

Den laveste gjennomstrømningshastigheten i pasteuravdelingen ble beregnet til 0,15 meter pr. sekund. Det dynamiske trykket utgjorde da 0,00115 kp/cm<sup>2</sup>. Ved den høyeste gjennomstrømningshastigheten som ble målt til 0,68 meter pr. sekund, utgjorde det dynamiske trykket 0,0236 kp/cm<sup>2</sup>. På grunn av de lave verdiene for det dynamiske trykket, ble det besluttet å se bort fra dette ved målingene av trykkfallet over de enkelte avdelingene i platepasteuren.

Vakuummeterne som ble brukt var også av typen med bourdonrør. De var gradert fra 0 - 1,0 kp/cm<sup>2</sup> med inndeling hver 0,1 kp/cm<sup>2</sup>. Etter dampventilen ble det ved pasteurisering med vakuumdamp brukt kombinert vakuummeter. Det hadde inndeling fra 0 - 1,0 kp/cm og fra 0 - 1,0 kp/cm.

Skalaskivens diameter var 120 mm og inndelingen var hver  $0,1 \text{ kp/cm}^2$ . Med det utstyret som støttil rådighet viste det seg svært vanskelig å kalibrere disse instrumentene. Resultatene ble da også bare brukt til orientering og ikke som del i beregninger.

### 6.3. Temperaturmålinger.

Maxwell definerte i sin tid temperaturen til en gjenstand som den termiske tilstand den har i forhold til dens evne til å utveksle varme til andre gjenstander. Dersom en gjenstand ikke er i stand til å utveksle varme til andre gjenstander, sier en at de er i termisk likevekt og da har de samme temperatur.

Et mål for denne temperaturtilstanden kan en skaffe seg ved hjelp av forskjellig utstyr og en fastsatt temperaturskala(26).

I denne undersøkelsen ble temperaturen målt i grader Celsius med kvikksølv glass termometer og kobber-konstantan termoelement.

Det ble anvendt to typer glasstermometere. Den ene typen hadde skalaområde på  $-10 - 100^{\circ} \text{ C}$  med gradering hver  $0,5^{\circ} \text{ C}$ . Skalaens lengde varierte fra 190 - 205 mm. Den andre typen hadde vesentlig nøyaktigere skalainndeling med delestrek for hver  $0,1^{\circ} \text{ C}$ . Skalaområde var fra  $-10 - 100^{\circ} \text{ C}$ . Skalaens lengde varierte fra 392 - 433 mm. Alle termometrene hadde en blå stripe bak på kapillarrøret som gav kvikksølv søylen en blå farge. Alle kvikksølvtermometrene ble kalibrert mot et normalkvikksølvtermometer. Dette termometeret hadde en skalalengde på 418 mm, måleområde  $0 - 100^{\circ} \text{ C}$  og inndeling hver  $0,1^{\circ} \text{ C}$ . Normaltermometeret var justert til klasse 0,02. Derfor kunne en med sikkerhet regne med at målingene med  $0,1^{\circ} \text{ C}$  termometrene lå innenfor  $\pm 0,05^{\circ} \text{ C}$  og målingene med  $0,5^{\circ} \text{ C}$  termometrene lå innenfor  $\pm 0,25^{\circ} \text{ C}$ . Kalibreringen av termometrene ble utført i en Haake Ultratermostat som ble oppvarmet elektrisk og hadde både røreverk og sirkulasjonspumpe.

Temperaturfordelingen over platene inne i platepasteuren og temperaturvariasjon i røret ut fra pasteuravdelingen ble målt med kobber konstantan termoelementer.

Måling av temperatur med termoelementer bygger på et samspill mellom to fysiske effekter som hver er oppkalt etter den fysiker som oppdaget fenomenet. Føyer en sammen to metalltråder av forskjellig materiale som vist i figur 6.2. og stikker den ene sammenføyningen ned i isvann samtidig som en varmer opp den andre, vil et galvanometer koplet inn i kretsen vise at det går strøm i kretsen. Denne strømmen skrives fra en differanse mellom de to spenningene som oppstår i sammenføyningene. Spenningen kalles termospenning og er et mål for temperaturforskjellen mellom de to skjøtene.

Den termoelektriske effekt ble oppdaget av Seebeck allerede i 1821. Peltier påviste at den delvis skyldes en berøringseffekt mellom to forskjellige materialer, mens Thomson påviste at i en metalltråd som varmes i den ene enden oppstår det en potensialforskjell mellom endene. Den termoelektriske effekt er derfor et samspill mellom Peltiereffekten og Thomsons effekten.

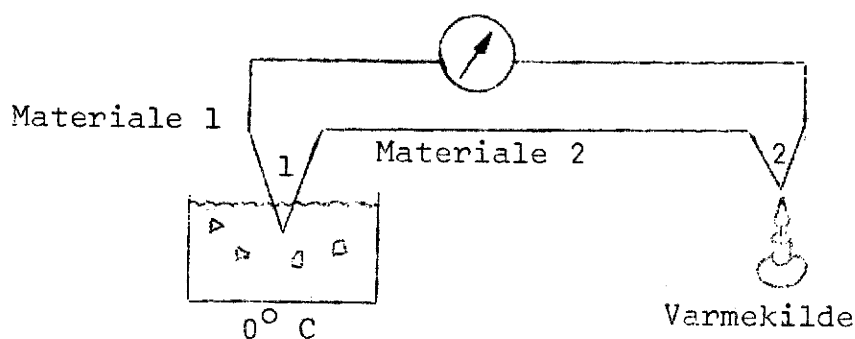


Fig. 6.2. Termoelementkopling til måling av termoelektrisk effekt.

Termoelementtråden var 0,5 mm tykk og plastisolert. Termoelementene ble loddet sammen ved å dyppe endene ned i smeltet sølvlodd tilstrekkelig lenge til at sølvlodden bet på termoelementtråden. En fikk på denne måte 2-3 mm lange skjøter i termoelementet. Likevel har disse elementene en meget liten masse og reagerer raskt på temperaturvariasjoner.

Det ble nyttet to typer instrumenter til temperaturmålingene med termoelementer. Den ene var en diskontinuerlig skriver produsert av Honeywell Controls Limited med typebetegnelsen "Type 153 Universal Elektronisk Multipoint Potentiometer".

Instrumentet hadde 24 tilkoplingspunkter. I følge fabrikantens spesifikasjoner var instrumentet av klasse 1,5, men samtlige termoelementer ble kontrollert før og etter hver prøve mot et justert kvikksølvtermometer. Kalibreringen av instrumentet var enkel å utføre og maksimalt avvik fra kontrolltermometeret ble målt til  $\pm 0,25^{\circ}$  C. Kontrollen ble utført i temperaturområdet  $0 - 10^{\circ}$  C og  $60 - 70^{\circ}$  C. Måleområdet til skriveren var  $0 - 4,3$  mV eller  $0 - 100^{\circ}$  C. Diagrampapiret hadde en inndeling for hver  $0,5^{\circ}$  C og skalaens bredde var 280 mm. Temperaturen ble trykt på papiret som et kryss med tilhørende termoelementnummer ved siden av. Målehastigheten kunne innstilles på 2 hastigheter. Ved høy hastighet ble samme termoelement målt hver 2,4 minutter og ved lav hastighet hver 14,4 minutter.

Det andre instrumentet var en kontinuerlig skriver som bare kunne måle et termoelement. Det hadde typebetegnelsen "Speedomax W" produsert av Leeds & Northrup Ltd. Dette instrumentet måtte en kople inn i en målekrets som målte differansepenningen mellom et referanse termoelement og det termoelementet som målte det observerte målepunktet. I dette tilfellet ble det anvendt  $0^{\circ}$  C (isbad) som referansepunkt. Måleområdet var da  $0 - 10$  mV eller  $0 - 214^{\circ}$  C. Det var delestrek hver 0,1 mV. Målingene ble utført i temperaturområdet  $65 - 80^{\circ}$  C og i dette området var det ca.  $2,2^{\circ}$  C mellom hver delestrek. Dette instrumentet var derfor ikke noe presisjonsinstrument. Det som var av interesse å måle var ikke absolutt temperatur, men variasjonene i frekvens og amplitude. Papirhastigheten kunne varieres i 10 trinn fra 0,6 til 600 tommer pr. time. Ved denne undersøkelsen ble papirhastigheten 12 tommer pr. time brukt. Når en skal måle frekvensen på svingningene i temperaturen fra diagrampapiret er det nødvendig å kjenne papirhastigheten nøyaktig. Papirhastigheten ble kontrollmålt til 12,35 sekunder pr. millimeter. Måleinstrumentet ble kontrollmålt mot et justert kvikksølvtermometer.

En egenskap som er felles for alle temperaturmåleinstrumenter, er den tid det tar før instrumentet viser den riktige temperatur etter at temperaturføleren har vært utsatt for en hurtig forandring. Denne tregheten måles i en enhet som

kalles tidskonstant og kan utledes matematisk under følgende forutsetninger.

Temperaturføleren blir utsatt for et temperatursprang fra  $t_0$  til  $t_1$  ° C. Dersom diameteren til føleren er liten og varmeledningsevnen til materialet i føleren er høy, kan en se bort fra temperaturgradienter i varme eller avkjølingsperioden. Under disse forutsetningene kan en beregne den overførte varmemengde fra det omgivende medium til temperaturføleren som er lik temperaturen til føleren multiplisert med dens masse og varmekapasitet.

$$(8) \quad \alpha \cdot F \cdot (T_v - T) dt = G \cdot c \cdot dT$$

hvor  $\alpha$  = varmeovergangstall (kcal/m<sup>2</sup>h° C)

F = følerens overflate (m<sup>2</sup>)

$T_v$  = det omgivende mediums temperatur (° C)

T = følerens temperatur (° C)

G = følerens masse (kg)

c = følerens varmekapasitet (kcal/kg)

t = tid (sek)

Differensialligningen er lineær med konstante koeffisienter og av 1. orden. Ligningen er separabel og kan integreres direkte.

$$(9) \quad \text{Setter en } \frac{\alpha F}{G \cdot c} = \frac{1}{\lambda} \text{ får en:}$$

$$(10) \quad dT = \frac{1}{\lambda} (T_v - T) dt$$

$$\text{eller, } \frac{dT}{T_v - T} = \frac{1}{\lambda} dt$$

Integrerer og får:

$$-\frac{1}{T_v - T} \ln(T_v - T) = \frac{t}{\lambda}$$

$$\ln(T_v - T) = -\frac{t}{\lambda}$$

Tar antilogaritmen på begge sider av likhetstegnet og får:

$$T_v - T = C e^{-\frac{t}{\lambda}}$$

En finner C ved å sette  $t = 0$ .

$$C = T_v - T_0$$

$$(11) \quad T_v - T = (T_v - T_o) e^{-\frac{t}{\lambda}}$$

Her er tidskonstanten  $\lambda$  og en finner den ved å sette  $\lambda = t$ .

$$(12) \quad T_v - T = (T_v - T_o) 0,368$$

Denne ligningen viser at tidskonstanten er den tiden som medgår til å redusere temperaturforskjellen mellom temperaturføleren og det medium den eksponeres for til 36,8prosent av den differansen en hadde ved tiden  $t = 0$ . Tidskonstanten defineres også som den tid temperaturføleren trenger for å tilbakelegge 63,2 prosent av temperaturdifferansen ved  $t = 0$ .

Av ligningen 9 ser en at tidskonstanten  $\lambda$  er proporsjonal med følerens masse og varmekapasitet og omvendt proporsjonal med følerens overflate og varmeovergangstallet  $\alpha$ . Dette medfører at tilstanden til følerens omgivende medium har stor betydning for størrelsen av tidskonstanten.

Tidskonstanten for de anvendte kvikksølvtermometrene ble målt ved å stikke dem gjennom en gummimembran inn i væskestrømmen i sirkulasjonssystemet for varmtvann. Temperaturen i vannet ble holdt på  $60^{\circ}$  C. Temperaturdifferansen en målte over var  $40^{\circ}$  C fra  $20^{\circ}$  til  $60^{\circ}$  C. Tidskonstanten ble målt ved den laveste og høyeste gjennomstrømshastigheten en hadde ved undersøkelsen. I tabell 6.1. er de målte tidskonstantene gjengitt. Tiden ble målt med stoppeklokke med 1 sekunds inndeling og resultatene er gjennomsnitt av fire gjentak.

Tabell 6.1. Tidskonstanten for de anvendte kvikksølvtermometrene ved laveste og høyeste gjennomstrømningshastighet.

	Tidskonstanten i sekunder		
	I melkeløpet 38,1 mm rør		I varmtvannsløpet 50,8 mm rør
Gjennomstrømning liter pr. time	1000	3000	8000
Strømningshastighet meter pr. sekund	0,28	0,83	1,23
Termometer med $0,5^{\circ}$ C inndeling	2,5	2,2	2,0
Termometer med $0,1^{\circ}$ C inndeling	3,0	2,5	2,4

I tabell 6.1. ser en at det var relativt liten forskjell på tidskonstanten ved variasjon i gjennomstrømningshastigheten.

I varmtvanns- og melkeledningene var termometrene plassert i termometerlommer. Termometerlommene var laget av rustfritt stålrør med utvendig diameter på 12,0 mm og godstykkelse 1,0 mm. Termometerlommene ble laget ca. 40 mm lange og i vertikale rør ble de skråstillet med ca.  $33^\circ$  i forhold til rørets lengdeakse. Tidskonstanten for en termometerlomme ble kontrollmålt ved å stikke et termometer med  $0,1^\circ$  C inndeling ned i et 60 mm langt rør som var loddet igjen i den ene enden. Røret ble fylt med glyserin og stukket 45 mm ned i vann i en Haake Ultratermostat. Målinger av tidskonstanten i termostaten uten termometerhylse, viste at røreverket laget en strømningshastighet i vannet som tilsvarte 0,28 meter pr. sekund. Ved denne strømningshastigheter målte en tidskonstanten til 18 sekunder, når termometeret med  $0,1^\circ$  C inndeling var plassert i termometerlommen.

#### 7. Driftsforhold som gir ustabil regulering.

Reguleringssystemet ble prøvd under forhold som normalt blir anvendt i praksis. Ved pasteuriseringen ble det av praktiske grunner brukt vann istedet for helmelk. Undersøkelsen tok sikte på å klarlegge innen hvilke driftsforhold en kunne operere for å oppnå stabil regulering. Det ble foretatt en sammenligning mellom oppvarming med varmtvann og vakuumdamp.

Pasteuriseringstemperaturen ble målt ved hjelp av termoelement kobber-konstantan inne i røret som forbandt pasteuravdelingen med holdercellen fig. 7.10. Termoelementtråden ble ført inn i røret gjennom en gummikork. Korken ble holdt på plass i en hylse med utvendige gjenger. Hylsen var sveiset på røret og utenpå den var det skrudd på et lokk med hull for termoelementtråden. Ved hjelp av dette lokket kunne en presse korken sammen og holde åpningen tett.

### 7.1. Generell beskrivelse av regulering i forbindelse med pasteurisering.

Før det spesielle reguleringsforløpet vedrørende pasteurisering blir beskrevet, vil det bli redegjort for det generelle reguleringsstilfellet (13).

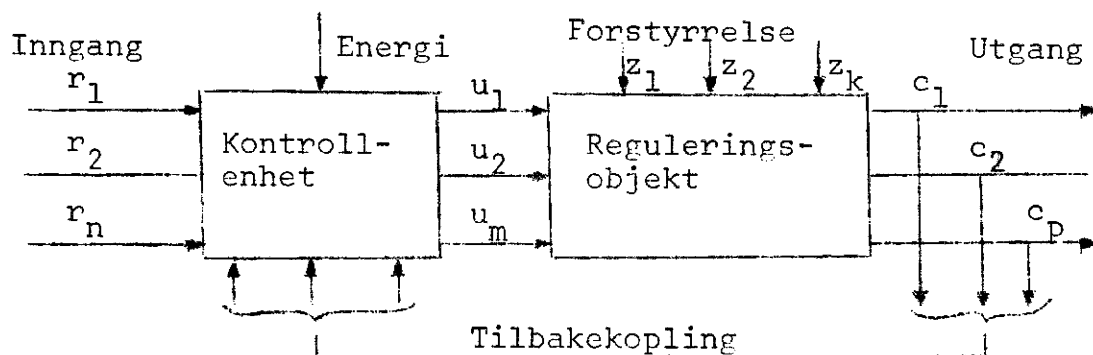


Fig. 7.1. Generelt blokkdiagram for et regulerings-system.

Inngangen i systemet kan være en eller flere variable  $r_1$  --  $r_n$  som holdes konstant. Kontrollenhetens oppgave er å påvirke reguleringsobjektet på en slik måte at de utgangsvariable også holdes konstant. En kaller et slikt system for reguleringsssystem og de inngangsvariable kalles ønskeverdi. Dersom de inngangsvariable forandrer seg med tiden og det er ønskelig at de utgangsvariable følger variasjonene, har en et servosystem.

Kontrollenheten består av en ønskeverdisammenligner, en regulator og et pådragsorgan som sørger for å tilføre reguleringsobjektet den nødvendige energi. Kontrollenheten overfører denne energien i form av de styrevariable  $u_1$  ---  $u_m$  til reguleringsobjektet.

Reguleringsobjektet blir også normalt utsatt for forstyrrelser som er tegnet med  $z_1$  ---  $z_k$ .

Utgangen fra systemet  $c_1$  ---  $c_p$  blir målt med en føler. Føleren er en omsetter som er karakterisert ved at den, basert på en fundamental fysikalsk sammenheng, under påvirkning av utgangstilstanden gir et signal som kan nyttes som mål for



tilstanden. Føres dette signalet tilbake til kontrollenheten har en et tilbakekoplet system som også blir kalt negativ tilbakekopling. Med det forstås en at tilbakekoplingen har en slik virkning på et reguleringsavvik til et reguleringsobjekt at den regulerte tilstand endres i den retning som er nødvendig for å minske avviket.

Overføres disse generelle betraktninger til pasteuriseringsprosessen som ble undersøkt, kan dette framstilles grafisk som i figur 7.2. og figur 7.3.

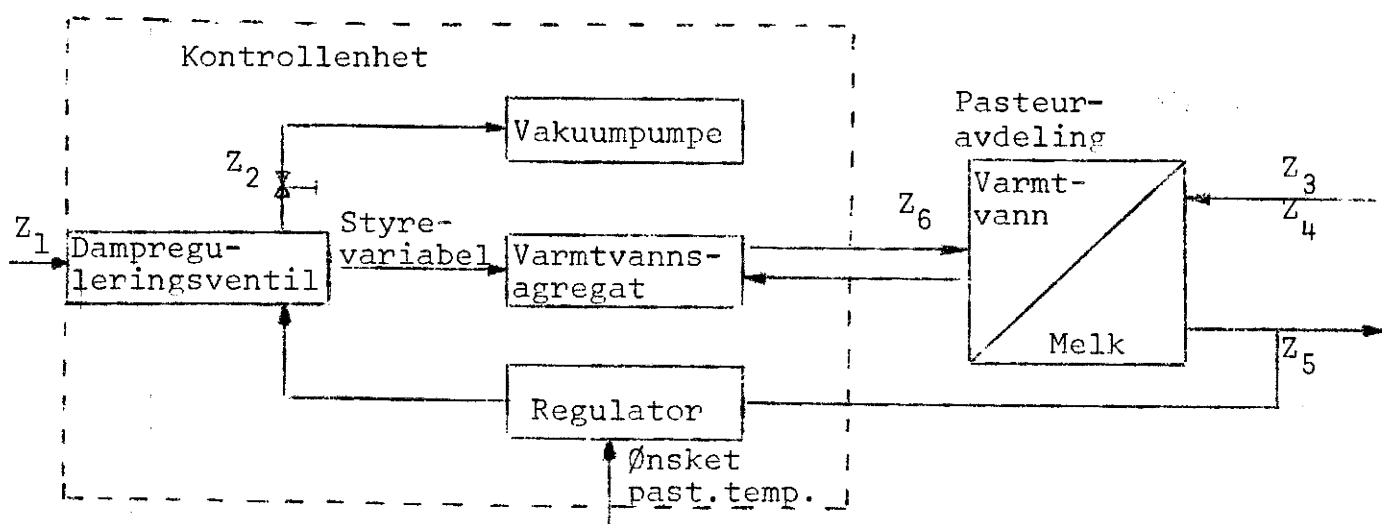


Fig. 7.2. Generelt blokkdiagram for pasteurisering av melk oppvarmet med varmtvann.

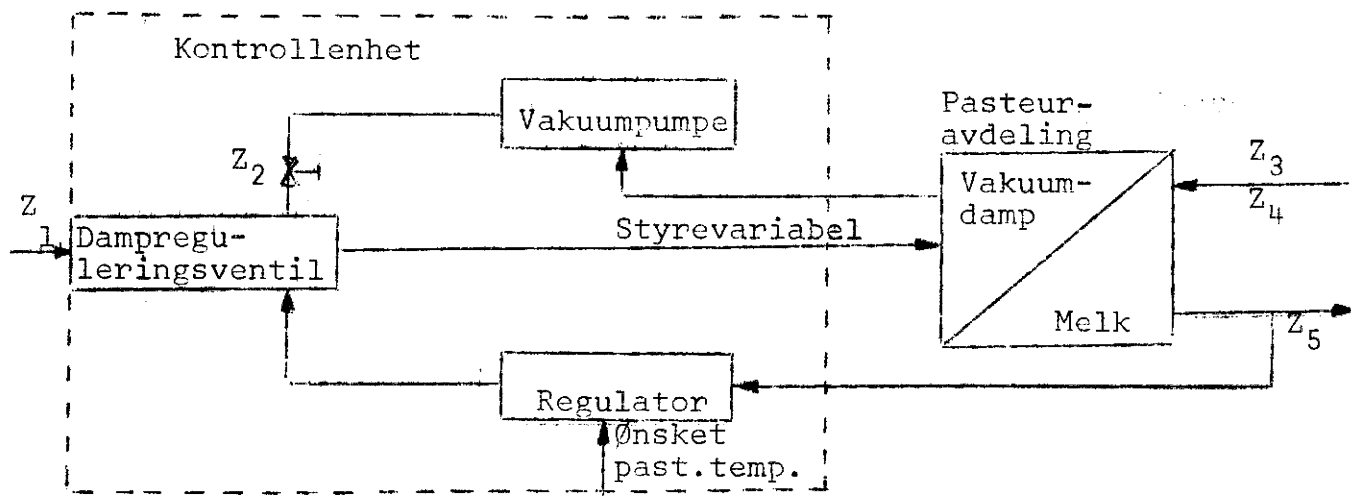


Fig. 7.3. Generelt blokkdiagram for pasteurisering av melk oppvarmet med vakuumdamp.

Figur 7.2. viser pasteuravdelingen oppvarmet med varmtvann og i figur 7.3. skjer oppvarmingen med vakuumdamp. I figur 7.2. ser en at kontrollenheten består av en regulator med ønskeverdisammenligninger, dampventil, vakuumpumpe og varmtvannsagregat. Det kan være tvil om varmtvannsagregatet tilhører kontrollenheten og at den styrevariable er plassert mellom dampventilen og varmtvannsagregatet. Varmen som blir tilført fra dampen blir kondensert i varmtvannsagregatet og det var mest naturlig å betrakte den tilførte dampmengden som styrevariabel. Varmtvannssirkulasjonen tilfører ikke pasteuren varme i annen forstand enn at varmtvannet er varmebærer mellom dampen og pasteuravdelingen. Det ble likevel prøvd med forskjellig gjennomstrømning av varmtvann.

Platepasteuren er bare representert med en blokk som viser pasteuravdelingen fordi det er her varmevekslingen med den tilførte varme skjer.

Variasjonene i driftsforholdene er avmerket med  $Z_1$  ---  $Z_6$  som kan inndeles i faktorer som har forsterkende virkning og faktorer som har forstyrrende virkning. Med forsterkning mener en den konstant som inngår i en overføringsfunksjon. Har en f.eks. en prosess med  $u$  som inngang og  $c$  som utgang er overføringsfunksjonen  $H(x)$  følgende:

$$(13) \quad c = H(x) \cdot u$$

hvor  $c$  = utgangen

$H(x)$  = overføringsfunksjonen

$u$  = inngangen

Den konstante delen av  $H(x)$  kalles prosessens forsterkning.

Variasjon i damptrykket  $Z_1$  og åpningen av strupeventilen  $Z_2$  i vakuumsystemet ved dampreguleringsventilen regnes til faktorer som har forsterkende virkning.

Faktorer som har forstyrrende virkning omfatter variasjon i melkens gjennomstrømning  $Z_3$ , melkens innløpstemperatur  $Z_4$  og plassering av regulatorens temperaturføler  $Z_5$ . Faktorene  $Z_3$  og  $Z_4$  virker som en forstyrrelse i varmeoverføringsprosessen.

Disse forstyrrelsene blir først utjevnet en del i regenerativ-

avdelingen og pasteuravdelingen før regulatorens temperaturføler måler det som er igjen av forstyrrelsens størrelse. Dersom forsterkningen i reguleringsløyfen er for høy, vil en beskjedne forstyrrelse i  $Z_3$  eller  $Z_4$  føre til svingninger i pasteuriseringstemperaturen med økende amplitude.  $Z_5$  er ingen variabel forstyrrelse, men kan betraktes som en faktor med innvirkning på hvor hurtig regulatorens temperaturføler skal måle en variasjon i pasteuriseringstemperaturen. Den tidsforskjellen regulatoren får målt pasteuriseringstemperaturen med ved de to følerplasseringene, kalles også transportforsinkelse. Variasjonen med gjennomstrømning av varmtvann kan betraktes som en intern forstyrrelse som også kalles transportforsinkelse. I figur 7.2. er variasjon i gjennomstrømmet mengde varmtvann merket med  $Z_6$ .

Forskjellen på oppvarming med vakuumdamp og varmtvann er at ved vakuumdampsystemet får melken tilført varme gjennom platene direkte fra vakuumdampen. Ved varmtvannsystemet må sirkulasjon av varmtvann brukes til transport av varme fra dampen til melken. Den styrevariable i vakuumdampsystemet blir dampen i form av vakuumdamp direkte inn på oppvarmings-siden i pasteuravdelingen. Her kondenseres dampen og avgir varme til melken.

En kunne tenke seg variabelt vakuum som forstyrrelse i systemet, men det ble ikke prøvd i denne undersøkelsen. De variable driftsforholdene ellers var de samme som under pasteurisering med varmtvannsoppvarming.

## 7.2. Varierte driftsforhold ved pasteurisering ved oppvarming med varmtvann.

Først i dette avsnittet er de forskjellige faktorene beskrevet hver for seg og i siste del av avsnittet er gitt en omtale av måleresultatene. Dette er gjort slik fordi regulering av en prosess avhenger alltid av flere faktorer samtidig og skal en få oversikt over de variasjonsmåtene som er undersøkt, kan en ikke behandle alle samtidig.

### 7.2.1. Damptrykket.

Dampen fram til pasteuriseringsanlegget hadde et trykk som varierte mellom 4,8 og 5,0 kp/cm<sup>2</sup>.

Foran pasteuriseringsanlegget var det montert en Spirax DP reduseringsventil produsert av Spirax Sarco Ltd. Med denne reduksjonsventilen kunne en trinnløst variere trykket fra 0,1 kp/cm<sup>2</sup> opp til ca. 0,5 kp/cm<sup>2</sup> lavere enn det trykket en hadde ved innløpet til reduksjonsventilen. Damptrykket ble variert i området 0,1 til 4,0 kp/cm<sup>2</sup> overtrykk. Variasjonen ble utført på den måten at ved en fast innstilling på de øvrige variable i anlegget ble damptrykket øket trinnavis til ustabil område ble funnet, og pasteuriseringstemperaturen begynte å svinge med økende amplitude.

I figur 7.2. er variasjon i damptrykket merket med Z<sub>1</sub>.

Med konstant forsterkning i regulatoren har damptrykkvariasjonen forsterkende virkning på reguleringen av pasteuriseringstemperaturen. Det vil si, en øker sløyfeforsterkningene når en øker damptrykket. Den sløyfen det refereres til har pasteuriseringstemperaturen som inngang og varmemengden som tilføres varmtvannsagregatet som utgang.

Forholdet kan beskrives ved følgende ligning:

$$(14) \quad \Delta Q = k \cdot \Delta t$$

hvor  $\Delta Q$  = varmemengde tilført pasteuren (kcal)

$k$  = konstant (kcal/°C)

$\Delta t$  = temperaturvariasjon (°C)

Ligning 14 viser at en forandring i pasteuriseringstemperaturen på  $\Delta t$  °C fører til en forandring i tilført varmemengde på  $\Delta Q$  kcal. Variasjonsområdet for damptrykket ved oppvarming med varmtvann, var fra 2,1 til 4,0 kp/cm<sup>2</sup>. Ved oppvarming med vakuumdamp var variasjonsområdet fra 0,3 til 4,0 kp/cm<sup>2</sup>. Ved det laveste damptrykket en kunne bruke hadde reguleringsventilen full åpning. Da strømmet det gjennom damp med relativ lav hastighet og lav spesifikk vekt. En  $\Delta t$  forandring i pasteuriseringstemperaturen vil gi relativt liten  $\Delta Q$ . En har i dette tilfellet relativt liten forsterkning.

Har en derimot høyt damptrykk foran reguleringsventilen, vil ventilåpningen være vesentlig redusert, men den samme varmemengde vil slippe gjennom p.g.a. øket strømningshastighet og øket spesifikk vekt. Blir reguleringssystemet utsatt for like stor  $\Delta t$  variasjon som i eksemplet foran, vil en få relativt større  $\Delta Q$ . I dette tilfellet har en derfor større forsterkning enn ved lavt damptrykk. En kan derfor si at en øker forsterkningen i reguleringssløyfen når en øker damptrykket. Forsterkningen kan på den måten økes trinnvis inntil en kommer inn i et ustabil område som fører til at pasteuriseringstemperaturen svinger med økende amplitude.

Når en skal bestemme dampens varmeinnhold, måler en først dampens fuktighetsinnhold og beregner så varmeinnholdet. Det enkleste måleapparatet til å bestemme dampens fuktighetsinnhold bestod av et u-rør med strupeskiye ved innløpet fra dampledningen. Dette måleapparatet viste seg å være ubrukbart fordi dampens fuktighetsinnhold var for høyt. Målemetoden kan anvendes når dampens fuktighetsinnhold er lavere enn 6 prosent. Sikre måleresultater får en når overopphetningen av dampen etter strupeskiye er mer enn  $10^{\circ}$  C.

Den enkleste måten å måle fuktighetsinnholdet i dampen på ble også prøvd. Målemetoden bygger på veieing av en bestemt mengde vann i en isolert beholder. I denne vannmengden kondenseres en bestemt mengde damp som veies i beholderen. Temperaturstigningen måles med kvikksølvtermometer. Denne metoden kunne vært brukbar dersom dampens fuktighetsinnhold hadde vært relativt konstant. Dampforbruket i apparater som var knyttet til samme dampledning som pasteuriseringsanlegget var svært variabelt, og dette førte til variabelt fuktighetsinnhold i dampen. Spredningen på resultatene var for stor til at målingene kunne aksepteres.

Målemetoden som ble anvendt til å bestemme varmeinnholdet i dampen bygger på en varmeballansemåling. Damptrykket foran reduksjonsventilen varierte mellom 3,6 og  $4,4 \text{ kp/cm}^2$ .

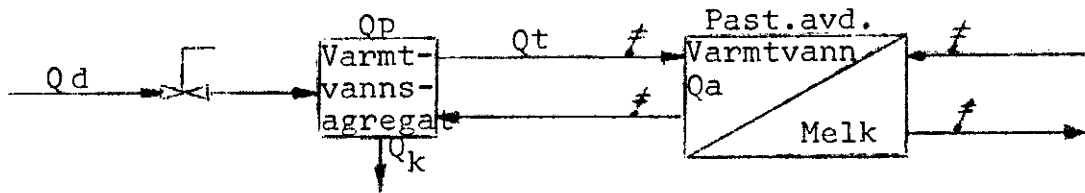


Fig. 7.4. Skisse av pasteuriseringsanlegget som viser varmeballansen.

I figur 7.4. ser en at temperaturen ble målt både ved innløpet og utløpet av pasteuravdelingen. Varmemengden som ble avgitt til melken  $Q_a$  ble utregnet på grunnlag av temperaturmåling med kvikksølvtermometer i termometerlomme og mengdemåling med rotameter. Varmetapet fra rør og varmtvannsbereder  $Q_t$  ble beregnet ut fra målingen av overflatetemperaturen til rør og beholder samt lufttemperatur under prøvene. Pumpearbeidet ble beregnet ut fra målinger av strømforbruk med tangampermeter. Tap i motor ble beregnet ut fra påstemplete data og mekanisk virkningsgrad ble beregnet ut fra tilført effekt til pumpens akseltapp og utført pumpearbeid. Pumpearbeidet ble beregnet ut fra målinger av statisk og dynamisk trykk etter pumpen.

Stiller en opp varmeballansen, får en følgende ligning:

$$(15) \quad Q_d = \frac{Q_a + Q_t + Q_k - Q_p}{P}$$

hvor  $Q_d$  = dampens varmeinnhold (kcal/kg)

$Q_a$  = varme avgitt i pasteuravdeling (kcal)

$Q_t$  = varmetap fra rør og varmtvannsagregat (kcal)

$Q_k$  = varmetap fra kondensat (kcal)

$Q_p$  = varme tilført fra pumpearbeid (kcal)

$P$  = kondensat (kg)

Setter en inn de målte gjennomsnittsverdier i ligning 15, får en:

$$Q_d = \frac{33594,1 + 1314,0 + 4203,3 - 952,0}{625,8} = 610 \text{ kcal/kg damp.}$$

Målingene som beregningene bygger på omfattet 10 gjentak. Det var 2 serier av målinger med variasjon av melkens gjennomstrømning fra 1000 til 3000 liter pr. time og med intervall på 500 liter pr. time. Gjennomsnittet av hver serie viste

at det var en nivåforskjell mellom seriene på 7,2 kcal pr. kg damp. Regner en imidlertid gjennomsnittet for serien samlet, fant en at dampens varmeinnhold var 610 kcal pr. kg damp. Målingene hadde et standardavvik på 5,27. Går en to ganger standardavviket i begge retninger fra gjennomsnittet, omfatter det området en har 95 prosent sannsynlighet for at en tilfeldig observasjon vil falle innenfor grensene  $610 \pm 10,54$  kcal pr. kg damp. Målingene bekreftet den antagelse at når en har konstant damptrykk foran reduksjonsventilen, vil en få ubetydlig forskjell i dampens varmeinnhold ved varierende damptrykk etter reduksjonsventilen. Har en lite fuktighet i dampen foran reduksjonsventilen, vil en ved å senke trykket i den reduserte dampen få overopphetet damp. Med den lange tilførselsledningen en hadde fra kjelen, og lite forbruk, var det ventet at fuktighetsinnholdet i dampen ville være høyt. Det viste seg også ved oppvarming med vakuumdamp at en fikk ikke overopphetet damp selv om trykket ble redusert til  $\approx 0,7$  kp/cm<sup>2</sup>. I IS-diagrammet for vanndamp, finner en at ved et varmeinnhold i dampen på 610 kcal pr. kg har en 9 prosent fuktighet i dampen.

#### 7.2.2. Åpningen av strupeventilen i vakuumsystemet ved dampreguleringsventilen.

Ved dampreguleringsventilen mellom vakuumpumpen og munnstykket for luftinnslipp i regulatoren, sitter en strupeventil (4). Denne ventilen er utformet som en nålventil med gjengestigning på 0,91 mm pr. omdreining. En kan derfor regulere åpningen meget nøyaktig. Figur 7.5. viser en skisse av reguleringssløyfen som omfatter strupeventilen.

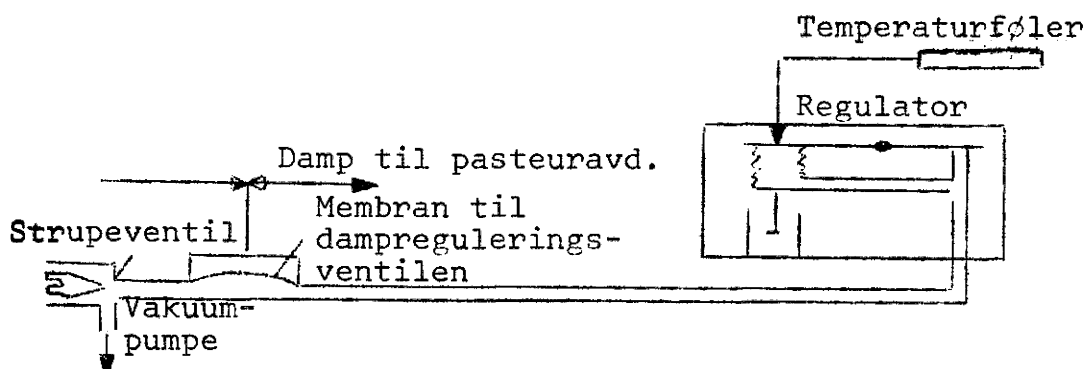


Fig. 7.5. Koplingen mellom dampreguleringsventilen og regulatoren.

I figur 7.5. ser en at det blir et trykkfall over strupeventilen ved dampreguleringsventilen. Betrakter en vakuemet som  $kp/cm^2$  undertrykk, er tallverdien av trykket mellom vakuumpumpen og strupeventilen større enn trykket mellom strupeventilen og regulatoren. Åpningen i strupeventilen er en sirkelspalte som ble målt og gjennomstrømningsarealet ble beregnet. Reguleringen ble undersøkt ved tre forskjellige åpninger i strupeventilen, 1, 2 og 3 omdreininger åpning på skruen fra stengt posisjon. Dette tilsvarer et fritt gjennomstrømningsareal på henholdsvis 1,37, 2,32 og 2,93  $mm^2$ .

I figur 7.2. er variasjon i åpningen av strupeventilen i vakuumsystemet ved dampreguleringsventilen merket med  $Z_2$ .

Trykkforholdet kan forenklet betraktes i følgende figur og kan sammenlignes med et dyse-klaff-element (26).

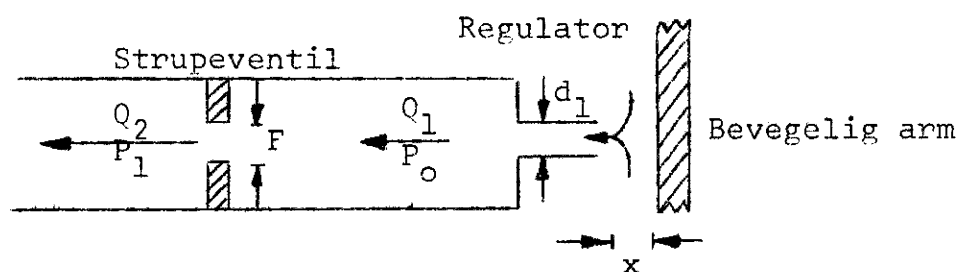


Fig. 7.6. Skisse av trykkforholdet i reguleringsløyfen.

Trykket  $P_0$  innstiller seg avhengig av den variable åpningen  $x$  mot atmosfæretrykket. Temperaturføleren til regulatoren sørger for å variere denne åpningen. Trykket  $P_0$  innstiller seg også i dampreguleringsventilen. Et slikt dyse-klaff-element er meget følsomt og har stor forsterkning, fordi bare en åpning på brøkdeler av en millimeter kan bevege dampreguleringsventilen fra åpen til stengt stilling. Elementet er noe begrenset i hurtighet. Derfor egner det seg godt til å regulere varmevekslerprosesser fordi slike prosesser krever relativt langsomme regulatorer.

Ved små trykkfall kan en luftstrøm tilnærmet sammenlignes med strømming av inkompressible væsker gjennom en åpning.



Strømningen er da gitt ved formelen:

$$(16) \quad Q = K \cdot F \cdot \sqrt{\Delta P}$$

hvor  $Q$  = gjennomstrømning av luft ( $\text{dm}^3/\text{min}$ )

$F$  = åpningstverrsnitt ( $\text{dm}^2$ )

$\Delta P$  = trykkfallet over åpningen ( $\text{kp}/\text{dm}^2$ )

$K$  = konstant avhengig av væsken, åpningens form osv.  
( $\text{dm}^3/\text{min kp}$ )

Ved åpningen i luftmunnstykket har en:

$$Q_1 = K_1 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot x \cdot \sqrt{P_0}$$

Og ved strupeventilen:

$$Q_2 = k_2 \cdot F \sqrt{P_1 - P_0}$$

Siden  $Q_1 = Q_2$  er elementets arbeidskarakteristikk gitt

ved:

$$(17) \quad x = \frac{k_2 \cdot F}{k_1 \cdot \pi d_1} \sqrt{\frac{P_1}{P_0} - 1}$$

Ligning (17) viser åpningen  $x$  i regulatoren som funksjon av  $P_0$ . Det forutsettes da at  $k_2$  er tilnærmet lik  $k_1$  og at  $P_1$  holdes tilnærmet konstant. Dette trykket er avhengig av vakuumpumpens kapasitet.  $P_1$  ble målt opp til  $\approx 0,7 \text{ kp}/\text{cm}^2$ .

I regulatoren ble  $d_1$  og  $x$  målt i mm. Ved strupeventilen ble åpningstverrsnittet målt i  $\text{mm}^2$ . Ut fra disse forutsetningene og de målte parameterene ble elementets arbeidskarakteristikk tegnet opp i figur 7.7.

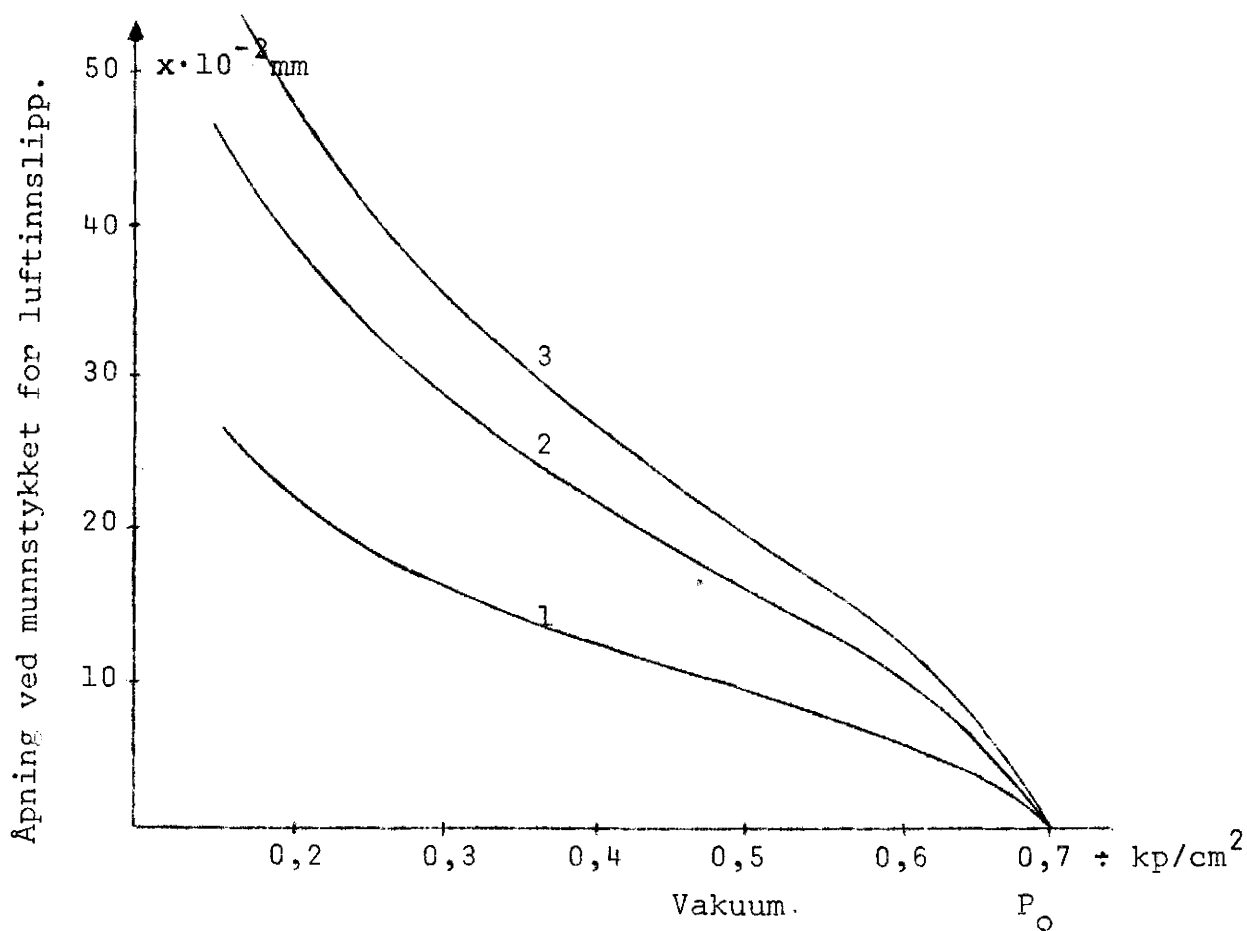


Fig. 7.7. Dyse-klaff-elementets arbeidskarakteristikk.

I figur 7.7. er vakuomet avsatt langs horisontalaksen i  $\text{kp/cm}^2$  og åpningen  $x \cdot 10^{-2}$  mm ved munnstykket for luftinnslipp langs vertikalaksen. Kurve 1 viser karakteristikken ved en gjennomstrømningsflate på  $1,37 \text{ mm}^2$  i dysen ved dampreguleringsventilen. Kurve 2 viser karakteristikken for en gjennomstrømningsflate på  $2,32 \text{ mm}^2$  og ved kurve 3 flaten  $2,93 \text{ mm}^2$ . Ser en disse tre kurvene i forhold til hverandre, har en ved kurve 1 størst sløyfeforsterkning i reguleringsløyfen og ved kurve 3 minst forsterkning. Ved stor forsterkning skal det relativt liten åpning til ved munnstykket for luftinnslipp før dampreguleringsventilen beveger seg fra stengt til fullt åpen stilling, og det motsatte har en ved liten forsterkning.

Tenker en seg at en del av karakteristikken er tilnærmet lineær, er vakuomet som åpner dampreguleringsventilen proporsjonalt med åpningen  $x$  ved munnstykket for luftinnslipp i regulatoren. Vakuomet kan også sies å være proporsjonalt med et avvik i pasteuriseringstemperaturen, og en kan si at en har proporsjonal regulering.

## 7.2.3. Gjennomstrømmet mengde melk.

Melkens gjennomstrømning ble holdt konstant på 2000 liter pr. time. Forstyrrelsen i melkegjennomstrømningen ble utført ved å øke gjennomstrømningen til 2500 liter pr. time i 10 sekunder i det ene tilfellet og ved å senke gjennomstrømningen til 1500 liter pr. time i 10 sekunder i det andre. En fikk på denne måten forstyrret pasteuriseringsprosessen på to måter. Øker en gjennomstrømningen, fører det til at pasteuriserings-temperaturen synker og regulatoren sørger for å åpne damp-ventilen. I det andre tilfellet senker en gjennomstrømningen. Dette fører til at varmebehovet blir mindre, pasteuriserings-temperaturen stiger, og regulatoren innstiller seg slik at damp-ventilen reduserer gjennomstrømningen.

I figur 7.2. er variasjonen i gjennomstrømmet mengde melk merket med  $Z_3$ .

Den gjennomsnittlige damptilførsel til pasteuriserings-avdelingen ble målt ved å veie kondensatet i en driftsperiode på 20 minutter med 5 gjentak. I tabell 7.1. er resultatene ved varierende gjennomstrømning av melk gjengitt. Varmemengden er regnet ut på grunnlag av målt varmeinhold i dampen på 610 kcal/kg damp. Gjennomsnittlig damptrykk var 2,7 kp/cm<sup>2</sup>.

Tabell 7.1. Gjennomsnittlig varmetilførsel til pasteuriseringsanlegget ved varierende gjennomstrømning av melk.

Melkens gjennomstrømning liter pr. time	1500	2000	2500
Tilført kg damp pr. time	45,6	64,5	83,7
Varmemengde i kcal pr. time avgitt fra dampen	27816	39345	51057

Med utgangspunkt i melkens gjennomstrømning på 2000 liter pr. time, får en øket tilførselen av varme med 11712 kcal pr. time når en øker gjennomstrømningen av melk med 500 liter pr. time. Når en senker gjennomstrømningen med 500 liter pr. time, får en senket varmetilførselen med 11529 kcal pr. time. Tallene i tabell 7.1. viser gjennomsnittsverdier for varmetilførsel når stabil regulering er oppnådd. Har en f.eks. et ustabil område med for høy forsterkning i reguleringsløyfen,

vil en belastningsvariasjon føre til betydelig oversving av pasteuriseringstemperaturen. Men selv om det ikke ville forekomme oversving ved impulsvariasjon, ser en av tabell 7.1. at den impulsvariasjon som ble brukt i undersøkelsen var en relativt kraftig forstyrrelse som ble påtrykket pasteuriseringsprosessen.

Overskuddet av tilført varmemengde pr. time til pasteuriseringsanlegget har stor betydning for forsterkningen i reguleringssløyfen og dermed regulatorens evne til å regulere bort avvik p.g.a. påtrykte forstyrrelser. Som eksempel kan en tenke seg at ved pasteurisering av 2000 liter melk pr. time fra 4° til 72° C, har en et overskudd av tilført varmemengde pr. time på 50 prosent. Variasjon i varmemengdeoverskuddet ved varierende gjennomstrømning og konstant damptrykk er vist i tabell 7.2. I eksempelet regner en med 75 prosent regenerativvirkning og pasteuriseringstemperatur på 72° C.

Tabell 7.2. Variasjon i overskudd av tilført varmemengde pr. time ved varierende gjennomstrømning av melk.

Gjennomstrømmet mengde melk liter pr. time	Varmemengde- behov kcal pr. time	Varmemengde- tilgang kcal pr. time	Overskudd av varmemengde i prosent
1500	25500	51000	100
2000	34000	51000	50
2500	42500	51000	20

I tabell 7.2. ser en at et fast innstilt overskudd av tilført varmemengde pr. time på 50 prosent ved 2000 liter pr. time øker til 100 prosent når gjennomstrømningen synker til 1500 liter pr. time. Overskudd av tilført varmemengde ved 2500 liter pr. time er bare 20 prosent. Dersom tilført varmemengde holdes konstant slik som i tabell 7.2., øker en forsterkningen i reguleringssløyfen ved å sette ned gjennomstrømningen med 500 liter pr. time. Ved økt forsterkning har en lettere for å oppnå ustabil regulering. Når en øker gjennomstrømningen med 500 liter pr. time senker en forsterkningen og regulatoren har lettere for å holde konstant pasteuriseringstemperatur.

Variasjon i melkens gjennomstrømning ble utført som en impulsvariasjon  $\pm 500$  liter pr. time i 10 sekunder og sammenhengen mellom overskuddet av varmemengde og impulsvariasjon er vist i figur 7.8.

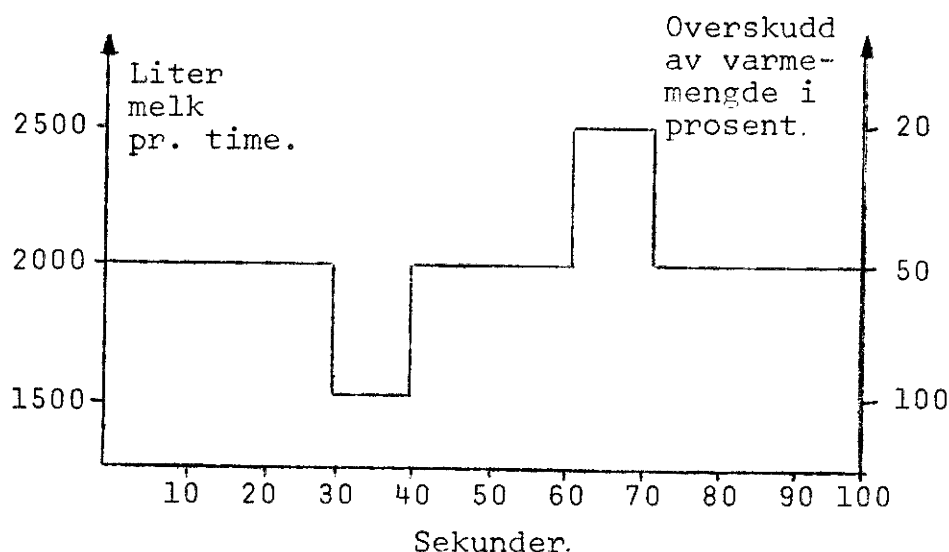


Fig. 7.8. Sammenhengen mellom impulsvariasjon  $\pm 500$  liter pr. time og overskuddet av varmemengde.

Av figur 7.8. ser en at når en forstyrrer pasteuriseringsprosessen med  $\pm 500$  liter pr. time i 10 sekunder, øker overskuddet av varmemengde og dermed forsterkningen i reguleringsløyfen i like lang tid. Holdes driftstilstanden i et område som er på grensen til å være ustabil, ser en at en kan komme ut i ustabil område ved å senke gjennomstrømningen med 500 liter pr. time. Øker en gjennomstrømningen, kommer en i 10 sekunder over i et område som er mer stabilt fordi forsterkningen i reguleringsløyfen senkes.

Når en varierer melkens gjennomstrømning, forandrer en også varmegjennomgangstallet. Det ble derfor undersøkt om det var forskjell i frekvensen til pasteuriseringstemperaturen når en varierte melkens gjennomstrømning med impuls på  $\pm 500$  liter pr. time. Damptrykket ble innstilt på  $2,6 \text{ kp/cm}^2$ . Seks målinger viste en gjennomsnittlig svingetid på 30 sekunder. Svingningene var kraftig dempet. Amplituden ved første halvperiode var ved  $+ 500$  liter pr. time i 10 sekunder  $\pm 1,1^\circ \text{ C}$ . Ved  $\pm 500$  liter pr. time var amplituden  $\pm 0,7^\circ \text{ C}$ . Disse målingene viser også at overskuddet av varmemengde synker når

en øker gjennomstrømningen av melk. Hadde overskuddet av varmemengde vært konstant, ville amplituden for temperaturutslaget også være like stort i begge retninger.

Forstyrrelsen ble foretatt med en periode på 10 sekunder både ved + 500 og - 500 liter pr. time. Det var derfor samme frekvens på forstyrrelsen i begge retninger. Generelt har prosesser lettere for å bli ustabile når de utsettes for forstyrrelser med høy frekvens enn når forstyrrelsen har lav frekvens. Dette viser seg best når prosessen har en driftstilstand som ligger på grensen av et stabilt område.

#### 7.2.4. Melkens innløpstemperatur.

I praksis kan leverandørmelkens temperatur variere mellom ca.  $3^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  C. Den maksimale variasjon av innløpstemperaturen en kunne oppnå under de forhold en hadde i forsøksperioden, var en sprangvariasjon på  $11^{\circ}$  C fra  $9^{\circ}$  til  $20^{\circ}$  C. Variasjonen hadde forstyrrende virkning på pasteuriseringsprosessen og ble utført på følgende måte:

Den laveste temperaturen  $9^{\circ}$  C ble tilført fra ledningsvannet. Vann med temperatur på  $20^{\circ}$  C ble tappet opp i et 1500 liter kar. Dette karet ble forbundet med balansetanken med en 48,3 mm slange. Gjennomstrømningen i pasteuren var 2000 liter pr. time, pasteuriseringstemperaturen ca.  $72^{\circ}$  C og med 75 prosent regenerativvirkning. Omstilling fra den ene temperaturen til den andre ble utført ved å pumpe ned nivået i balansetanken til det var igjen ca. 8,6 liter. Det var da et volum i ledningen frem til pasteuren på ca. 7,6 liter. Summen av resten i balansetanken og vannet i ledningen var 16,2 liter. Ved 2000 liter pr. time gjennomstrømning ble dette volumet pumpet ut på 29,1 sekunder. Når en skiftet til den andre temperaturen i balansetanken, fikk en blandet de to temperaturene litt med en gang. Noen ideell sprangfunksjon kunne en derfor ikke få til med dette utstyret. Men sprangfunksjonen ble likevel steil nok til at den ønskede effekt kunne studeres.

I figur 7.2. er variasjonen i melkens innløpstemperatur merket med  $Z_4$ .

Som eksempel på størrelsen av variasjonen i melkens innløpstemperatur kan en regne ut fra en varmemengdetilgang

på 47250 kcal pr. time ved pasteurisering av melk fra  $9^{\circ}$  til  $72^{\circ}$  C med 75 prosent regenerativvirkning. En har da ved denne driftstilstand 50 prosent overskudd av varmemengde fordi pasteuriseringen bruker 31500 kcal pr. time. Øker en innløpstemperaturen til  $20^{\circ}$  C, vil en få en annen temperaturbalanse i platepasteuren. Forutsetter en at en også da har den samme regenerativvirkning, er varmebehovet 26000 kcal pr. time og overskuddet av varmemengde i dette tilfellet blir 81,7 prosent. Av dette ser en at forandrer en innløpstemperaturen på melken fra  $9^{\circ}$  til  $20^{\circ}$  C øker en overskuddet av varmemengde fra 50 til 81,7 prosent. Dette har en ugunstig virkning på reguleringsforløpet og ligger prosessen på grensen av et stabilt område, kan en slik variasjon føre til at prosessen begynner å svinge med økende amplitude. Forandrer en innløpstemperaturen fra  $20^{\circ}$  til  $9^{\circ}$  C får en motsatt virkning, fordi en da senker overskuddet av varmemengde fra 81,7 til 50 prosent. Denne variasjon vil virke i den retning på reguleringsforløpet at en vil få en stabilere regulering. I figur 7.9. er det nevnte eksempelet satt opp i diagramform med vilkårlig tid langs horisontalaksen fordi forstyrrelsen hadde form av en sprangfunksjon.

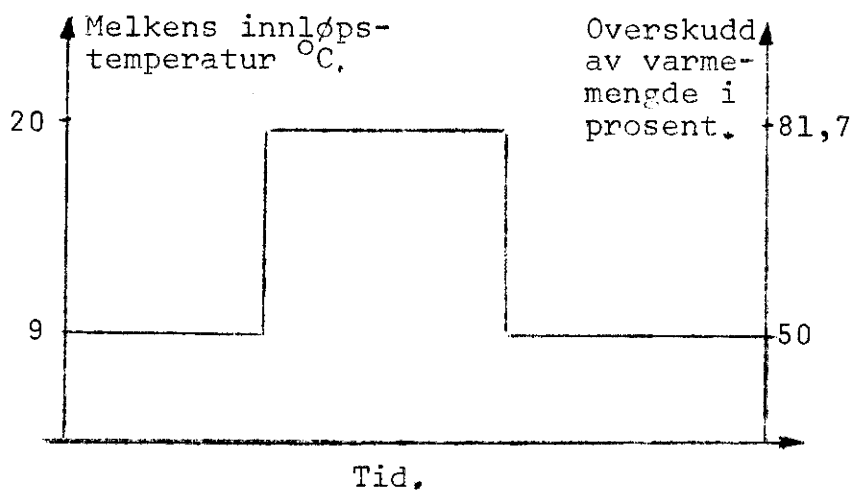


Fig. 7.9. Sprangvariasjon i melkens innløpstemperatur. i forhold til overskudd av varmemengde.

I figur 7.9 er sprangfunksjonen tegnet som en ideell funksjon. I praksis var nok hjørnene i kurven noe avrundet, men effekten av forstyrrelsen var likevel godt målbar.

Impulsvariasjonen ble prøvd ved  $0,1 \text{ kp/cm}^2$  lavere damptrykk enn det som utløste selvsvingninger når damptrykket ble øket  $0,1 \text{ kp/cm}^2$  med de øvrige variasjonene uforandret.

#### 7.2.5. Plassering av regulatorens temperaturføler.

Undersøkelsen omfattet to alternativer for plassering av regulatorens temperaturføler. Begge stedene var i det utvendige forbindelsesrøret mellom pasteuravdelingen og holdercellen. Utløpet fra pasteuravdelingen var på toppen av platepasteuren og innløpet til holdercellen var nede ved bunnen. Forbindelsesrøret hadde innvendig diameter  $35,6 \text{ mm}$  og det hadde en albue oppe og en nede. Plassering av føleren i den øverste albue, altså nærmest utløpet fra pasteuravdelingen, er i det følgende benevnt posisjon 1 og plassering i den nedre albue posisjon 2. Dette går også klart frem av figur 7.10. som viser en skisse av hvordan føleren var plassert i albuene.

Melkegjennomstrømningen ble holdt på  $2000 \text{ liter pr. time}$ , men denne variasjonen ble også målt ved impulsvariasjonen på  $\pm 500 \text{ liter pr. time}$ . Pasteuriseringstemperaturen ble holdt tilnærmet  $72^\circ \text{ C}$ . Variasjonen har bare en tidsforsinkende effekt på det signalet som overføres til regulatoren og er merket med  $Z_5$  i figur 7.2. I følge spesifikasjoner oppgitt fra fabrikken, burde væskehastigheten forbi føleren være  $0,75 \text{ meter pr. sekund}$ . Dette krav var hovedsaklig satt opp for å sikre at føleren ved posisjon 1 var fullstendig omspylt med væske. Ved  $2000 \text{ liter pr. time}$  gjennomstrømning ble væskehastigheten forbi føleren beregnet til  $0,65 \text{ meter pr. sekund}$ . Dette var i minste laget i følge spesifikasjonene, men ved det undersøkte anlegget var det ikke vanskeligheter med reguleringen på grunn av dette. Ved posisjon 2 er det aldri vanskeligheter av denne art, fordi røret alltid vil være fylt til tilstrekkelig høyde opp på pasteursiden. Ved gjennomstrømning av rør med innvendig diameter  $35,6 \text{ millimeter}$  må en ved små gjennomstrømningsmengder plassere føleren i posisjon 2 og den vertikale høyde over føleren må tilfredsstille følgende formel (3).

$$(18) \quad H \leq 12000 \cdot \frac{Q}{5000} -$$

hvor  $H$  = den vertikale høyden over føleren (mm)

$Q$  = gjennomstrømning liter pr. time.



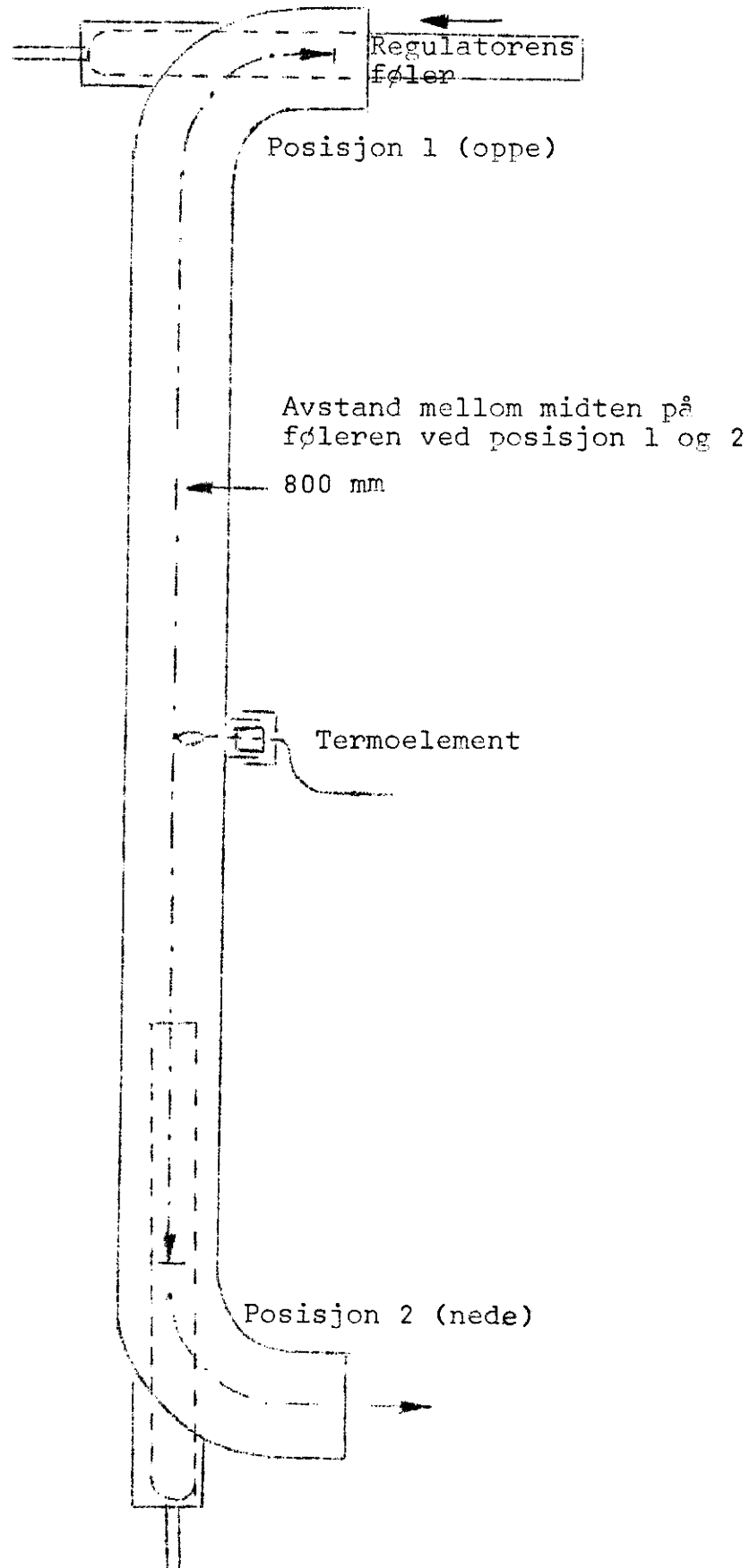


Fig. 7.10. Forbindelsesrøret mellom regenerativ-avdelingen og pasteuravdelingen.

Tidsforsinkelsen mellom følerplasseringene ble beregnet til 1,44 sekunder. En baserte da beregningene på målt diameter i ledningen og målt avstand mellom midten på føleren ved posisjon 1 og 2.

Effekten av en slik variasjon av plasseringen av regulatorens temperaturføler var i første rekke at amplituden for en temperaturvariasjon ville bli større ved posisjon 2 enn ved posisjon 1. Årsaken til denne effekt var at ved posisjon 2 fikk regulatoren signalet fra temperaturforandringen 1,44 sekunder senere enn ved posisjon 1. Dermed ble en korreksjon av damptilførselen også 1,44 sekunder forsinket. En har altså en variasjon som kan betraktes som ren transportforsinkelse.

Ren transportforsinkelse gir bare fasedreining når en betrakter overføringsfunksjonen for systemet ved hjelp av frekvensanalyse. Dette fører til at fasekurven f.eks. i et Bodediagram krysser  $180^{\circ}$  -linjen ved lavere frekvens enn uten transportforsinkelse. Systemet har da generelt lettere for å komme over i ustabil område (6).

Ved frekvensanalyse undersøker en det åpne regulerings-systemet d.v.s. tilbakeføringsløyfen er utkoplet og det samme gjelder for regulatoren. Sender en inn et signal i systemet som varierer etter en sinuskurve og måler inn og utstørrelsenes amplitude og fase ved forskjellige frekvenser, danner måleresultatene grunnlag for å vurdere overføringsfunksjonen mellom inngangen og utgangen av systemet. Det sinusformede signalet ved utgangen av systemet kalles harmonisk respons. Denne metoden omfatter tre variable, nemlig: frekvens (radianer pr. sekund), forsterkning (ubenevnt) og fase (grader). Forholdet mellom de variable kan vises i et diagram hvor fasen og forsterkningen kan avsettes på vertikalaksen og frekvensen langs horisontalaksen. Det er da vanlig å avsette forsterkningen og frekvensen i logaritmisk skala. Forsterkningen som er forholdet mellom utsignalets og innsignalets amplitude har benevnningen desibel. Denne enheten er definert som:

$$(19) \quad \text{dB} = 20 \log \frac{A_2}{A_1}$$

hvor  $A_2$  = utsignalets amplitude  
 $A_1$  = innsignalets amplitude

Årsaken til at en bruker logaritmisk skala er at summering av antall dB er enklere å utføre enn multiplikasjon av forholdstall når en undersøker systemer som består av mange ledd.

Har en overføringsfunksjonen  $G$  som funksjon av imaginær og realdel i frekvensplanet, kan en avsette tallverdien av forsterkningen i  $G$  langs en logaritmisk skala på vertikalaksen. Frekvensen avsetter en langs en logaritmisk skala på horisontalaksen. Avsetter en vinkeldreiningen til  $G$  langs vertikalaksen i grader mot den foran nevnte horisontale frekvensskala, får en to diagram, et for amplitude og et for fase. Disse to diagrammene sammen kalles Bode diagram. Tegner en inn overføringsfunksjonen etter de regler som gjelder, finner en enkelt ut for hvilke frekvenser systemet er ustabil.

Stabilitetsundersøkelsen utføres i forhold til  $180^\circ$ -linjen i fasediagrammet. I følgende eksempel går det klart frem hvorfor en faseforskyvning på  $180^\circ$  er grensen for å oppnå stabil regulering. I figur 7.11. er en vilkårlig prosess tegnet inn med åpen sløyfe mellom forsterkeren og prosessen.

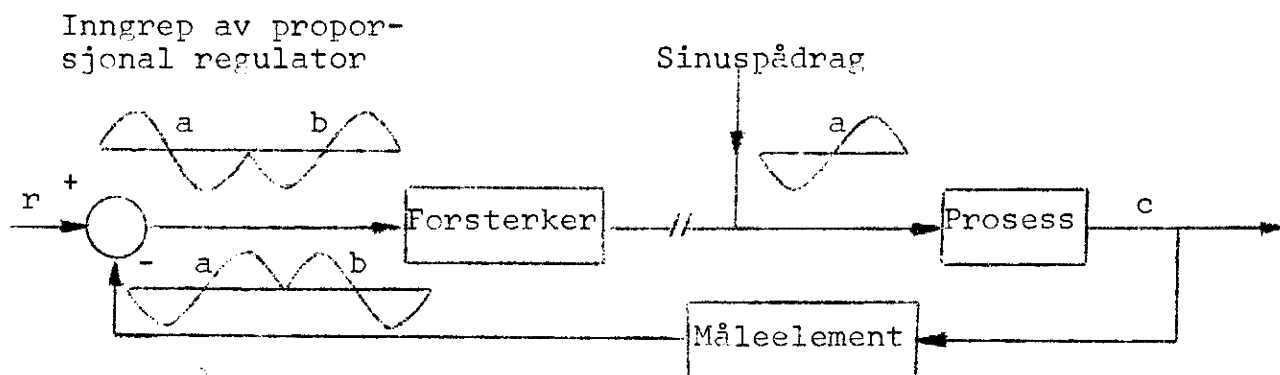


Fig. 7.11. Blokkdiagram som viser virkningen av faseforskyvning i en prosess.

Reguleringsløyfen er åpen mellom forsterkeren og prosessen og det føres inn et sinuspådrag  $a$  foran prosessen. Dersom utgangssignalet  $c$  er i fase med pådraget, vil systemet være stabilt fordi inngrepet av proporsjonalregulatoren vender fasen  $180^\circ$ .

Dersom en øker frekvensen til sinuspådraget, får en til slutt en faseforskyvning i utgangssignalet på  $180^\circ$  som

vist i kurve b. Dette signalet vendes  $180^\circ$  av proporsjonalregulatoren, og en ser at etter forsterkeren vil en ha et signal som er i fase med sinuspådraget. Dersom en kopler bort sinuspådraget og lukker sløyfen, vil en få et system som svinger med konstant amplitude. Øker en forsterkningen i systemet vil prosessen svinge med økende amplitude.

#### 7.2.6. Gjennomstrømmet mengde varmt vann.

Sirkulasjon av varmt vann tjener bare som varmetransportør fra varmtvannsberederen fram til pasteuravdelingen. Hastigheten til varmetransporten er derfor en funksjon av varmtvannets sirkulasjonshastighet. Systemet er tegnet i blokkdiagram i figur 7.12.

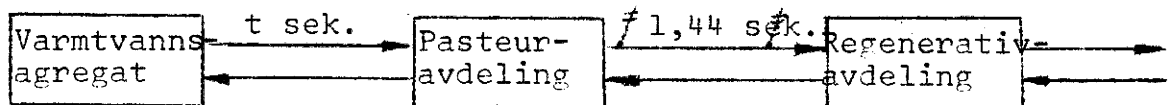


Fig. 7.12. Blokkdiagram av pasteuriseringsanlegget.

Gjennomstrømning liter pr. time	t sekunder
4000	8,52
6000	5,67
8000	4,27

Transportforsinkelsen ved gjennomstrømning av 6000 liter varmtvann pr. time var ca. 4 ganger så stor som transportforsinkelsen en får mellom posisjon 1 og 2 for regulatorens temperaturføler. Ved 4000 liter pr. time var transportforsinkelsen ca. 6 ganger så stor. Transportforsinkelsen i varmtvannssystemet var av en betydelig størrelse og derfor skal jeg ved hjelp av frekvensanalyse drøfte den betydning den har for å oppnå stabil regulering (6, 13).

Forenkler en pasteuravdelingen til en boks der en tilfører og tar ut varme og forutsetter at varmevekslingen skjer gjennom en enkel vegg, kan systemligningene for varmebalanse settes opp etter figur 7.13.

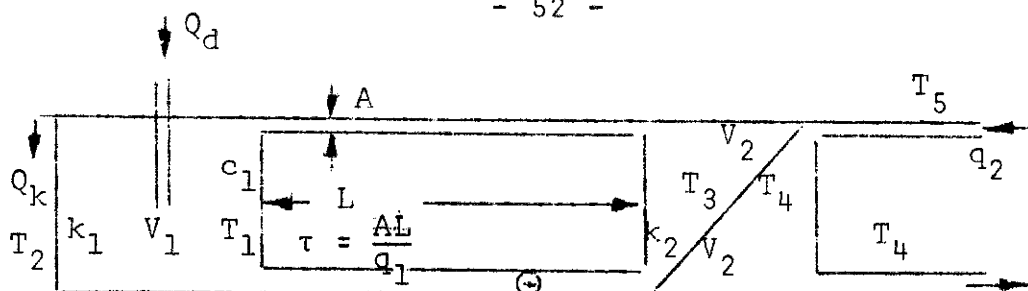


Fig. 7.13. Skisse av forbindelsen mellom varmtvannsagregatet og pasteuravdelingen.

Symbolene i figur 7.13. er:

$Q_d$  = tilført varmemengde (kcal/sek.)

$Q_k$  = avgitt varmemengde i kondensat (kcal/sek.)

$c$  = spesifikk varme (kcal/kg °C)

$T$  = temperatur (°C)

$V$  = væskemengde (kg)

( $V_1 = 52,3, V_2 = V_3 = 2,94$ )

$q$  = gjennomstrømning (kg/sek.)

( $q_1 = 1,67, q_2 = 0,556$  ved henholdsvis 6000 og 2000 kg/h)

$A$  = tverrsnitt (dm<sup>2</sup>)

$L$  = lengde (dm)

$\tau$  = transportforsinkelse (sek.)

$k$  = varmegjennomgangstall (kcal/m<sup>2</sup> sek. °C)

( $k_1 = 3,1 \cdot 10^{-3}, k_2 = 0,79$ )

$F_1$  = overflaten til varmtvannsbeholderen (0,85m<sup>2</sup>)

$F_2$  = varmeoverføringsflaten i pasteuravdelingen (1,82 m<sup>2</sup>)

Ser en bort fra varmetap i rør og pasteuravdelingen, får en følgende likevektslikninger for varmebalansen:

$$(20) \quad \frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{c \cdot V_1} \left[ Q_d - Q_k - k_1 \cdot F_2 \cdot (T_1 - T_2) - q_1 \cdot c \cdot T_1 + q_1 \cdot c \cdot T_3(t - \tau) \right]$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{c \cdot V_2} \left[ q \cdot c \cdot T_1(t - \tau) - q_1 \cdot c \cdot T_3 - k_2 \cdot F_2 \cdot (T_3 - T_4) \right]$$

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{c \cdot V_2} \left[ k_2 \cdot F_2 \cdot (T_3 - T_4) - q_2 \cdot c \cdot (T_4 - T_5) \right]$$



Løsningen av tredjegradsligningen ble utført på data-maskin ved hjelp av et program som simulerte løsningene. En fikk ikke på denne måten eksakt løsning, men nøyaktigheten ble valgt til tre sikre desimaler etter komma, og det var tilfredsstillende for denne undersøkelsen.

For å få tegnet inn overføringsfunksjonen i Bodediagrammet, er det nødvendig å skrive om ligning 22, og regne ut forsterkningen i desibel.

$$(23) \quad G(s) = \frac{5,5(1 - 5,7s)}{(1 + 0,8s)(1 + 3,1s)(1 + 142,9s)}$$

Setter en  $s = j\omega$  kan en tegne funksjonen 23 inn i Bodediagrammet og finne amplituden og faseforløpet. I Bodediagrammet kan en finne hvilken forsterkning en kan legge inn i sløyfen før systemet blir ustabil. I figur 7.15. er Bodediagrammet for overføringsfunksjon 23 tegnet inn.

Bodediagrammet består av både amplitude og fase og i dette tilfellet tegnet inn i samme diagram. Langs horisontalaksen er det avsatt en logaritmisk skala for vinkelfrekvensen  $\omega$  radianer pr. sekund, langs vertikalaksen i amplitudediagrammet  $|G|$  desibel og langs vertikalaksen for fasediagrammet  $G$  i grader. Hver tidskonstant i  $G(j\omega)$  gir et amplitudeforløp som faller med 20 desibel pr. dekad. Det som er av størst interesse for stabiliteten, er at fasedreiningen krysser  $180^\circ$ -linjen. Det er ut fra denne kryssfrekvensen en foretar stabilitetsundersøkelsen. En trekker vertikalt en linje fra fasens kryssningspunkt med  $180^\circ$ . Fra skjæringspunktet med amplitudekurven legger en til en forsterkningsmargin på 6 desibel og finner den horisontale linjen som forsterkningen kan økes til. Fra kryssningspunktet med den sistnevnte linje og amplitudekurven trekker en vertikalt en linje ned mot  $180^\circ$ -linjen. Fra skjæringspunktet mellom denne linjen og fasekurven regner en ut fasemarginen som er avstand mellom skjæringspunktet og  $180^\circ$ -linjen. Fasemarginene bør være minst  $45^\circ$ .

I figur 7.15. er fasekurve 1 fasedreiningen til ligning 23. Fasekurve 2 er fasedreiningen til ligning 23. med tillegg for transportforsinkelsen  $\tau = 1,44$  sek. mellom posisjon 1 og 2 hvor regulatorens temperaturføler var plassert. Denne transportforsinkelsen har en på enden av den delen av systemet  $G(s)$

refererer seg til så dette blir å betrakte som en ren transportfor-  
sinkelse som bare gir fasedreininger. I Bodediagrammet kan en da  
bare addere fasedreiningene som  $e^{-1,44s}$  gir og en får kurve 2.

Med føleren i posisjon 1 kan en øke forsterkningen i  
sløyfen med 13,3 dB før en kommer over i ustabil område. En har  
da 6 dB forsterkningsmargin og  $22^\circ$  fasemargin. For å oppnå  $45^\circ$   
fasemargin kan en i praksis bare øke forsterkningen med 7,5 dB.  
En har da en forsterkningsmargin på 11,8 dB. Plasserer en  
føleren i posisjon 2, kan en øke forsterkningen med bare 4,5 dB,  
og en har da  $45^\circ$  fasemargin. Fasens kryssfrekvens med  $180^\circ$ -  
linjen er for kurve 1 0,64 rad. pr. sek. og for kurve 2 0,37  
rad. pr. sek.

En regner ut  $G(s) = \frac{T_4}{P}$  (s) med innsatte verdier for  
driftstilstanden med 4000 og 2000 liter pr. time henholdsvis  
varmt vann og melk. Da er de målte verdiene for  $k_2 = 0,67$   
kcal/sek.  $^\circ\text{C}$  og  $\tau = 8,5$  sek.

$$(24) \quad G(s) = \frac{0,0030(1 - 8,5 \cdot s)}{(s+1,040)(s+0,234)(s+0,004)}$$

Skriver en om ligning (24) og regner ut forsterkningen  
i desibel, får en:

$$(25) \quad G(s) = \frac{9,8(1 - 8,5 \cdot s)}{(1+0,9 \cdot s)(1+4,3 \cdot s)(1+250 \cdot s)}$$

En setter  $s = j\omega$  i ligning 25 og amplitude og fasefor-  
løp er tegnet inn i figur 7.16. En bruker de samme benevningene  
langs aksene og fasekurve 1 og 2 svarer til de samme som i  
figur 7.15.

Med føleren i posisjon 1 kan en, som figur 7.16. viser,  
øke forsterkningen med 12,7 dB før en når det ustabile området.  
En har da en forsterkningsmargin på 6 dB og fasemargin på  $19^\circ$ .  
 $45^\circ$  fasemargin oppnår en ved å øke forsterkningen med 4,7 dB og  
en har da 14 dB forsterkningsmargin. Med føleren i posisjon 2,  
kan en bare øke forsterkningen 3,2 dB, og da får en  $38^\circ$  fasemargin.  
Det mangler bare  $6^\circ$  for å oppnå tilfredsstillende fasemargin.  
Det oppnår en når en øker forsterkningen med 2,2 dB. En har da  
en forsterkningsmargin på 6,5 dB. Fasens kryssfrekvens med  $180^\circ$ -  
linjen er for kurve 1 0,50 rad. pr. sek. og for kurve 2  
0,29 rad. pr. sek.



Fig. 7.15. Bodediagram for driftstilstanden med 2000 liter melk pr. time og oppvarming med 6000 liter varmtvann pr. time.

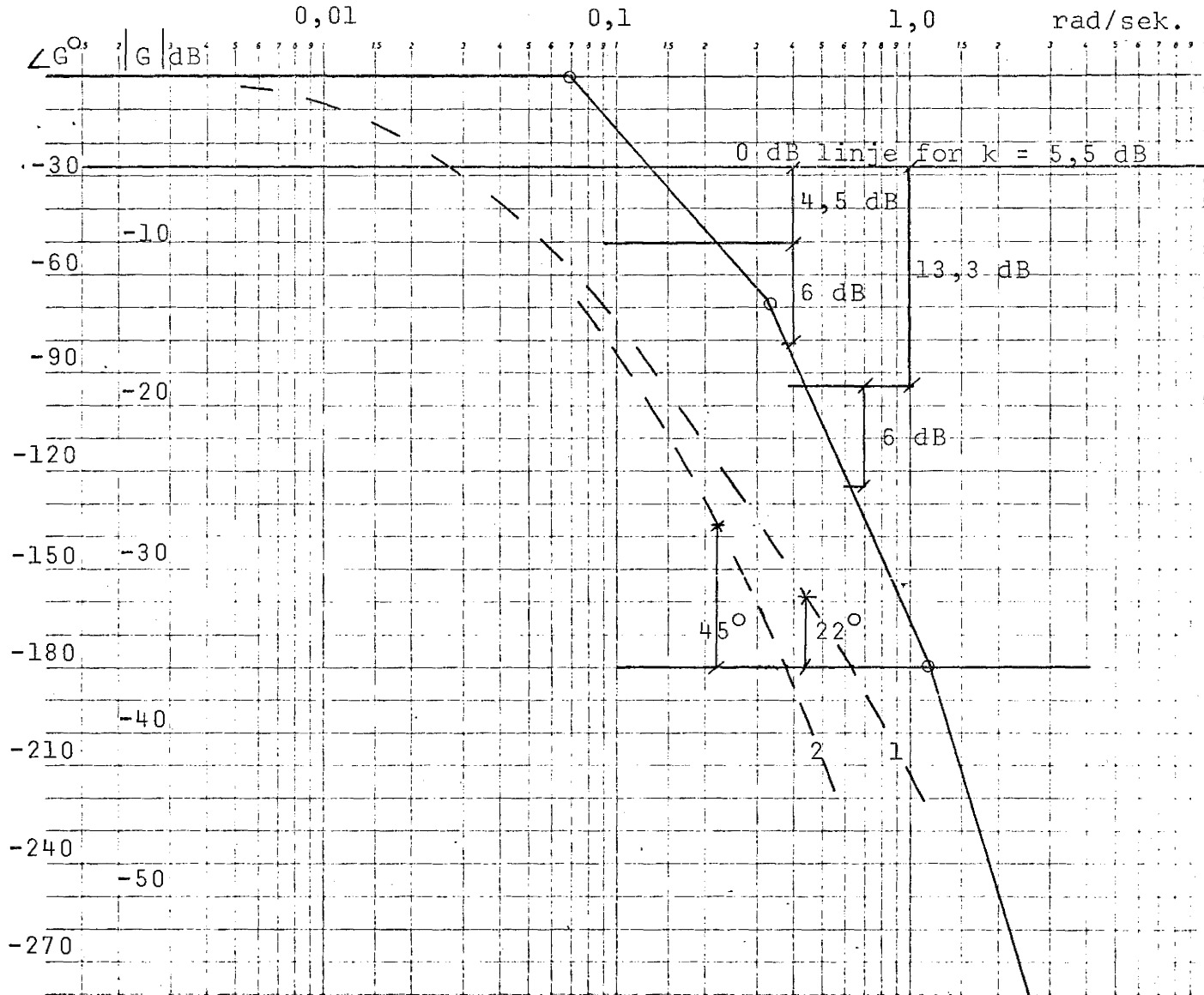
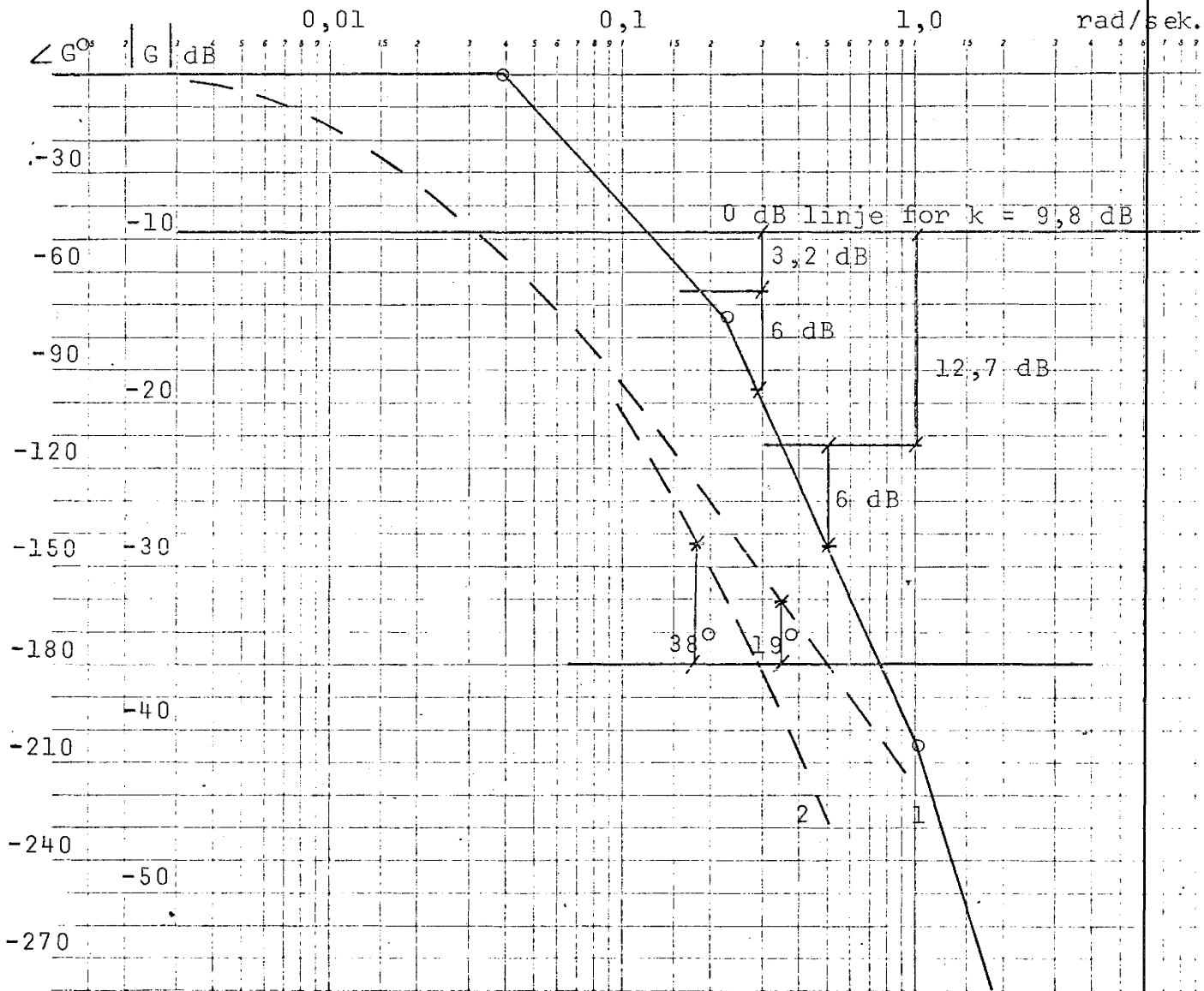


Fig. 7.16. Bodediagram for driftstilstanden med 2000 liter melk pr. time og oppvarming med 4000 liter varmtvann pr. time.



### 7.2.7. Resultater.

I avsnittene 7.2.1. til 7.2.6. er det redegjort for virkemåten til hver av de 6 variasjonene  $Z_1 - Z_6$  som ble undersøkt. Det ble i alt undersøkt 90 driftstilstander. For å få undersøkt alle driftstilstandene, var det nødvendig å utføre målinger ved 215 variasjoner av driftstilstandene. Måleresultatene er gjengitt i tabell 7.3. A, B og C. I tabellene er det også tatt med frekvensen ved de ustabile driftstilstandene i perioder pr. sekund, Hz og vinkelfrekvensen i radianer pr. sekund. Det siste er tatt med for å sammenligne resultatene med de teoretiske overføringsfunksjonene som er utregnet på basis av målte verdier for gjennomstrømning, volum varmegjennomgangstall og transportforsinkelse. Dessuten er amplituden i  $^{\circ}\text{C}$  målt.

I tabell 7.3. A. er resultatene for målingene ved gjennomstrømning av 4000 liter varmtvann pr. time gjengitt. En ser at ved 6 av de 30 undersøkte driftstilstandene kunne en pasteurisere stabilt. Dvs. en kunne holde stabil pasteuriseringstemperatur  $T_4$  ved  $3,8 \text{ kp/cm}^2$ . Dette var det høyeste damptrykk en hadde tilgang til.

Ved tilstand 2, 3, 7 og 8 målte en stabil  $T_4$  ved impulsvariasjon på  $\pm 500$  liter pr. time i 10 sekunder. Damptrykk etter reduksjonsventilen var da  $0,1 \text{ kp/cm}^2$  lavere enn trykket en målte ustabil  $T_4$  uten forstyrrelse. Derfor står det ikke oppført frekvens og amplitude resultater ved de nevnte tilstander.

Variasjon av innløpstemperaturen ble utført ved et trykk på  $0,1 \text{ kp/cm}^2$  lavere enn det trykket en fant som forårsaket ustabil  $T_4$  uten forstyrrelse. Resultatene viser at 6 av 12 variasjoner av innløpstemperaturen førte til at  $T_4$  ble ustabil. Som det går fram i avsnitt 7.2.4., økes overskuddet av varmemengde og dermed forsterkningen når en forandrer innløpstemperaturen fra  $9 - 20^{\circ}\text{C}$ . Resultatene viste også at dette var tilfellet i praksis. Driftstilstand 4, 9, 14 og 24 var ustabile ved forandring av innløpstemperaturen fra  $9 - 20^{\circ}\text{C}$  dvs. en får øketoverskudd av varmemengde og dermed øketforsterkning. De tilhørende driftstilstandene med variasjon av innløpstemperaturen fra  $20 - 9^{\circ}\text{C}$  var stabile og er vist ved driftstilstand 10, 15 og 25. Driftstilstand 5 var ikke mulig å gjennomføre p.g.a. ustabil utgangstilstand.

De fem nederste driftstilstandene var alle stabile. Dette stemmer godt med teorien i avsnitt 7.2.2. Forsterkningen i reguleringssløyfen var redusert til det laveste av de tre trinn den ble undersøkt ved. Men når det gjelder plasseringen av regulatorens temperaturføler stemmer ikke teorien i avsnitt 7.2.5. fullt så godt. En skulle ventet at de fem nederste driftstilstandene hadde vært ustabile og driftstilstandene 21 til 24 stabile. Dette p.g.a. at i de sistnevnte driftstilstandene var regulatorens temperaturføler plassert i posisjon 1 dvs. uten tillegg av transportforsinkelse. Fasekurven er i dette tilfellet ikke så bratt som ved de 5 siste driftstilstandene. Derfor skulle sannsynligheten for å oppnå stabil  $T_4$  være større. Noen sannsynlig forklaring på forholdet kan ikke finnes uten at det utføres mer omfattende undersøkelse av overføringsfunksjonen i platepasteuren.

Vinkelfrekvensen for de ustabile driftstilstandene varierte mellom 0,13 og 0,15 rad. pr. sek. Gjennomsnittet for frekvensene med regulatorens føler plassert i posisjon 1 var 0,143 og i posisjon 2 0,135. Det var derfor ubetydelig forskjell på de to gjennomsnittene. Fasens kryssfrekvens med  $180^\circ$ -linjen i figur 7.16. viste for føleren i posisjon 1 0,50 rad. pr. sek. dvs. 0,36 rad. pr. sek. høyere enn de målte verdiene. Med føleren i posisjon 2 var de tilsvarende resultatene 0,29 rad. pr. sek. og forskjellen ble da 0,15 rad. pr. sek. Resultatene for føleren plassert i posisjon 2 viste best overensstemmelse. Overføringsfunksjonen for prosessen med føleren i posisjon 1 har sannsynligvis noe mer transportforsinkelse enn det som ble beregnet.

I tabell 7.3. B.finner en resultatene for driftstilstandene ved gjennomstrømning av 6000 liter varmtvann pr. time.

Ved 17 av de 30 driftstilstandene som ble undersøkt, kunne en pasteurisere stabilt ved et damptrykk på  $3,8 \text{ kp/cm}^2$ .

Driftstilstandene 51 til 60 var alle stabile. Dette var også ventet fordi her var forsterkningen i reguleringssløyfen lavest. Tillegget i transportforsinkelsen en får ved å flytte regulatorens temperaturføler hadde ingen innvirkning på stabiliteten.

Resultatene for driftstilstandene 41 til 50 viser det samme som resultatene for de 10 nederste driftstilstandene i figur 7.3. A. I figur 7.3. B. er det samme forholdet målt ved den nest laveste forsterkningsstilling i regulatorsløyfen. Ved driftstilstandene 41 til 50 med regulatorens føler plassert i posisjon 1 var 4 av 5 driftstilstander ustabile. Ved samme forsterkning i regulatorsløyfen var alle driftstilstandene stabile når regulatorens føler var plassert i posisjon 2.

Driftstilstandene 44 og 45 viste også avvik fra det som var ventet. Impulsvariasjon ved melkens innløpstemperatur var mer stabil fra 9-20° C enn fra 20-9° C. Amplituden til den ustabile driftstilstanden 45 var bare 0,2° C. Derfor kan en betrakte den som stabil svingning med så lav amplitude at pastorens termograf ikke målte svingningene.

Fasens teoretiske kryssfrekvens med 180°-linjen er vist i figur 7.15. Med føleren plassert i posisjon 1 og 2 var kryssfrekvensen henholdsvis 0,64 og 0,37 rad. pr. sek. Den tilsvarende målte svingefrekvens var henholdsvis 0,21 og 0,17 rad. pr. sek. Forskjellen mellom teoretisk og målt kryssfrekvens var ved posisjon 1 0,43 rad. pr. sek. og ved posisjon 2 0,20 rad. pr. sek. Forskjellen var ubetydelig større ved sirkulasjon av 6000 i forhold til forskjellen ved 4000 liter pr. time.

I tabell 7.3. C. er resultatene for gjennomstrømning av 8000 liter varmtvann pr. time gjengitt. Alle driftstilstandene var da stabile for et damptrykk på 3,8 kp/cm<sup>2</sup>. Dette har sin hovedsaklige årsak i at transportforsinkelsen mellom varmtvannsberederen og pastoren ble vesentlig redusert. Transportforsinkelsen ved 4000 liter pr. time var 2 ganger så stor som den en fant ved 8000 liter pr. time. Reduksjonen av transportforsinkelsen var altså stor nok til å redusere hellingen på fasekurven tilstrekkelig til å forhindre at forsterkningsøkningen, som damptrykket på 3,8 kp/cm<sup>2</sup> representerer, brakte prosessen over i ustabil område. Variasjon av overskudd av varmemengde ved å variere gjennomstrømningen og melkens innløpstemperatur var heller ikke store nok til å bringe prosessen ut av balanse.

Ved en åpningsflate på 1,37 mm i strupeventilen ved dampreguleringsventilen, viste målingene at det var ustabil område ved et damptrykk mellom 2,4 og 2,7 kp/cm<sup>2</sup>. Årsaken til at en fant et ustabil område så langt ned i damptrykkområde kunne en ikke forklare ut fra de utførte undersøkelser.

Svingningene i det ustabile område hadde relativt høy frekvens og lav amplitude. Med føleren i posisjon 1 var gjennomsnittlig vinkelfrekvens 0,28 rad. pr. sek. og i posisjon 2 0,23 rad. pr. sek. Den teoretiske overføringsfunksjon ble ikke utregnet p.g.a. den betydelige reduksjon av transportforsinkelsen.

Tabell 7.3.A. Variasjoner av Z<sub>1</sub> - Z<sub>6</sub> ved oppvarming med varmtvann.

Drifts-tilstand	Damp-trykk	Apningstverr-snitt i strupe-ventil ved dampreguleringsventilen		Melkens gjennomstrømning	Melkens innløps-tempera-tur	Regulator-følerens posisjon	Gjennomstrømning av varmtvann	Frekvens		Ampli-tude
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>					Z <sub>3</sub> Liter pr. time	Z <sub>4</sub> °C	
1	2,3	1,37	2000	-	1	4000	0,020	0,13	4,0	
2	2,2	"	+500	-	"	"	"	"	"	
3	"	"	-500	-	"	"	"	"	"	
4	"	"	2000	9-20	"	"	0,022	0,14	2,6	
5	Ikke mulig å utføre p.g.a. ustabil utgangstilstand									
6	2,5	"	"	-	2	"	0,020	0,13	4,8	
7	2,4	"	+500	-	"	"	"	"	"	
8	"	"	-500	-	"	"	"	"	"	
9	"	"	2000	9-20	"	"	0,022	0,14	3,7	
10	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"	
11	2,5	2,32	"	-	1	"	0,024	0,15	2,9	
12	2,4	"	+500	-	"	"	0,023	0,14	2,2	
13	"	"	-500	-	"	"	0,022	0,14	2,6	
14	2,3	"	2000	9-20	"	"	0,024	0,15	2,6	
15	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"	
16	3,8	"	"	-	2	"	"	"	"	
17	2,6	"	+500	-	"	"	0,020	0,13	2,9	
18	2,5	"	-500	-	"	"	0,020	0,13	2,6	
19	3,8	"	2000	9-20	"	"	0,022	0,14	4,8	
20	"	"	"	20-9	"	"	0,022	0,14	5,7	
21	2,8	2,93	"	-	1	"	0,024	0,15	3,3	
22	2,5	"	+500	-	"	"	0,022	0,14	2,6	
23	"	"	-500	-	"	"	0,022	0,14	2,9	
24	2,4	"	2000	9-20	"	"	0,024	0,15	2,4	
25	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"	
26	3,8	"	"	-	2	"	"	"	"	
27	"	"	+500	-	"	"	"	"	"	
28	"	"	-500	-	"	"	"	"	"	
29	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"	
30	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"	

Tabell 7.3.B. Variasjon av Z<sub>1</sub> - Z<sub>6</sub> ved oppvarming med varmtvann

Drifts- tilstand	Damp- trykk	Åpningstverr- snitt i strupe- ventil ved dampreguler- ingsventilen	Melkens gjennom- strømning	Melkens innløps- tempera- tur	Regulator- følerens posisjon	Gjennom- strømning av varmt- vann	Frekvens	$\omega$	Ampli- tude
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	F	rad.pr.	OC
	kp/cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Liter pr. time	OC		Liter pr. time	Hz	sek.	OC
31	2,4	1,37	2000	-	1	6000	0,028	0,18	2,6
32	"	"	+500	-	"	"	0,028	0,18	2,2
33	2,3	"	-500	-	"	"	0,028	0,18	2,2
34	"	"	2000	9-20	"	"			
35	"	"	"	20-9	"	"			
36	2,7	"	"	-	2	"	0,026	0,16	3,3
37	2,5	"	+500	-	"	"	0,032	0,20	1,8
38	2,4	"	-500	-	"	"	0,024	0,15	2,4
39	2,6	"	2000	9-20	"	"			
40	"	"	"	20-9	"	"			
41	3,8	2,32	"	-	1	"			
42	"	"	+500	-	"	"	0,036	0,23	1,1
43	3,6	"	-500	-	"	"	0,036	0,23	1,1
44	3,8	"	2000	9-20	"	"			
45	"	"	"	20-9	"	"	0,036	0,23	0,2
46	"	"	"	-	2	"			
47	"	"	+500	-	"	"			
48	"	"	-500	-	"	"			
49	"	"	2000	9-20	"	"			
50	"	"	"	20-9	"	"			
51	"	2,93	"	-	1	"			
52	"	"	+500	-	"	"			
53	"	"	-500	-	"	"			
54	"	"	2000	9-20	"	"			
55	"	"	"	20-9	"	"			
56	"	"	"	-	2	"			
57	"	"	+500	-	"	"			
58	"	"	-500	-	"	"			
59	"	"	2000	9-20	"	"			
60	"	"	"	20-9	"	"			



Tabell 7.3.C. Variasjon av Z<sub>1</sub> - Z<sub>6</sub> ved oppvarming med varmtvann.

Drifts- tilstand	Damp- trykk	Åpningstverr- snitt i strupe- ventil ved dampreguler- ingsventil	Melkens gjennom- strømning	Melkens innløps- tempera- tur	Regulator- følerens posisjon	Gjennom- strømning av varmt- vann	Frekvens Hz	$\omega$ rad.pr. sek.	Ampli- tude °C	
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	f	$\omega$		
	kp/cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Liter pr. time	°C		Liter pr. time				
61	3,8	2,7	1,37	2000	-	1	8000	0,043	0,27	1,5
62	"	2,5	"	+500	-	"	"	0,045	0,28	0,6
63	"	"	"	-500	-	"	"	0,045	0,28	0,9
64	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
65	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"
66	"	2,6	"	"	-	2	"	0,041	0,25	1,1
67	"	2,5	"	+500	-	"	"	0,036	0,23	1,5
68	"	2,4	"	-500	-	"	"	0,034	0,21	1,3
69	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
70	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"
71	"	2,32	"	"	-	1	"	"	"	"
72	"	"	"	+500	-	"	"	"	"	"
73	"	"	"	-500	-	"	"	"	"	"
74	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
75	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"
76	"	"	"	"	-	2	"	"	"	"
77	"	"	"	+500	-	"	"	"	"	"
78	"	"	"	-500	-	"	"	"	"	"
79	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
80	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"
81	"	2,93	"	"	-	1	"	"	"	"
82	"	"	"	+500	-	"	"	"	"	"
83	"	"	"	-500	-	"	"	"	"	"
84	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
85	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"
86	"	"	"	"	-	2	"	"	"	"
87	"	"	"	+500	-	"	"	"	"	"
88	"	"	"	-500	-	"	"	"	"	"
89	"	"	"	2000	9-20	"	"	"	"	"
90	"	"	"	"	20-9	"	"	"	"	"

7.3. Varierte driftsforhold ved pasteurisering ved oppvarming med vakuumdamp.

Driftsforholdene ble variert på samme måte ved oppvarming med vakuumdamp som med varmtvann. Dette ble gjort for om mulig å kunne trekke sammenligninger mellom de to måtene å varme opp melk på. Ved oppvarming med vakuumdamp faller  $Z_6$  bort, derfor får en ikke mer enn 30 måter å variere driften av pasteuren på.

Den eneste variasjon som det er nødvendig å beskrive nærmere enn det som før er beskrevet i avsnittene 7.2.1. til 7.2.5., er transportforsinkelsen en får ved å flytte regulatorens temperaturføler mellom posisjon 1 og 2 fig. 7.10.

Betrakter en overføringsfunksjonen mellom netto tilført varmemengde  $Q$  og pasteuriseringstemperaturen, kan den tilnærmet beregnes med en funksjon med to tidskonstanter. Differensialligningene for det forenklete systemet kan skrives som:

$$(26) \quad \frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{cV_2} [Q - k_2 F_2 (T_3 - T_4)]$$

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{cV_2} [k_2 F_2 (T_3 - T_4) - q_2 c (T_4 - T_5)]$$

Laplacetransformerer en ligningene 26 og stiller opp ligningene i et elementært blokkdiagram, får en når en setter  $c = 1$  for vann:

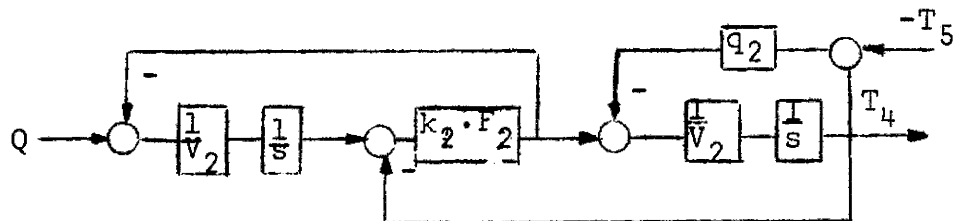


Fig. 7.17. Elementært blokkdiagram av pasteuriseringsprosessen oppvarmet med vakuumdamp.

Reduserer en blokkdiagram 7.17. og setter  $T_5 = 0$ , får en overføringsfunksjonen mellom  $G(s)$  mellom  $Q$  og  $T_4$ .

$$(27) \quad G(s) = \frac{T_4}{Q}(s) = \frac{k_2}{(k_2 + V_2 s)(q_2 + V_2 s) + k_2 V_2 s}$$

En forutsetter at  $k$ -verdien er den samme som ved oppvarming med varmtvann i eksemplet i avsnitt 7.2.6. Ved å sette inn  $k_2 = 0,79 \text{ kcal/m}^2 \text{ sek. } ^\circ\text{C}$  i ligning 27 sammen med de øvrige

målte verdiene og faktoreriserer annengradsligningen i nevneren, får en:

$$(28) \quad G(s) = \frac{0,17}{(s+0,085)(s+1,085)}$$

Skriver en om ligning 28 og regner om forsterkningen i desibel, får en:

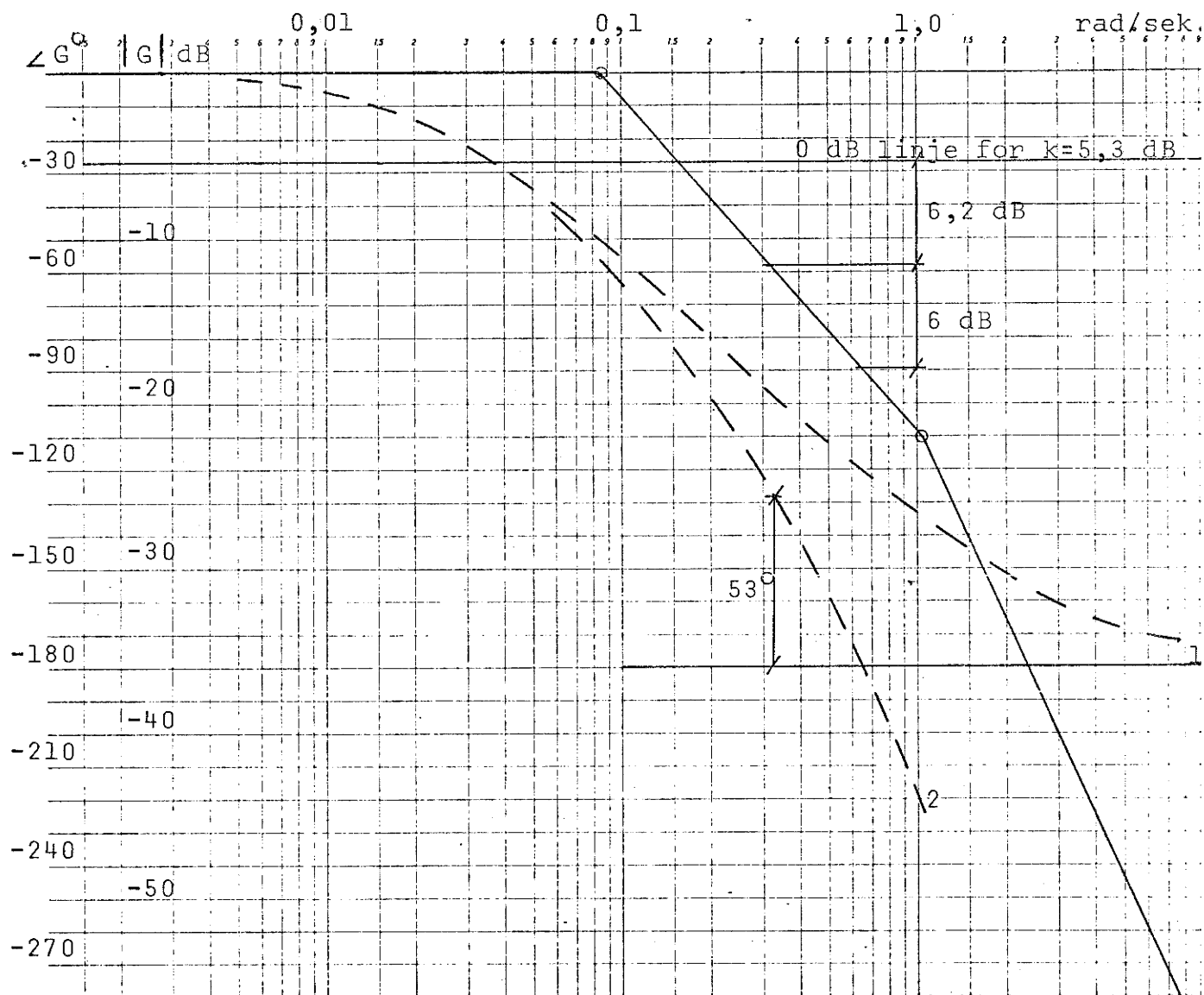
$$(29) \quad G(s) = \frac{5,3}{(1+0,9 \cdot s)(1+11,8 \cdot s)}$$

For å tegne inn amplitude og faseforløpet i Bodediagrammet setter en  $s = j\omega$ . I figur 7.18. er amplitude og faseforløpet tegnet inn for overføringsfunksjonen 29.

På grunn av at overføringsfunksjonen bare har to tidskonstanter, krysser ikke fasekurven  $180^\circ$ -linjen når føleren er plassert i posisjon 1. Dette medfører at systemet er stabilt for alle frekvenser med føleren plassert i posisjon 1.

Med føleren plassert i posisjon 2 får en i tillegg en transportforsinkelse med  $\tau = 1,44$  sekunder som gir et tillegg i fasedreiningen som vist ved fasekurve 2. Det blir ingen forandring i amplitudeforløpet. Fasekurve 2 krysser  $180^\circ$ -linjen ved  $\omega = 0,65$  rad. pr. sek. Med en forsterkningsmargin på 6 dB kan en da bare øke forsterkningen i overføringsfunksjonen 29 med 6,2 dB. Ved denne forsterkningsøkningen får en  $53^\circ$  fasemargin.

Fig. 7.18. Bodediagram for driftstilstanden med 2000 liter melk pr. time og oppvarming med vakuumb-damp.



### 7.3.1. Resultater.

Undersøkelsen av regulering ved oppvarming med vakuumdamp ble bare en tredjedel så omfattende som undersøkelsen av oppvarming med varmtvann p.g.a. variasjonen  $Z_6$ . De tilsvarende variasjonene  $Z_1$  til  $Z_5$  resulterte i 30 kombinasjoner. Det ble i alt undersøkt 30 driftstilstander. For å få undersøkt alle driftstilstandene med hensyn på stabilitet, var det nødvendig å utføre målinger ved 92 variasjoner av driftstilstandene.

Ved pasteurisering med vakuumdamp var det stor forskjell mellom de to stedene å plassere regulatorens temperaturføler.

Ved posisjon 1 hadde en minimal transportforsinkelse som en teoretisk kunne se bort fra. Fasekurven ville derfor ikke krysse  $180^\circ$ -linjen, så en kunne teoretisk få stabil regulering ved alle frekvenser og ved betydelig forsterkningsøkning. Dette stemte godt med resultatene i tabell 7.4. Driftstilstandene 1 til 5, 11 til 15 og 21 til 25 var alle stabile både for forsterkningsøkningen ved å øke damptrykket til  $3,8 \text{ kp/cm}^2$ , og for variasjon av overskudd av varmemengde som variasjon av gjennomstrømning og innløpstemperatur representerte.

Med føleren plassert i posisjon 2 fikk en et tillegg av transportforsinkelse som vist i figur 7.18. Fasekurven ble betydelig senket, og dette førte til at den krysset  $180^\circ$ -linjen ved  $\omega = 0,65$  rad. pr. sek. En forsterkningsøkning i dette tilfellet vil føre til ustabil prosess. Resultatene viser at en kunne ikke i noen av de driftstilstandene med føleren i posisjon 2 pasteurisere stabilt med damptrykk over  $2,1 \text{ kp/cm}^2$ .

Ved driftstilstand 9 og 10 fant en avvikende resultat fra teorien beskrevet i avsnitt 7.2.4. Resultatet skyldes sannsynligvis tilfeldighet fordi fenomenet ble målt bare en gang tidligere i tabell 7.3.B. ved driftstilstand 45.

Med føleren i posisjon 2 fant en teoretisk kryssfrequensen med  $180^\circ$ -linjen til  $\omega = 0,65$  rad. pr. sek. Den gjennomsnittlige målte svingefrekvens var  $0,39$  rad. pr. sek. Dette var  $0,26$  rad. pr. sek. lavere enn den teoretiske kryssfrequensen.

Samtlige frekvenser var relativt høye og amplituden som for oppvarming med varmtvann og sirkulasjon med 6000 liter varmtvann pr. time. Frekvensen var imidlertid så høy at termografen ikke reagerte på svingningene.

Tabell 7.4. Variasjon av Z<sub>1</sub> - Z<sub>5</sub> ved oppvarming med vakuumdamp.

Drifts-tilstand	Damp-trykk	Åpningstverrsnitt i strupeventil ved dampreguleringsventilen	Melkens gjennomstrømning	Melkens innløps-temperatur	Regulatorfølerens posisjon	Frekvens	Amplitude	
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	f		
	kp/cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Liter pr. time	oC		Hz	rad.pr. oC	
						sek.		
1	3,8	1,37	2000	-	1	0,065	0,41	2,0
2	"	"	+500	-	"	0,057	0,36	1,3
3	"	"	-500	-	"	0,057	0,36	1,8
4	"	"	2000	9-20	"			
5	"	"	"	20-9	"			
6	1,6	"	"	-	2	0,065	0,41	2,0
7	1,1	"	+500	-	"	0,057	0,36	1,3
8	"	"	-500	-	"	0,057	0,36	1,8
9	1,5	"	2000	9-20	"			
10	"	"	"	20-9	"	0,065	0,41	1,9
11	3,8	2,932	"	-	1			
12	"	"	+500	-	"			
13	"	"	-500	-	"			
14	"	"	2000	9-20	"			
15	"	"	"	20-9	"			
16	1,9	"	"	-	2	0,065	0,41	1,8
17	1,6	"	+500	-	"	0,061	0,38	1,8
18	"	"	-500	-	"	0,063	0,39	2,2
19	1,8	"	2000	9-20	"			
20	"	"	"	20-9	"			
21	3,8	2,93	"	-	1			
22	"	"	+500	-	"			
23	"	"	-500	-	"			
24	"	"	2000	9-20	"			
25	"	"	"	20-9	"			
26	2,1	"	"	-	2	0,065	0,41	1,3
27	1,6	"	+500	-	"	0,061	0,38	1,1
28	"	"	-500	-	"	0,061	0,38	1,3
29	1,9	"	2000	9-20	"	0,065	0,41	2,4
30	ikke mulig å utføre f.g.a. ustabil 20-9 utgangstilstand.							

8. Undersøkelse av noen varmetekniske forhold ved platepasteuren.

Den varmetekniske delen av undersøkelsen omfattet måling og beregning av:

1. Varmegjennomgangstallet i pasteuravdelingen.
2. Varmegjennomgangstallet i regenerativavdelingen.
3. Regenerativvirkning ved varierende gjennomstrømning.
4. Varmetap i pasteuravdelingen.
5. Trykktap i de enkelte avdelingene i platepasteuren.
6. Måling av temperaturfordelingen over to plater, en i hver ende av pasteuravdelingen.
7. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom to plater i pasteuravdelingen.

Hovedvekten av arbeidet ble lagt på målingene av temperaturfordelingen over platene. De øvrige resultatene er beregnet på grunnlag av målinger som ble utført samtidig med målingen av temperaturfordelingen.

8.1. Varmegjennomgangstallet ved varierende gjennomstrømning.

Varmegjennomgangstallet for en plan vegg eller plate er et sammensatt tall som avhenger av varmeovergangstallet  $\alpha$  på hver side av platen, platetykkelsen og varmeledningstallet  $\lambda$  gjennom platen.

Varmeovergangstallet  $\alpha$  er sammensatt av flere verdier og det totale varmeovergangstallet kan skrives som:

$$(30) \quad \alpha_t = \alpha_{kw} + \alpha_s + \alpha_d$$

hvor  $\alpha_{kw}$  = varmeovergangstallet som funksjon av det omgivende mediums egenkonveksjon  $k$ , eller av stadig påtrykt strømningshastighet  $w$  (m/s).

$\alpha_s$  = bidrag fra stråling

$\alpha_d$  = bidrag fra avdampning, kondensasjon eller frostnedslag.

I tilfellet med varmeovergangstallet i platepasteuren oppvarmet med varmtvann blir det bare  $\alpha_{kw}$  som kommer i betraktning. Da det ikke er mulig å skille bidraget fra konveksjon og påtrykt strømningshastighet er disse satt sammen til en enhet.

Varmeovergangstallet på melke- og oppvarmingssiden ligger i området 5000 - 6000 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Ved oppvarming med vakuumdamp får en bidrag fra  $\alpha_{kw}$  på melkesiden, men på oppvarmingssiden får en bidrag fra  $\alpha_d$  som refererer seg til varmeovergangstallet ved kondensasjon. Dette varmeovergangstallet varierer mellom 10000 og 20000 kcal/m<sup>2</sup>h °C.

I gunstige tilfeller kan dette varmeovergangstallet komme opp i 100000 kcal/m<sup>2</sup>h °C.

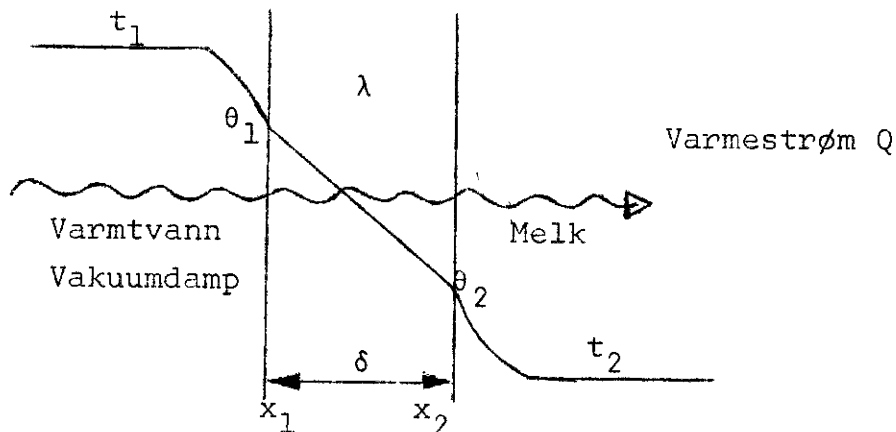


Fig. 8.1. Stasjonært temperaturforløp i en plate med varmeovergang på begge sider.

Ligningene for varmestrømmen Q kan skrives som:

(31)  $Q = \alpha_1 \cdot F (t_1 - \theta_1)$  Fra varmemedium til plate.

(32)  $Q = \alpha_2 \cdot F (\theta_2 - t_2)$  Fra plate til medium på motsatt side (melk).

hvor  $Q$  = varmestrømmen (kcal/h)

$\alpha_1$  = varmeovergangstallet på siden mot varmemedium (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$\alpha_2$  = varmeovergangstallet på siden mot melk (kcal/m<sup>2</sup>h °C).

$F$  = overflaten (m<sup>2</sup>)

$t_1$  = temperaturen i varmemedium (°C)

$\theta_1$  = overflatetemperaturen på siden mot varmemedium (°C)

$t_2$  = temperaturen i melk (°C)

$\theta_2$  = overflatetemperaturen på siden mot melk (°C)

Varmeledningstallet  $\lambda$  inngår direkte i Fouriers ligning for varmestrøm gjennom en homogen isotrop vegg eller plate med temperaturen  $t_1$  på den ene siden og  $t_2$  på den andre.



$$(33) \quad Q = -\lambda \cdot F \frac{dt}{dx}$$

hvor  $Q$  = varmestrøm (kcal/h)

$\lambda$  = varmeledningstallet (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$F$  = tverrsnittet normalt på  $x$  akse (m<sup>2</sup>)

$\frac{dt}{dx}$  = temperaturgradienten langs strømningsretningen

Integrerer en ligningen, får en:

$$Q \int_{x_1}^{x_2} dx = \lambda \cdot F \int_{\theta_1}^{\theta_2} dt$$

$$Q (x_2 - x_1) = -\lambda \cdot F (\theta_2 - \theta_1)$$

Setter en  $x_2 - x_1 = \delta$  får en:

$$(34) \quad Q = \frac{\lambda}{\delta} F (\theta_1 - \theta_2)$$

Ved stasjonær varmestrøm gjennom en plate er varmemengden som går inn i platen like stor som den som kommer ut. En kan derfor fra ligningene 31, 32 og 34 eliminere temperaturen på platen  $\theta_1$  og  $\theta_2$  og en får da:

$$(35) \quad Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}} F (t_1 - t_2)$$

hvor  $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}}$  settes lik  $k$  (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$k$  kalles varmegjennomgangstall.

Som en ser av ligning 35 er varmegjennomgangstallet  $k$  en funksjon av bl.a. varmeovergangstallene. For å øke varmeovergangstallet er platene i pasteuravdelingen presset på en slik måte at spalten mellom dem får vekslende tverrsnitt. Dette hjelper til for å få væskestrømmen over i turbulent tilstand ved lav strømningshastighet. Et dimensjonsløst mål for strømming er forholdet mellom treghetskraft og viskositetskraft. Dette forholdet kalles Reynolds tall som gir et empirisk mål for om en væskestrøm er turbulent eller laminær.

$$(36) \quad Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

hvor  $v$  = væskehastigheten (m/s)

$d$  = hydraulisk diameter, for smale spalter tilnærmet lik 2 ganger spaltebredden (m)

$\nu$  = kinematisk seighetsmodul i ( $m^2/s$ )

(=  $1,57 \cdot 10^{-6}$  for vann ved  $4^{\circ}C$ )

(=  $0,42 \cdot 10^{-6}$  " " "  $70^{\circ}C$ )

Ved innløpet til pasteuravdelingen ble det laveste Reynoldstall beregnet til 1788 og det høyeste 5365. Ved utløpet av regenerativavdelingen var det tilsvarende strømningsforhold og temperatur som ved innløpet til pasteuravdelingen. Ved innløpet til regenerativavdelingen var det laveste Reynoldstall 596 og det høyeste 1788. Tidligere undersøkelser 28 viste at i smale spalter av den form en har i platepasteuren, får en turbulent væskestrøm ved Reynoldstall på ca. 200. Alle de beregnede Reynoldstall fra denne undersøkelse viser derfor at en hadde turbulent væskestrøm og derfor de beste betingelser for å få så høyt varmeovergangstall som mulig.

Har en konstant temperatur på den ene siden av en varmevekslerplate og f.eks. strømmende væske på den andre siden får en et temperaturforløp som vist på figur 8.2.

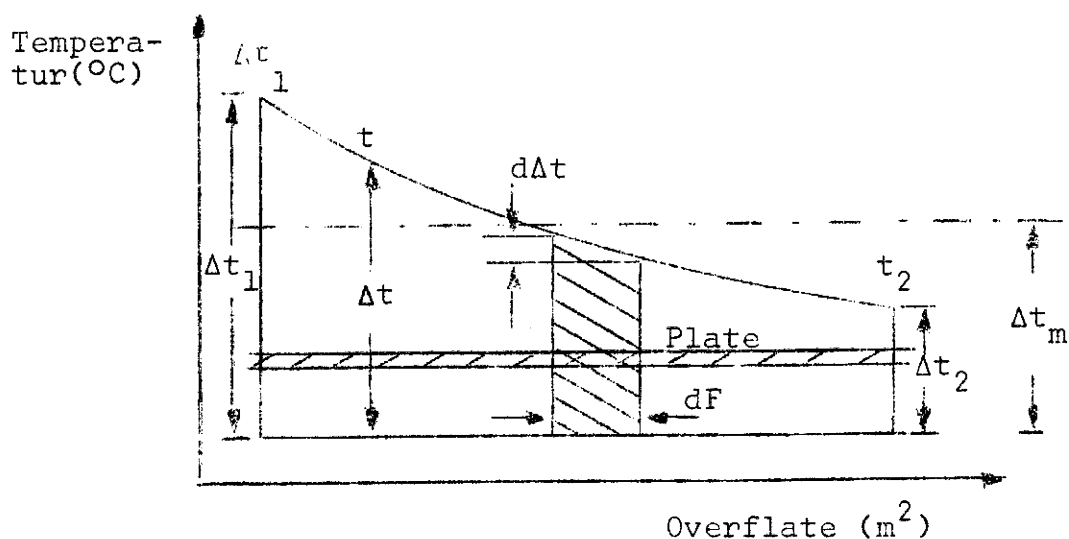


Fig. 8.2. Temperaturfordelingen langs varmevekslerplaten.

Gjennom flaten  $dF$  går det en varmestrøm som kan sammenfattes i følgende ligning:

$$(37) \quad dQ = k \cdot dF \cdot \Delta t$$

hvor  $dQ$  = varmestrøm (kcal/h)

$k$  = varmegjennomgangstall (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$dF$  = overflate (m<sup>2</sup>)

$\Delta t$  = temperaturdifferansen (°C)

En væskemengde  $G$  kg/h som strømmes forbi platen og gjennomgår temperaturforløpet som vist i figur 8.2., gir følgende ligning:

$$(38) \quad dQ = G \cdot c \cdot d\Delta t$$

hvor  $G$  = væskestrømmen (kg/h)

$c$  = spesifikk varme (kcal/kg °C)

$d\Delta t$  = temperaturfallet ved  $dF$  (°C)

Eliminerer en  $dQ$  fra ligning 37 og 38, får en:

$$(39) \quad \frac{k}{G \cdot c} dF = \frac{d\Delta t}{\Delta t}$$

Etter integrasjon over flaten og mellom  $t_1$  og  $t_2$ , får en:

$$(40) \quad \frac{k \cdot F}{G \cdot c} = \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$$

$$(41) \quad \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = e^{\left[ \frac{k \cdot F}{G \cdot c} \right]}$$

Den midlere temperaturdifferans  $\Delta t_m$  kan en nå beregne ut fra figur 8.2. Den varmemengde som overføres gjennom platen med konstant temperatur på den ene siden kan skrives som:

$$(42) \quad Q = G \cdot c (\Delta t_1 - \Delta t_2)$$

Erstatter en temperaturdifferansen ved  $t_1$  og  $t_2$  med den midlere temperaturdifferansen  $\Delta t_m$ , får en:

$$(43) \quad Q = k \cdot F \cdot \Delta t_m$$

Eliminerer en  $Q$  fra ligning 42 og 43, får en:

$$(44) \quad \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\frac{k \cdot F}{G \cdot c}}$$

Anvender en ligning 40 på 44, får en:

$$(45) \quad \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

Den midlere temperaturdifferansen i ligning 45 kalles også den logaritmiske middeltemperatur. Denne ligningen gjelder ikke bare for varmeoverføring med konstant temperatur på den ene siden, men også for motstrøm og likestrøm med forandring i temperaturen på begge sider av varmevekslerplaten.

Dersom en har  $\Delta t_1 \geq 2\Delta t_2$  skal en bruke den logaritmiske middeltemperatur. Omvendt hvis  $\Delta t_1 \leq 2\Delta t_2$  kan en med god tilnærmelse bruke den aritmetriske middeltemperatur.

Ved hjelp av ligning 43 kan en beregne varmegjennomgangstallene for pasteuravdelingen ved varierende gjennomstrømning.

$$(46) \quad k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_m}$$

En ser at  $k$  er proporsjonal med varmemengden som transporteres og omvendt proporsjonal med flaten varmemengden transporteres gjennom og den midlere temperaturdifferansen ved varmevekslingen. Varmemengden  $Q$  ble beregnet på grunnlag av måling av temperaturstigningen i  $^{\circ}\text{C}$  og gjennomstrømmet mengde melk. Temperaturen ble målt med kvikksølvtermometer med  $1/10$   $^{\circ}\text{C}$  inndeling. Væskestrømmen ble målt med kalibrert Rotameter ved 3-4  $^{\circ}\text{C}$ . Derfor kunne en sette spesifikk vekt lik 1.

I tabell 8.1. er det totale varmegjennomgangstallet for pasteuravdelingen gjengitt ved varierende gjennomstrømning.

Tabell 8.1. Varmegjennomgangstallet  $k$  i pasteuravdelingen og regenerativavdelingen ved varierende gjennomstrømning.

Varmtvann liter pr. time	6000	6000	6000	6000	6000	4000	5000	7000
Melk liter pr. time	1000	1500	2000	2500	3000	2000	2000	2000
k-verdi i pasteuravdelingen	1958	2520	2840	3060	3278	2409	2650	3015
k-verdi i regenerativavdelingen	1513	2189	2653	3076	3439	2655	2665	2655
Oppvarming med vakuumdamp, k-verdi i regenerativavdelingen	1520	2201	2676	3110	3459			

Hver k-verdi i tabell 8.1. er gjennomsnitt av 5 måleperioder på 20 minutter hver. Målingene viser at k-verdi i pasteuravdelingen økte ved økende gjennomstrømning av melk. Spredningen var fra 1558 til 3278 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Når en holdt gjennomstrømningen av melk på 2000 liter pr. time og varierte gjennomstrømningen av varmtvann fra 4000 til 7000 liter pr. time var spredningen fra 2409 til 3015 kcal/m<sup>2</sup>h °C.

I regenerativavdelingen viste k-verdien en spredning fra 1513 til 3439 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Til sammenligning er k-verdien i regenerativavdelingen tatt med når en hadde oppvarming med vakuumdamp. Disse k-verdiene ligger litt over de en fant ved oppvarming med varmtvann. Dette fordi den gjennomsnittlige pasteuriseringstemperatur lå 0,4° C høyere ved oppvarming med vakuumdamp. Årsaken til forskjellen i pasteuriseringstemperaturen var at TC-regulatoren som har proporsjonal virkning, har en viss treghet i innstillingen. D.v.s. når en varmer opp pasteuren til pasteuriseringstemperatur en rekke ganger med samme innstilling i regulatoren, må en regne med å finne en viss spredning i den målte pasteuriseringstemperaturen etter at temperaturen har stabilisert seg.

## 8.2. Regenerativvirkning ved varierende gjennomstrømning.

I en platepasteur gjennvinner en varme ved å la den upasteuriserte melken passere på den ene siden av platen i en avdeling og utgående pasteurisert melk på den andre. Denne avdelingen kalles regenerativavdeling.

Forholdet mellom den varmemengden melken mottar i regenerativavdelingen og summen av de varmemengder den mottar i regenerativ- og pasteuravdelingen, benevnes regenerativvirkning. Dette forholdet er bestemt av flere faktorer. Ved hjelp av følgende ligning kan en bestemme regenerativvirkningen:

$$(47) \quad R = \frac{G \cdot c (t_2 - t_1)}{G \cdot c (t_2 - t_1) + G \cdot c (t_3 - t_2)} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}$$

hvor G = melkestrømmen (kg/h)

c = spesifikk varme (kcal/kg °C)

t<sub>1</sub> = melkens innløpstemperatur (°C)

t<sub>2</sub> = melkens temperatur mellom regenerativavdelingen og pasteuravdelingen (°C)

t<sub>3</sub> = melkens pasteuriseringstemperatur (°C)

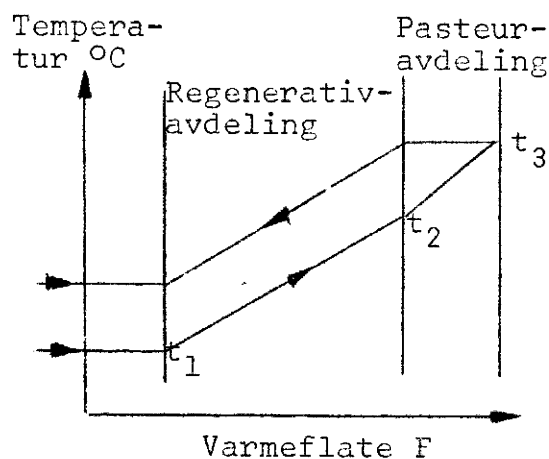


Fig. 8.3. Temperaturforløpet ved pasteurisering av melk.

Figur 8.3. viser temperaturforløpet i regenerativ- og pasteuravdelingen.

Ligning 47 viser at dersom en øker telleren og holder nevneren konstant, øker en regnerativvirkningen. En ser også at dersom en varierer telleren, må varmetilførselen i pasteuravdelingen variere motsatt dersom en skal kunne holde konstant pasteuriseringstemperatur. Med andre ord kan en si at den varmemengde melken ikke har fått tilført i regenerativavdelingen må tilføres i pasteuravdelingen.

Den varmemengde melken får tilført kan også uttrykkes ved  $k$ -verdien, varmeoverføringsflaten og middeltemperaturen i varmevekslerprosessen. I regenerativavdelingen har en følgende uttrykk for varmemengden:

$$(48) \quad Q = G \cdot c (t_2 - t_1) = k_r \cdot F_r \cdot \Delta t_{mr}$$

hvor  $k_r$  = varmegjennomgangstallet i regenerativavdelingen (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$F_r$  = varmeoverføringsflaten (m<sup>2</sup>)

$\Delta t_{mr}$  = den midlere temperaturdifferansen (°C)

I pasteuravdelingen har en tilsvarende uttrykk

$$(49) \quad Q = G \cdot c (t_3 - t_2) = k_p \cdot F_p \cdot \Delta t_{mp}$$

hvor symbolene tilsvarer de i ligning 48 med den forskjell at de referer til pasteuravdelingen.

Setter en ligning 48 og 49 inn i ligning 47, får en:

$$(50) \quad R = \frac{k_r \cdot F_r \cdot \Delta t_{mr}}{k_r \cdot F_r \cdot \Delta t_{mr} + k_p \cdot F_p \cdot \Delta t_{mp}}$$

I ligning 50 ser en at regenerativvirkningen er avhengig av k-verdien i regenerativavdelingen og pasteuravdelingen. Målingene av k-verdien i tabell 8.1. viste imidlertid at det ikke var vesentlig forskjell på k-verdien i pasteuravdelingen og k-verdien i regenerativavdelingen. Middeltemperaturdifferansen i regenerativavdelingen er også i hovedsak avhengig av størrelsen på den varmeoverførende flate. Derfor kan en si at størrelsen på flaten varmeoverføringen skjer gjennom, er i hovedsak avgjørende for hvor stor regenerativvirkning en har i platepasteuren.

En ser i ligning 50 at en teoretisk kan øke varmeoverføringsflaten i regenerativavdelingen så mye at regenerativvirkningen nærmer seg 1,0. Hvor stor varmeoverføringsflaten bør være i regenerativavdelingen bestemmes av økonomiske forhold.

Regenerativvirkningen ble utregnet på grunnlag av de samme målingene som dannet grunnlaget for beregning av varme-gjennomgangstallet i avsnitt 8.1. og resultatene er gjengitt i tabell 8.2.

Tabell 8.2. Regenerativvirkningen i prosent ved varierende gjennomstrømning av melk.

Gjennomstrømning av melk, liter pr. time	1000	1500	2000	2500	3000
Regenerativvirkningen ved oppvarming med varmtvann	78,6	77,9	76,2	74,8	73,5
Regenerativvirkningen ved oppvarming med vakuumdamp	78,5	77,9	76,4	74,3	73,5

Resultatene i tabell 8.2. viser som ventet at det ikke var påviselig forskjell i regenerativvirkningen om en målte ved oppvarming med varmtvann eller ved oppvarming med vakuumdamp. Derimot var det en spredning på 5,1 prosent når en varierte gjennomstrømningen av melk fra 1000 til 3000 liter pr. time.

Når en øker gjennomstrømningen av melk, får en i første omgang høyere k-verdi og temperaturøkningen i regenerativ-

avdelingen er uforandret. Når økningen av gjennomstrømningen har passert den grensen hvor k-verdien ikke klarer å holde temperaturstigningen uforandret med konstant pasteuriseringstemperatur, begynner temperaturøkningen i regenerativavdelingen å synke. Ser en på ligning 47 går det klart fram at dersom temperaturøkningen i regenerativavdelingen synker, må temperaturøkningen i pasteuravdelingen stige, dersom en skal holde konstant pasteuriseringstemperatur. Nevneren i brøken øker da mer enn telleren og regenerativvirkningen synker. Det er i dette område en har målt regenerativvirkningen, fordi resultatene i tabell 8.2. viser at regenerativvirkningen synker med 5,1 prosent når en øker gjennomstrømningen av melk fra 1000 til 3000 liter pr. time.

Tegner en opp resultatene for regenerativvirkningen i et diagram som vist i figur 8.4., ser en at regenerativvirkningen faller tilnærmet lineært fra 1500 til 3000 liter pr. time. Ved gjennomstrømning på 1000 liter pr. time er det flere usikre faktorer vedrørende strømningsforholdene som kan tenkes å gi utslag i lavere regenerativvirkning enn ventet. En undersøkelse ved lavere gjennomstrømning enn 1000 liter pr. time ble ikke utført. Dette fordi ved så lav strømningshastighet var det for stor usikkerhet med hensyn til fordelingen av væskestrømmen på platene.

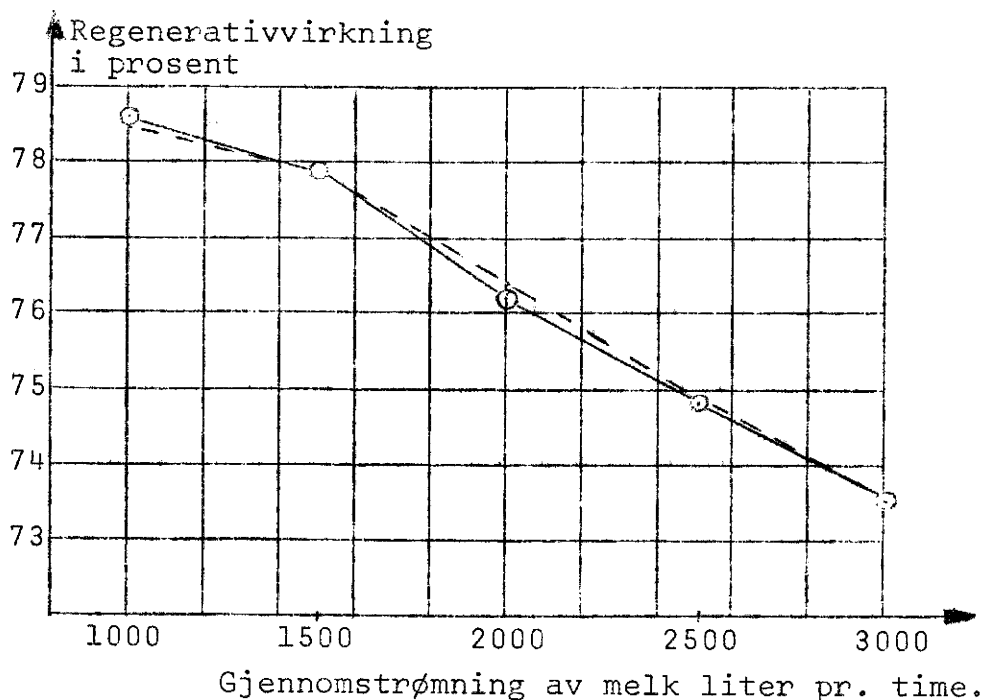


Fig. 8.4. Regenerativvirkning ved varierende gjennomstrømning.

- Oppvarming med varmtvann.
- - - -○ Oppvarming med vakuumdamp.



### 8.3. Varmetap i pasteuravdelingen.

Varmetapet i pasteuravdelingen kan bestemmes på to måter. Den enkleste måten er å beregne den varmemengde varmtvannet har avgitt og den varmemengde melken har mottatt. Differansen mellom disse varmemengdene er tap til omgivelsene. Grunnlaget for beregningene var måling av gjennomstrømmet mengde melk og varmtvann samt temperaturene ved inngangen og utgangen til pasteuravdelingen. Temperaturen ble målt med kvikksølvtermometre med 0,1° C inndelt skala. Termometrene var plassert i termometerlommer i forbindelsesrørene til pasteuravdelingen.

Varmetapet kan uttrykkes i følgende formel:

$$(51) \quad Q_{\text{tap}} = G_v \cdot c_v (t_1 - t_2) - G_m \cdot c_m (t_2 - t_1)$$

hvor  $Q$  = varmemengde (kcal/kg)

$G$  = væskestrøm (kg/h)

$c$  = spesifikk varme (kcal/kg °C)

$t_1$  = temperatur ved innløpet (°C)

$t_2$  = temperatur ved utløpet (°C)

Indeks  $v$  = varmtvann

$m$  = melk

Setter en inn målte verdier for gjennomstrømming av 6000 liter varmtvann og 2000 liter melk pr. time, får en:

$$(52) \quad Q_{\text{tap}} = 6000 \cdot 0,976(73,0 - 67,5) - 2000 \cdot 1(70,9 - 54,9) = 208 \text{ kcal/kg}$$

Måleresultatene viste variasjon i varmetapet fra 74 til 1090 kcal pr. time og ser en nærmere på ligning 52 stilles det store krav til hvor nøyaktig en kan måle temperaturdifferansen. I det ene tilfellet blir en eventuell målefeil multiplisert med 5856 og i det andre 2000. På grunn av den store spredningen er måleresultatene ikke tatt med.

Den andre måten å bestemme varmetapet på er å måle den utvendige luftberørte flaten til pasteuravdelingen og beregne midlere utvendig overflatetemperatur. Det ble på grunnlag av temperaturmålingene på platene og i forbindelsesrørene til pasteuravdelingen fastslått at det var ubetydelig varmeutveksling gjennom koplingsplaten i hver ende av pasteuravdelingen. Men varmetapet fra koplingsplatene til luft var tilnærmet like stor som fra pasteuravdelingen. Det var imidlertid ikke mulig å bestemme størrelsen av varmetapet fra pasteuravdelingen gjennom.

kopplingsplaten. Overflaten til kopplingsplatene ble likevel tatt med i den totale overflate til pasteuravdelingen. Varmeovergangstallet fra pasteuroverflaten til luft ble antatt å ligge i området 7-8 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Det ble derfor valgt å benytte 7,5 kcal/m<sup>2</sup>h °C som varmeovergangstall. Lufttemperaturen i rommet hvor pasteuren var plassert varierte mellom 19,0 og 25,0 °C. Ved beregningene ble den gjennomsnittlige lufttemperatur på 22,0 °C anvendt. Pasteuravdelingens samlede utvendige overflate, når en tar hensyn til at platekantene stikker gjennomsnittlig 4 mm ut fra en utvendig grunnflate, ble målt og beregnet til 0,37 m<sup>2</sup>. Legger en til den utvendige overflaten til de to kopplingsplatene, kommer en opp i en samlet utvendig overflate på 0,58 m<sup>2</sup>. Den utvendige overflatetemperatur ble bestemt på grunnlag av den gjennomsnittlige temperatur en hadde i løpene inne i pasteuravdelingen. Spredningen av overflatetemperaturen ved varierende gjennomstrømning var fra 66,9 til 67,7 °C. Ved hjelp av ligning 53 kan varmetapet fra pasteuravdelingen bestemmes.

$$(53) \quad Q = \alpha \cdot F (t_1 - t_2)$$

hvor  $Q$  = varmetap (kcal/h)

$\alpha$  = varmeovergangstallet fra pasteuroverflaten (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$F$  = overflate av platene i pasteuravdelingen samt to kopplingsplater (m<sup>2</sup>)

$t_1$  = gjennomsnittlig overflatetemperatur (°C)

$t_2$  = gjennomsnittlig lufttemperatur (°C)

Setter en inn de målte og beregnede gjennomsnittsverdiene i ligning 53, får en følgende tall for varmetapet!

Tabell 8.3. Det absolutte varmetap i kcal pr. time fra pasteuravdelingen ved varierende gjennomstrømning av melk og varmtvann.

Varmtvann liter pr. time	6000	6000	6000	6000	6000	4000	5000	7000
Melk liter pr. time	1000	1500	2000	2500	3000	2000	2000	2000
Beregnet tap fra overflaten	196	194	194	194	194	196	196	196

Resultatene i tabell 8.3. viser at gjennomstrømningen av vann og melk hadde ubetydelig innvirkning på varmetapet når en beregnet varmetapet fra overflaten på grunnlag av målt og beregnet gjennomsnittstemperaturdifferanse mellom overflatetemperaturen og romluften.

#### 8.4. Trykktap i platepasteuren.

Trykktapet i de enkelte avdelingene i pasteuren ble målt ved varierende gjennomstrømning med manometre av typen med bourdonrør. Ved måling av trykktapet i regenerativavdelingen på innløpssiden og pasteuravdelingen ble det anvendt manometre med skala 1 - 6 kp/cm<sup>2</sup>. Ved innløpet til holdersellen var det også et manometer med skala 1 - 6 kp/cm<sup>2</sup>, mens manometret ved utløpet hadde skala 1 - 4 kp/cm<sup>2</sup>. Regenerativavdelingen på utløpssiden ble målt med manometer med skala 1 - 4 kp/cm<sup>2</sup>. I denne avdelingen var manometer plassert bare ved innløpet i returløpet. Ved utløpet var det atmosfæretrykk dvs. 0 kp/cm<sup>2</sup> overtrykk.

Målingene ble utført ved konstant gjennomstrømning av varmtvann på 6000 liter pr. time. Gjennomstrømningen av melk ble øket trinnvis med 500 liter pr. time fra 1000 til 3000 liter pr. time. En fikk på den måten målt trykket ved 5 variasjoner av gjennomstrømningen. Hver måling ble gjentatt 4 ganger. Målingene ble utført ved at en økte gjennomstrømningen trinnvis fra 1000 til 3000 liter pr. time 2 ganger. Det samme ble utført i omvendt rekkefølge for å sikre at det ikke var hysteresefeil i manometrene. Spredningen i måloresultatene varierte fra 0,01 til 0,05 kp/cm<sup>2</sup>. Den største spredningen fant en ved gjennomstrømning av 1000 liter melk pr. time. Målingene viste derfor at en kunne se bort fra hysteresefeil i manometrene.

Resultatet av trykktapsmålingene i de enkelte avdelingene er gjengitt i tabell 8.4.

Tabell 8.4. Trykktap i de enkelte avdelingene i platepasteuren målt ved oppvarming med varmtvann.

Liter melk pr. time	Trykktap i $\text{kp/cm}^2$			
	Regenerativ- avd. inn	Pasteur- avdeling	Holder- celle	Regenerativ- avd. ut
1000	0,04	0,13	0,11	0,13
1500	0,13	0,32	0,16	0,25
2000	0,25	0,53	0,25	0,43
2500	0,34	0,81	0,36	0,65
3000	0,47	1,09	0,48	0,93

Måleresultatene i tabell 8.4. viste at trykktapet i pasteuravdelingen var høyest. Dette var også ventet fordi koplingen i denne avdelingen var 3+2+2 og i regenerativavdelingen var koplingen 3+3+3 så denne avdelingen var mer åpen. Trykktapet i regenerativavdelingen på innløpssiden var vesentlig lavere enn på utløpssiden. Dette viser også tidligere undersøkelser (32). Årsaken til forskjellen i trykktapet er at på innløpssiden har en høyere trykk enn på utløpssiden. Dette fører til at avstanden mellom platene på innløpssiden blir litt større enn på utløpssiden, p.g.a. at platene blir bøyd noe til side. Når samme volum skal gjennom regenerativavdelingen på begge sider og avstanden mellom platene på utløpssiden er redusert, blir derfor trykktapet på retursiden større enn på innløpssiden.

I figur 8.5. er kurvene for trykktapet ved økende gjennomstrømning vist. Resultatene viser at trykktapet i regenerativavdelingen på innløpssiden og holdercellen var tilnærmet like stort. Det største trykktapet ble målt i pasteuravdelingen. I regenerativavdelingen på utløpssiden lå trykktapskurven litt lavere enn i pasteuravdelingen, men betydelig høyere enn i regenerativavdelingen på innløpssiden.

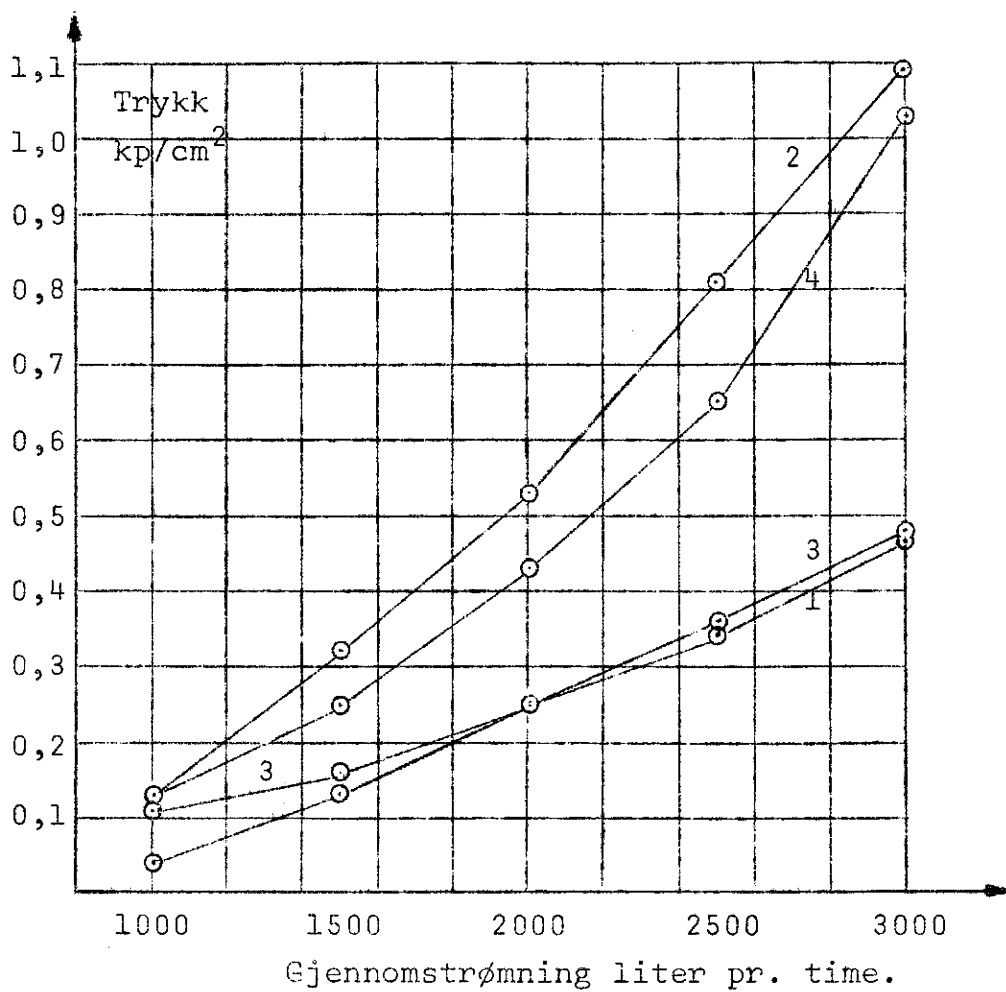


Fig. 8.5. Trykktap i pasteurens enkelte avdelinger ved økende gjennomstrømning.

1. Regenerativavdelingen på innløpssiden.
2. Pasteuravdelingen.
3. Holdercellen.
4. Regenerativavdelingen på utløpssiden.

### 8.5. Temperaturfordelingen over platene i pasteuravdelingen.

Måling av overflatetemperaturen på en plate inne i en platevarmeveksler med avstand mellom platene som varierer fra 2 til 4,8 mm, er beheftet med flere usikre faktorer. En stor ulempe ved slike målinger er at en ikke kan observere væskestrømmen ved målestedet. Ved varierende gjennomstrømning kan det forekomme lokale turbulenser som forårsaker luftlommer på platene og kan forstyrre måleresultatet. Termoelementtråden må heller ikke bli ført inn på platen på en slik måte at den forstyrrer væskestrømmen. De utførte målingene ble imidlertid ikke brukt til beregning av lokale varmegjennomgangstall så en eventuell lokal feil i observasjonen førte ikke til større feil i videre beregninger.

Temperaturmålingene ble utført med termoelementer av kobberkonstantan og med 0,5 mm tykke tråder som var isolert med et tynt lag plast. Termospenningen ble målt på et Honeywell potensiometer med 24 tilkoplingspunkter som er beskrevet i avsnitt 6.3.

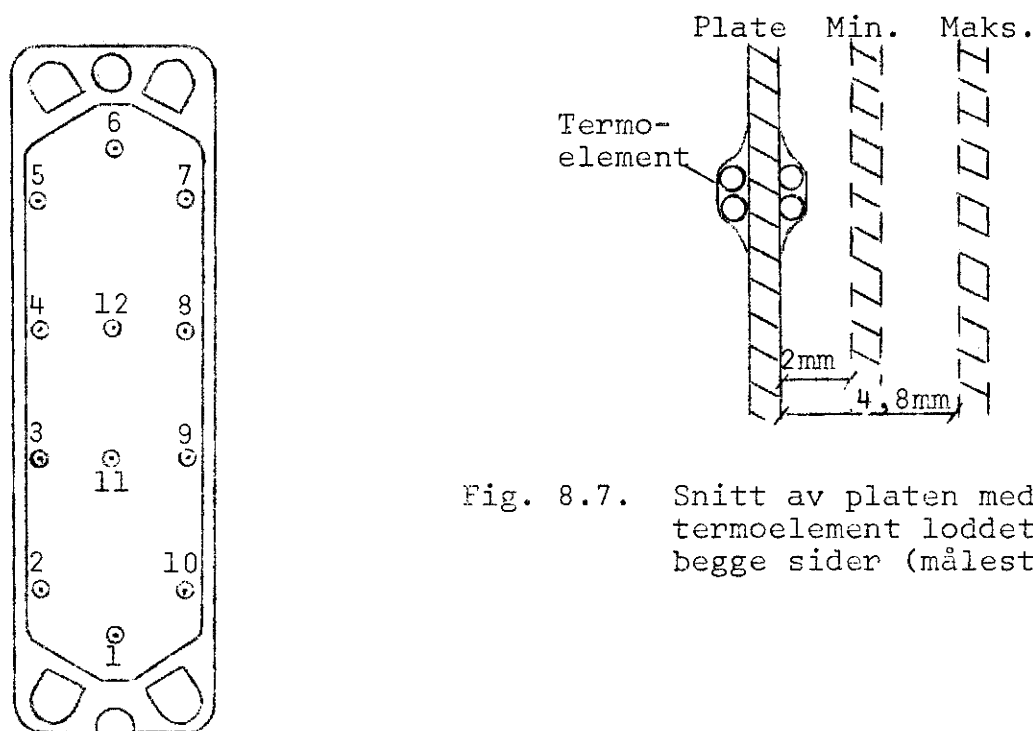


Fig. 8.6. Termoelementenes plassering på platen.

Fig. 8.7. Snitt av platen med termoelement loddet på begge sider (målestokk 1:5)

Termoelementene ble loddet på overflaten på de stedene som er avmerket med en ring i figur 8.6. Rekken langs midten ble bare målt på siden som vendte mot luft i koplingsplatene. Termoele-

mentene 2-5 og 7-10 langs platekantene ble loddet på 2-3 cm inn på platen. Termoelementene 1 og 6 i hver ende av platen ble loddet på ca. 5 cm inn fra hver ende innenfor pakningen.

Som en ser av figur 8.7. er tykkelsen av termoelementet og platen tilnærmet like stor. Med den store strømningshastigheten på hver side av platen, må en forvente å måle temperaturer som avviker fra den virkelige overflatetemperaturen på platen. Eliminierer en  $Q$  og  $F$  fra ligningene 34 og 43 og løser ligningene med hensyn på  $(Q_1 - Q_2)$ , får en:

$$(54) \quad Q_1 - Q_2 = \frac{k \cdot \delta \cdot \Delta t_m}{\lambda}$$

hvor  $Q_1 - Q_2$  = differansen mellom overflatetemperaturen på platen ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k$  = varmegjennomgangstallet ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h } ^{\circ}\text{C}$ )

$\delta$  = platetykkelsen (m)

$\Delta t_m$  = den midlere temperaturdifferansen ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\lambda$  = varmeledningstallet ( $\text{kcal}/\text{mh } ^{\circ}\text{C}$ )

Setter en inn  $k$ -verdi og  $\Delta t_m$  for driftstilstanden 2000 liter melk og 6000 liter varmtvann pr. time,  $\delta = 0,8 \cdot 10^{-3}$  m og  $\lambda = 13 \text{ kcal}/\text{mh } ^{\circ}\text{C}$ , blir den midlere differansen mellom platenes overflatetemperatur:

$$Q_1 - Q_2 = 1,09^{\circ} \text{C}$$

Gjennomsnittet av 20 målte temperaturdifferanser, 10 på plate 2 og 10 på plate 14 var  $2,23^{\circ} \text{C}$ .

Den midlere logaritmiske temperaturdifferansen mellom varmtvann og melk i pasteuravdelingen ble beregnet til  $6,24^{\circ} \text{C}$ .

En ser av dette at den temperaturen en måler ved å lodde termoelementer på platen, ligger et sted mellom den virkelige overflatetemperaturen på platen og temperaturen i væskestrømmen langs platen. Undersøkelsen var ikke omfattende nok til å fastslå forholdet mellom overflatetemperaturen, temperaturen målt i termoelementene og temperaturen i væskestrømmen.

De undersøkte platenes plassering i pasteuravdelingen er vist i figur 8.8. Strømningsretningen for melk er merket med heltrukne piler og strømningsretningen for varmtvann eller vakuumdamp med stiplede piler.

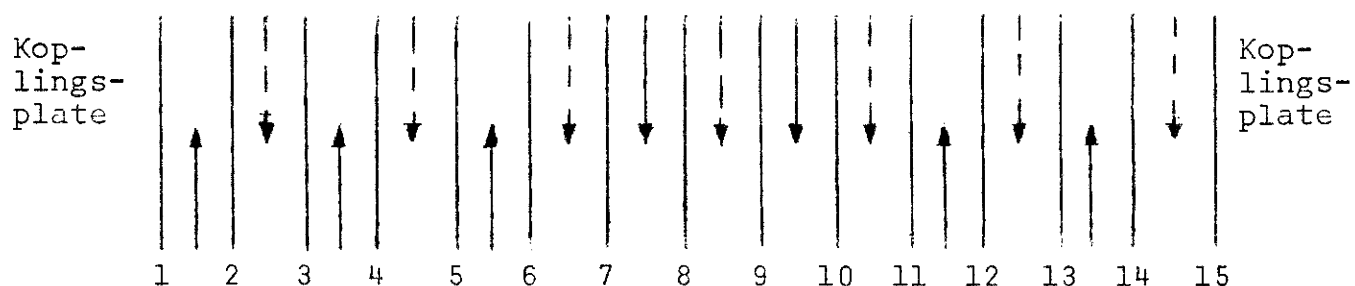


Fig. 8.8. Platene i pasteuravdelingen med inntegnet strømningsretning for melk og varmtvann eller vakuumdamp.

I figur 8.8. ser en at melken passerer 3+2 løp i motstrøm med det oppvarmede medium og 2 løp i medstrøm. De undersøkte platene var 1, 2, 14 og 15. Det ble loddet på 10 termoelementer på hver side av platen inne i pasteuravdelingen. På endesidene mot luft i koplingsplaten ble det loddet på 12 termoelementer på hver side.

Den første måleserien ble utført med termoelementer på begge sider av plate 1 og 15. På plate 2 ble det målt på siden mot varmtvann og vakuumdamp. På plate 14 ble målingene utført på siden mot melk.

Kontrollmålingen av måleinstrumentet ble utført i området 10 til 20° C ved å sirkulere vann gjennom platepasteuren og kontrollmåle vannets temperatur med kvikksølvtermometer.

Det ble utført målinger på i alt 64 punkter. Skriveren hadde bare 24 tilkoplingspunkter og det var derfor nødvendig å måle ved samme driftstilstand 3 ganger. Gjennomstrømning av melk ble variert fra 1000 til 3000 liter pr. time med trinn på 500 liter, og varmtvannsstrømmen ble holdt på 6000 liter pr. time. Målingen ble utført både ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp. Dessuten ble det målt ved gjennomstrømning av 2000 liter melk pr. time og 4, 5 og 7000 liter varmtvann pr. time. For å få målt samtlige punkter var det derfor nødvendig å kjøre de 5 driftstilstandene som var felles for varmtvann og vakuumdamp 30 ganger og de 3 driftstilstandene som var spesielle for oppvarming med varmtvann 9 ganger. Hver måleperiode varte 20 minutter og med den papirhastigheten som ble anvendt ble hvert målepunkt målt 8 ganger. Resultatene er derfor gjennomsnitt av 8 målinger.



Måleresultatene av den første måleserien hadde noen få temperaturer som var tvilsomme. Det ble derfor foretatt nærmere undersøkelser av termoelementtråden i gjennomføringen ved pakningen i platene. Det viste seg at ved enkelte tråder var isolasjonen blitt presset istykker og da det var gummipakning på den ene siden og rustfritt stål på den andre, var det stor sannsynlighet for at det kunne oppstå kortslutning med dannelse lokalt termoelement ved pakningen. Det ble utført prøvemålinger med termoelementtråd som var 0,25 mm tykk og isolert med glassfiberarmert silikonimpregnert asbest. Dette isolasjonsmaterialet tålte varmen bedre enn plast, men på grunn av den mekaniske slitasjen ved pakningene ble isolasjonen skadet.

Måleserien ble derfor gjentatt med forbedret gjennomføring for termoelementtråden ved platepakningen. Det ble loddet på biter av 1 mm tykk rustfri ståltråd på begge sider av hver gjennomføring. Dette hindret at platekantene ved pakningen ble presset helt sammen og skadet termoelementtråden. Pakningen viste seg å være myk nok til ikke å skade termoelementtråden.

Ved den første måleserien gikk en ut fra at temperaturforskjellen mellom plateveggene i løpet mellom 1. og 2. plate og mellom 14. og 15. plate var minimal p.g.a. den korte avstand mellom platene, men etter at den første serien var gjennomført, var en ikke lenger så sikker på at denne antakelse var riktig. Derfor ble det ved den forbedrede målingsserien loddet på termoelementer på begge sider av plate 2 og 14. En kunne da måle to ting. Det ene var temperaturfordelingen over en plate ved innløpet til pasteuravdelingen og en plate ved utløpet. Det andre var temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom platene 2 og 14.

Innstillingen av temperaturregulatoren ble ikke forandret under prøvene. Med den store spredningen i gjennomstrømmet mengde melk varierte pasteuriseringstemperaturen noe, men en kunne ikke finne at variasjonen var avhengig av variasjon av gjennomstrømmingen. I tabell 8.5. er pasteuriseringstemperaturen gjengitt ved varierende gjennomstrømming av melk.

Tabell 8.5. Variasjon av pasteuriseringstemperaturen ved varierende gjennomstrømning av melk.

Melk, liter pr. time	Pasteuriseringstemperatur		Temperaturdiffe- ransen mellom opp- varming med varmt- vann og vakuumdamp
	Varmtvann 6000 liter pr. time	Vakuum- damp	
1000	71,0	71,5	0,5
1500	70,9	71,3	0,4
2000	70,9	71,2	0,3
2500	71,0	71,3	0,3
3000	70,9	71,1	0,2
Spredning	70,9 - 71,0	71,1 - 71,5	0,2 - 0,5

Hver pasteuriseringstemperatur er gjennomsnitt av 5 målinger. Det er bare tatt med de to måleperiodene som de refererte temperaturmålingene på platen hører sammen med. Tabell 8.5. viser at spredningen i pasteuriseringstemperaturen var bare  $0,1^{\circ}$  C ved oppvarming med varmtvann. Ved oppvarming med vakuumdamp var spredningen  $0,4^{\circ}$  C. Tabell 8.5. viser at en med god tilnærming kan si at pasteuriseringstemperaturen var konstant ved alle prøvene.

Forskjellen mellom pasteuriseringstemperaturen målt ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp var  $0,3^{\circ}$  C høyere ved 1000 enn ved 3000 liter pr. time. Spredningen var  $0,2 - 0,5^{\circ}$  C så forskjellen var ubetydelig. Pasteuriseringstemperaturen ved oppvarming med vakuumdamp lå ved alle prøvene høyere enn ved oppvarming med varmtvann.

Ut fra de utførte temperaturmålingene kan en se hvorledes platene 2 og 14 i pasteuravdelingen blir utnyttet ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp. I figur 8.9. er det vist en sammenligning mellom de to oppvarmingssystemene ved nominell driftstilstand. Den øverste delen viser temperaturfordelingen over plate 2 på melkesiden og den nederste delen baksiden av plate 2 som vender mot varmtvann eller vakuumdamp.

Temperaturfordelingen over siden mot melk ved oppvarming med varmtvann, viser et tilnærmet lineært forløp med ca.  $2^{\circ}\text{C}$  lavere temperaturstigning langs platekant 1. Dette har sin sannsynlige årsak i at varmeovergangstallet langs platekant 2 er vesentlig høyere p.g.a. høyere strømningshastighet. Melkens inn- gangstemperatur var i gjennomsnitt  $55,0^{\circ}\text{C}$ . Temperaturen var derfor steget  $3,2^{\circ}\text{C}$  når den passerte det nederste målepunktet. Temperaturforløpet på melkesiden ved oppvarming med vakuumdamp viste ingen temperaturstigning ved de 2 nederste målepunktene. De øverste målepunktene viste derimot relativt høy temperaturstigning. På oppvarmingssiden viste temperaturforløpet den samme fordelingen, men temperaturforandringen langs platen var større. Temperaturen av melken ved innløpet til pasteuravdelingen var i gjennomsnitt  $55,3^{\circ}\text{C}$ . I tabell 8.6. er temperaturforandringen langs plate 2 ved platekant 1 og 2 gjengitt for oppvarming med varmtvann og vakuumdamp.

Tabell 8.6. Temperaturforandringen langs plate 2 ved platekantene 1 og 2.

Oppvarmet med	På melkesiden		På oppvarmingssiden	
	Langs platekant 1	Langs platekant 2	Langs platekant 1	Langs platekant 2
Varmtvann	5,7	7,2	8,5	8,2
Vakuumdamp	7,0	9,9	13,1	15,7

I tabell 8.6. ser en at temperaturforandringen langs plate 2 både på melkesiden og oppvarmingssiden var lavere ved platekant 1 enn ved platekant 2 unntatt ved oppvarmingssiden for varmtvann der en fant  $0,3^{\circ}\text{C}$  lavere temperaturforandring langs platekant 2. På melkesiden ser en også at temperaturforandringen langs platekant 1 var  $1,3^{\circ}\text{C}$  lavere ved oppvarming med varmtvann enn ved oppvarming med vakuumdamp. Langs platekant 2 var den samme forskjellen  $2,7^{\circ}\text{C}$ . Ved oppvarming med varmtvann utnyttet hele platen jevnt, men som fig. 8.9. viser var det ikke temperaturdifferans gjennom platen på den nerste halvdelen ved oppvarming med vakuumdamp. Når det likevel blir transportert mer varme gjennom plate 2 ved oppvarming med vakuumdamp enn ved oppvarming med

varmtvann, må skyldes at varmeovergangstallet ved kondenserende vakuumdamp er vesentlig større enn varmeovergangstallet ved strømmende varmtvann. Dette forholdet med platebelastningen ser en bare ved inngangen til pasteuravdelingen.

Temperaturfordelingen over plate 14 er vist i figur 8.10. Pasteuriseringstemperaturen var i gjennomsnitt  $0,3^{\circ}$  C lavere ved oppvarming med varmtvann enn ved oppvarming med vakuumdamp ved nominell kapasitet. Temperaturforskjellen mellom de to oppvarmingsmediene var ved det øverste målepunktet  $0,8^{\circ}$  C. Ellers var det tilnærmet likt forløp på temperaturkurvene både på melkesiden og oppvarmingssiden. Dette betyr bare at det alt vesentlige av varmetransporten er utført før melken passerer plate 14.

I figurene 8.11. til 8.19. er temperaturforløpet over plate 2 og 14 vist ved varierende gjennomstrømning både på melkesiden og oppvarmingssiden. For å få resultatene oversiktlige var det nødvendig å dele opp kurvene i grupper som hørte naturlig sammen.

Fordelingen av kurvene i figur 8.11. og 8.12. viser at med konstant gjennomstrømning av varmtvann og variabel gjennomstrømning av melk var spredningen av temperaturforløpet større enn når en varierte motsatt. Forholdet mellom gjennomstrømning av melk og varmtvann var aldri mindre enn 1 : 2 og dette er hovedårsaken til at en variasjon på melkesiden gir større utslag enn en variasjon på oppvarmingssiden.

I figur 8.11. øverst, ser en temperaturforløpet på melkesiden langs platekant 1 på plate 2 med variasjon i gjennomstrømningen av melk fra 1000 til 3000 liter pr. time og 6000 liter varmtvann pr. time. Temperaturfordelingen er tilnærmet lineær. Ved alle variasjonene var det svakere temperaturstigning nederst på platen enn øverst. Årsaken til dette er at langs platekant 1 er det lavere strømningshastighet og dermed får en lavere varmeovergangstall. Kurven for temperaturforløpet på melkesiden og oppvarmingssiden hadde som ventet samme form.

Temperaturforløpet langs platekant 2 var det samme som variasjonene i gjennoms rømningen er vist i figur 8.13 og 8.14. Formen på disse temperaturkurvene var mer tilnærmet lineær.

På melkesiden var det litt større temperaturforandring nederst på platen enn øverst og det samme ble observert på platesiden mot varmtvann og vakuumdamp.

Temperaturforløpet på plate 2 ved oppvarming med vakuumdamp er gjengitt i figurene 8.15 og 8.16. Langs platekant 1 på melkesiden var det ingen temperaturstigning på nederste halvdel av platen. På oppvarmingssiden langs platekant 1 ble det nederst på platen målt en temperaturstigning som økte med gjennomstrømmingen av melk. Øverst på platen var det relativt stor temperaturstigning. Langs platekant 1, nederst på platen på melkesiden, var det  $2,3^{\circ}$  C mindre spredning ved oppvarming med vakuumdamp enn ved oppvarming med varmtvann. Langs platekant 2 var temperaturforløpet noe mer lineært øverst på platen på melkesiden enn langs platekant 1. På oppvarmingssiden viste kurvene for gjennomstrømning av 1000 og 1500 liter melk noe avvikende temperaturforløp i forhold til de øvrige målingene. Dette skyldes de spesielle strømningsforholdene en får ved for lav gjennomstrømning og dermed utilfredsstillende fordeling over platen.

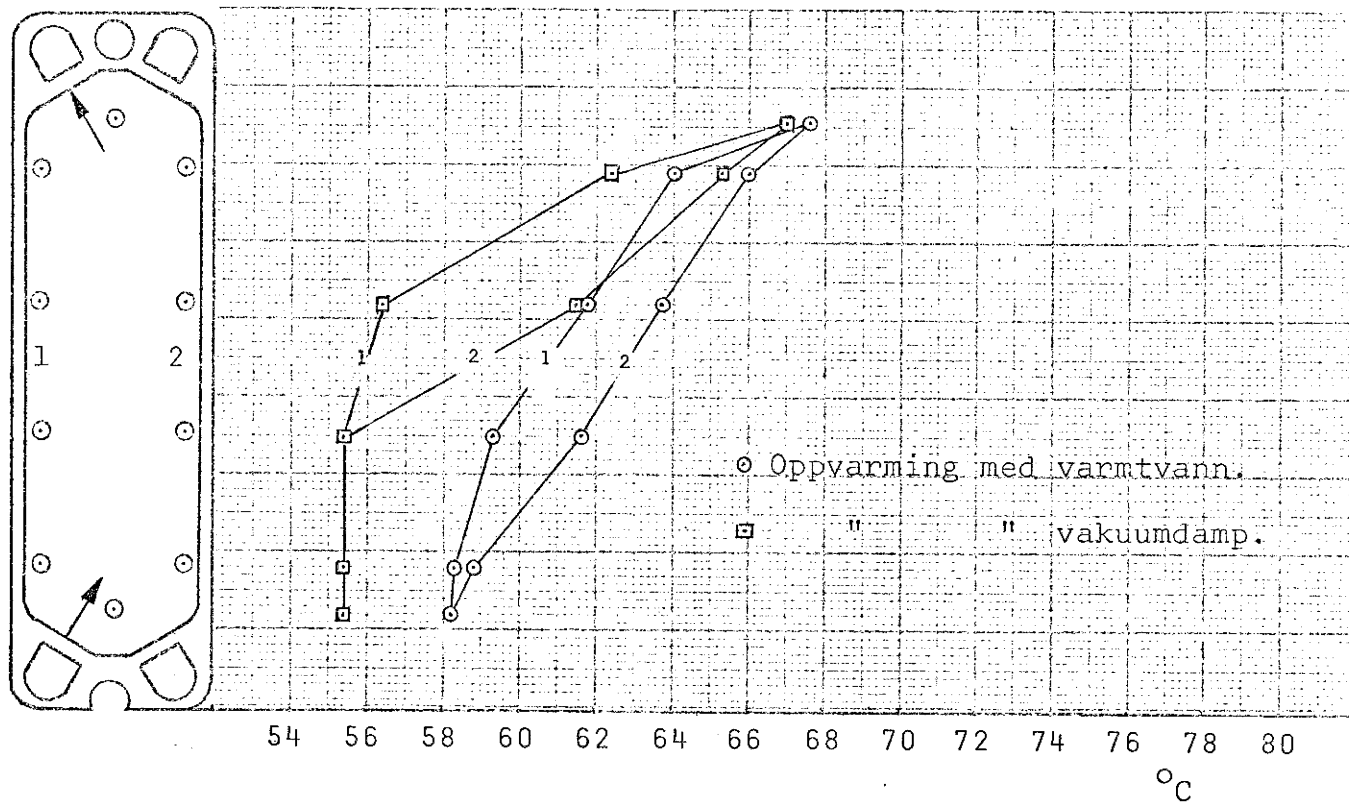
I figurene 8.17. og 8.18. er temperaturfordelingen over plate 14 vist ved variasjon i gjennomstrømmet mengde melk fra 1000 til 3000 liter pr. time og variasjon i gjennomstrømmet mengde varmtvann fra 4000 til 7000 liter pr. time. Øverste delen av figur 8.17. viser temperaturforløpet på melkesiden langs platekant 1 og 2. Kurvene viser at den største delen av varmeoverføringen er skjedd før melken passerer plate 14. Ved innløpet til plate 14 var spredning som følge av variasjon i gjennomstrømningen fra  $3,1$  til  $3,5^{\circ}$  C. Ved utløpet samlet kurvene seg og spredningen var fra  $0,5$  til  $1,0$ . Nederst på figur 8.17. finner en temperaturfordelingen over oppvarmingssiden. Spredningen nede på platen var fra  $0,5$  til  $1,0^{\circ}$  C. Oppe på platen var spredningen som ventet vesentlig større og målingene viste fra  $3,1$  til  $3,5^{\circ}$  C. Målingene viste således ubetydelig forskjell mellom platekant 1 og 2 langs platen.

I figur 8.18. er temperaturfordelingen vist ved konstant gjennomstrømning av melk på 2000 liter pr. time og variasjon i gjennomstrømning av varmtvann fra 4000 til 7000 liter pr. time.

Spredningen varierte fra 0,4 til 1,4<sup>o</sup> C og kurvene hadde tilnærmet samme form både på melkesiden og oppvarmingssiden. En kunne således se det samme forholdet på plate 14 som på plate 2 at variasjon i gjennomstrømningen på melkesiden hadde større effekt enn variasjon på oppvarmingssiden.

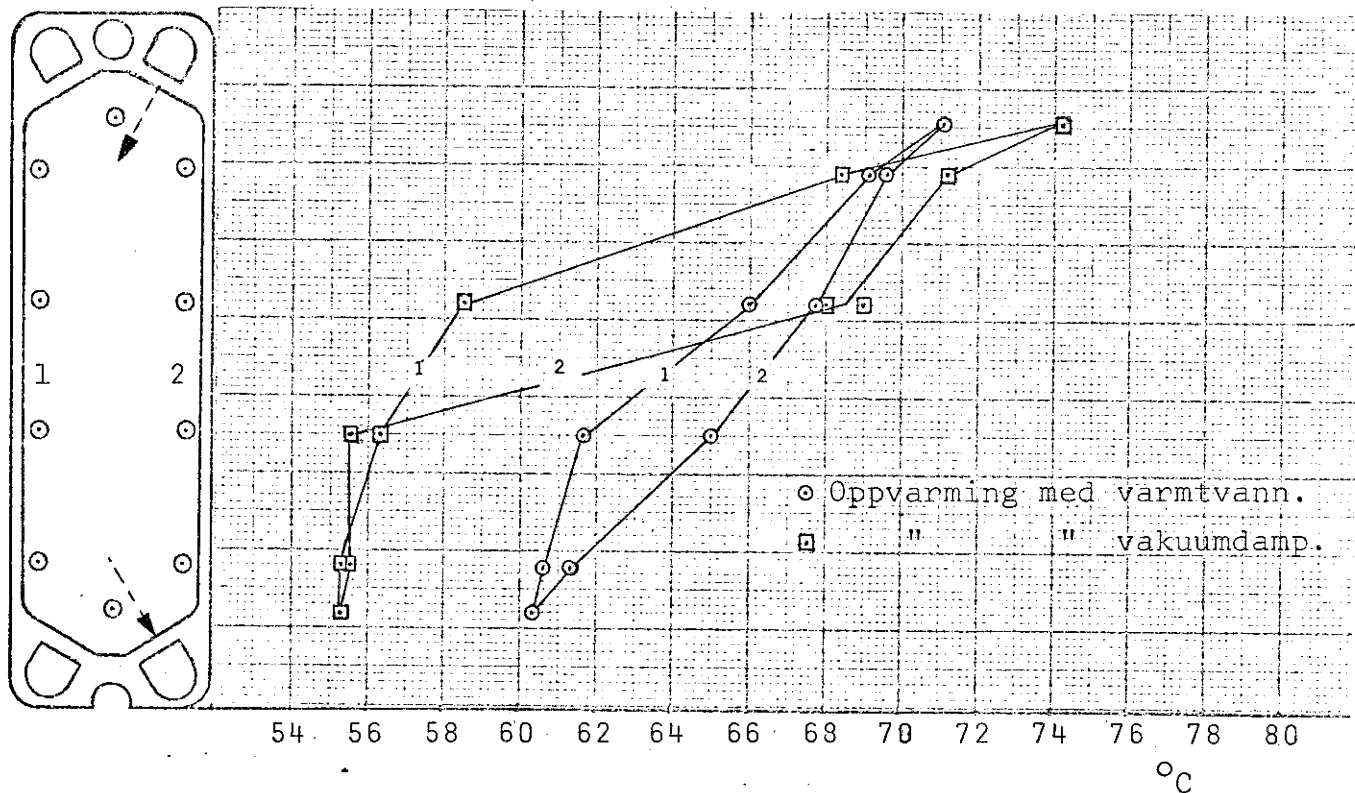
Temperaturforløpet over plate 14 oppvarmet med vakuumdamp er gjengitt i figur 8.19. Temperaturforløpet over melkesiden er vist øverst i figuren og kurvene langs platekant 1 og 2 viser en spredning på 0,1<sup>o</sup> C som var vesentlig mindre enn ved oppvarming med varmtvann. Nederst på platen var spredningen fra 2,3 til 2,6 som var vesentlig større enn ved oppvarming med varmtvann. Det var tilnærmet samme temperaturstigning på oppvarmingssiden, men spredningen var størst oppe og minst nede. Temperaturkurvene viser således at det var en betydelig varme-transport gjennom plate 14 selv om dette var den siste platen før utløpet fra pasteuravdelingen.

Fig. 8.9. Sammenligning av temperaturfordelingen over plate 2 ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp.



Målt på siden mot helmelk, langs platekant 1 og 2.

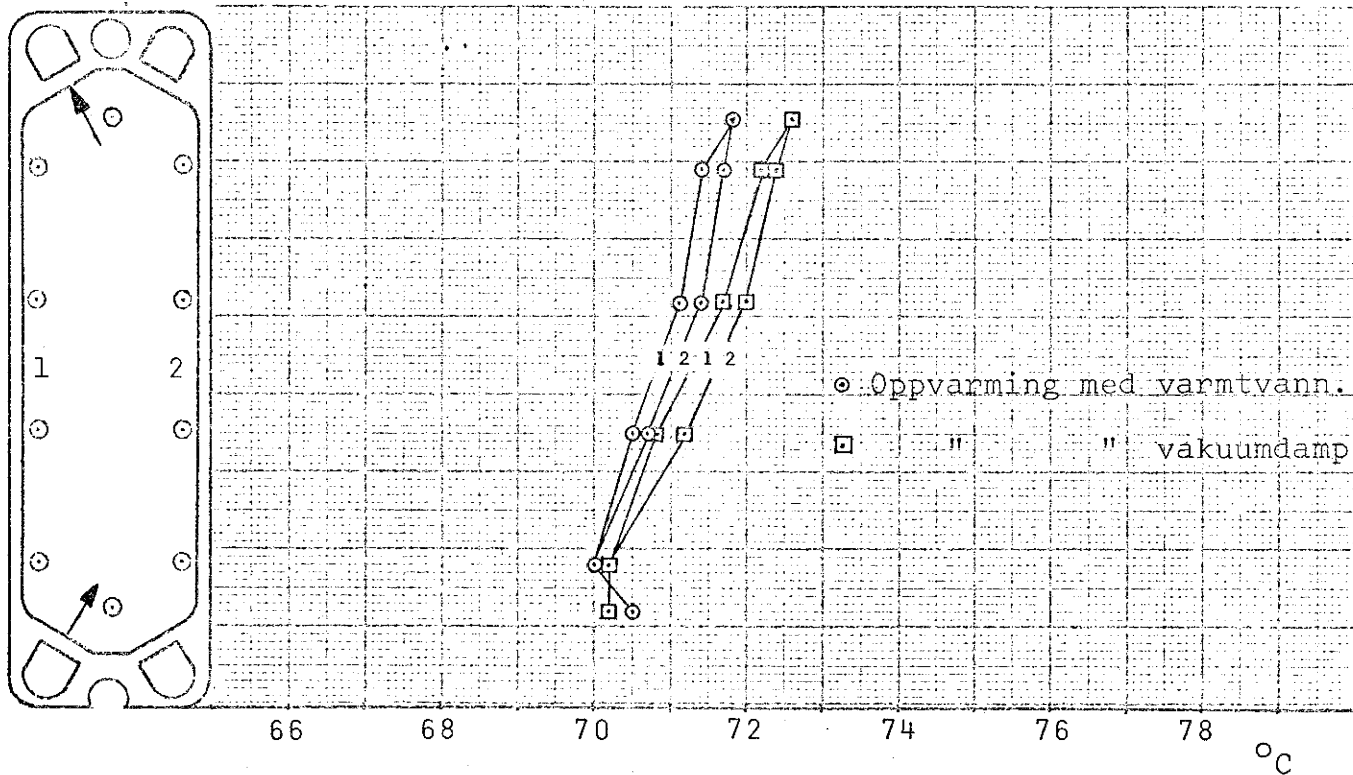
Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.



Målt på baksiden mot varmtvann og vakuumdamp langs platekant 1 og 2.

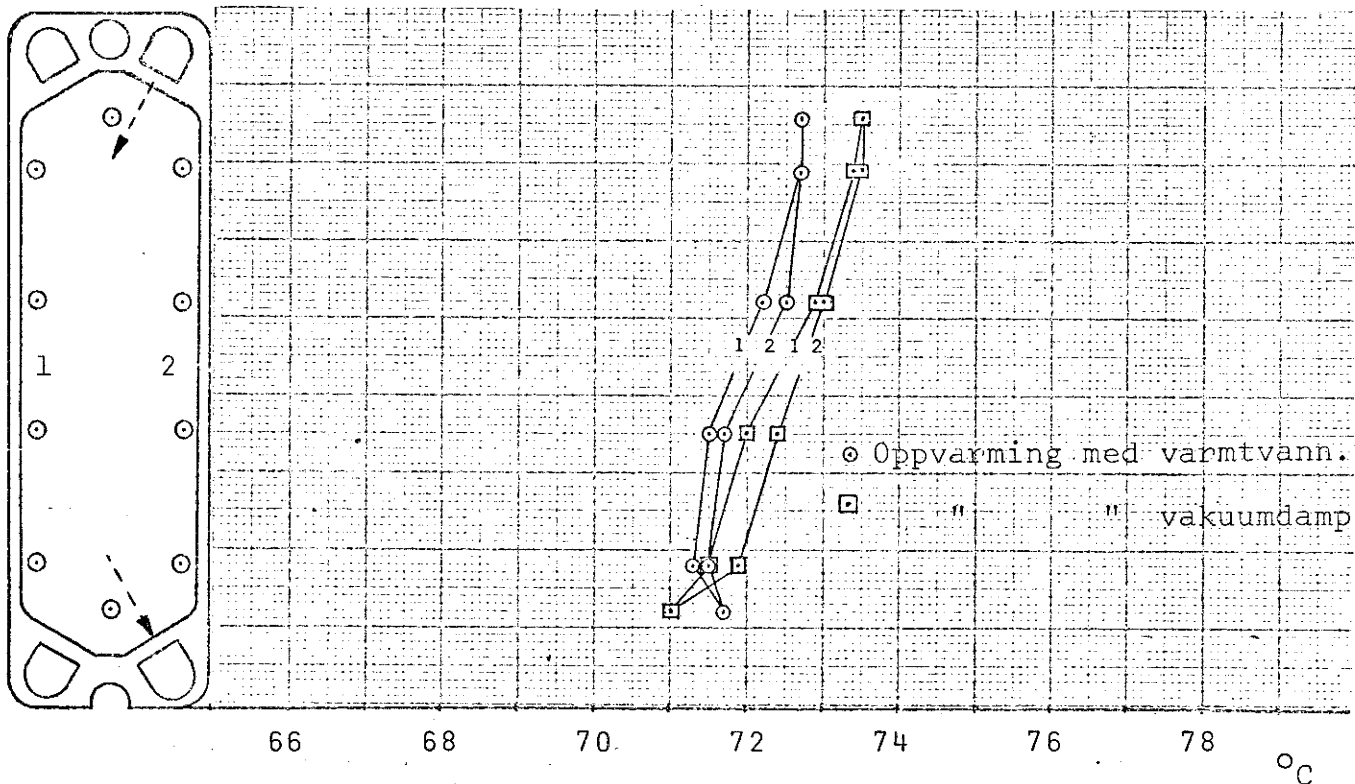
Gjennomstrømning 6000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.10. Sammenligning av temperaturfordelingen over plate 14 ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp.



Målt på siden mot melk langs platekant 1 og 2.

Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.

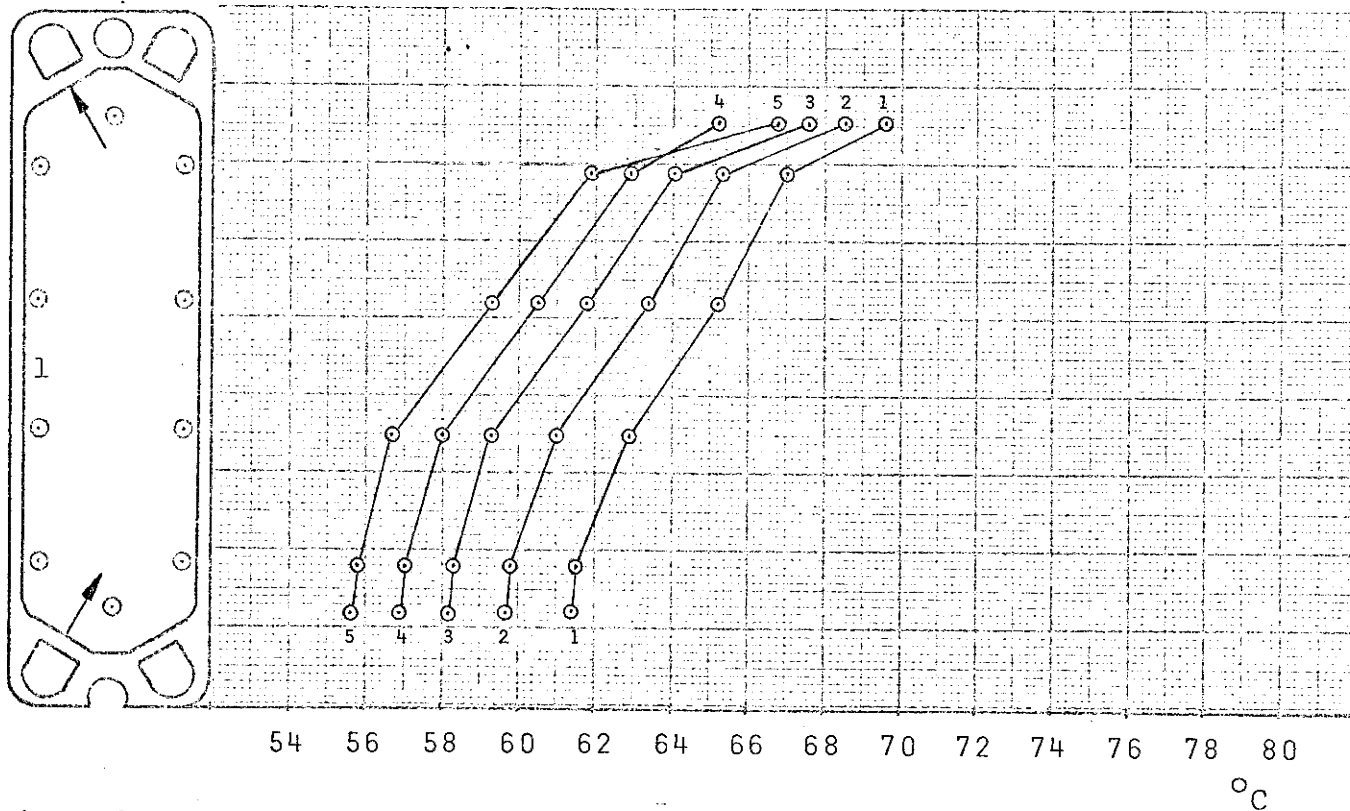


Målt på baksiden av platen mot varmtvann og vakuumdamp langs platekant 1 og 2.

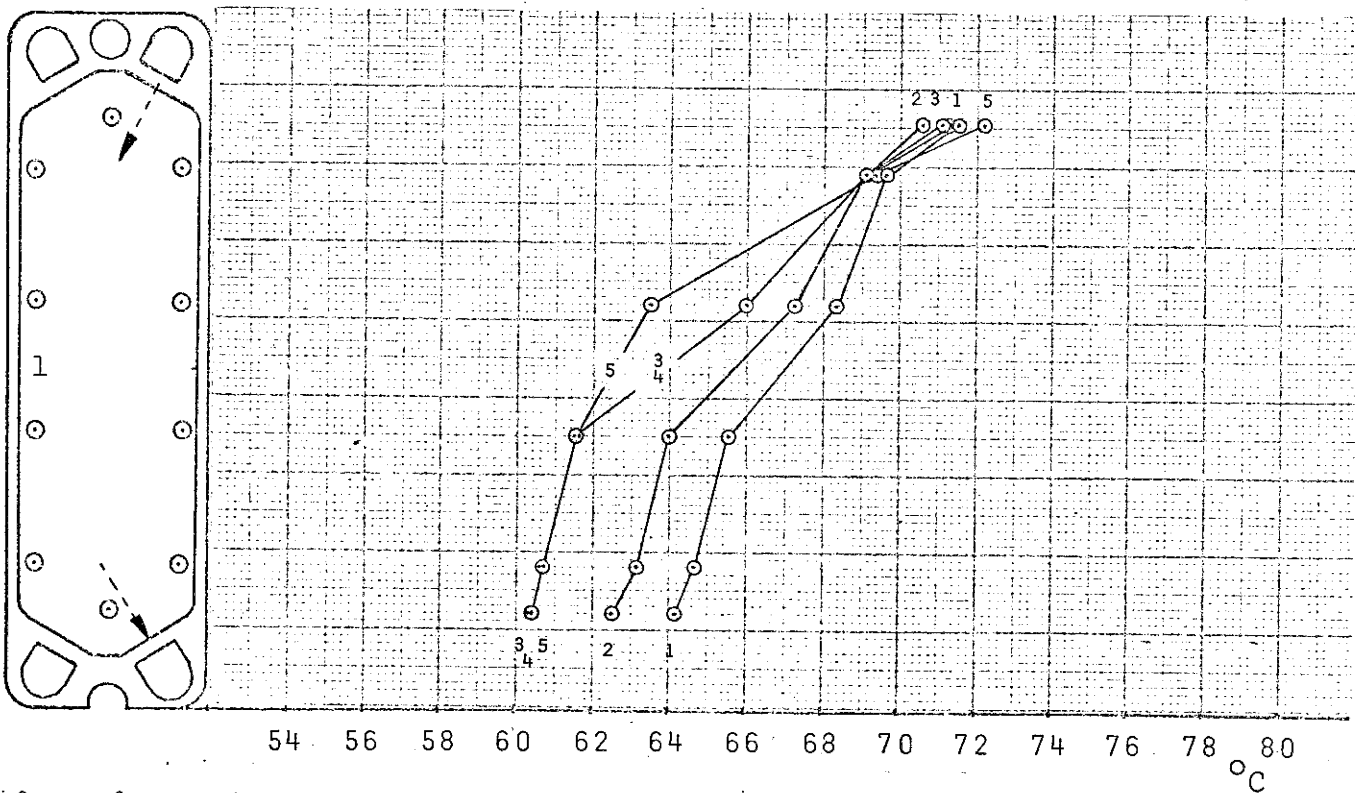
Gjennomstrømning 6000 liter varmtvann pr. time.



Fig. 8.11. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 1 ved varierende gjennomstrømning av melk og oppvarming med varmtvann.

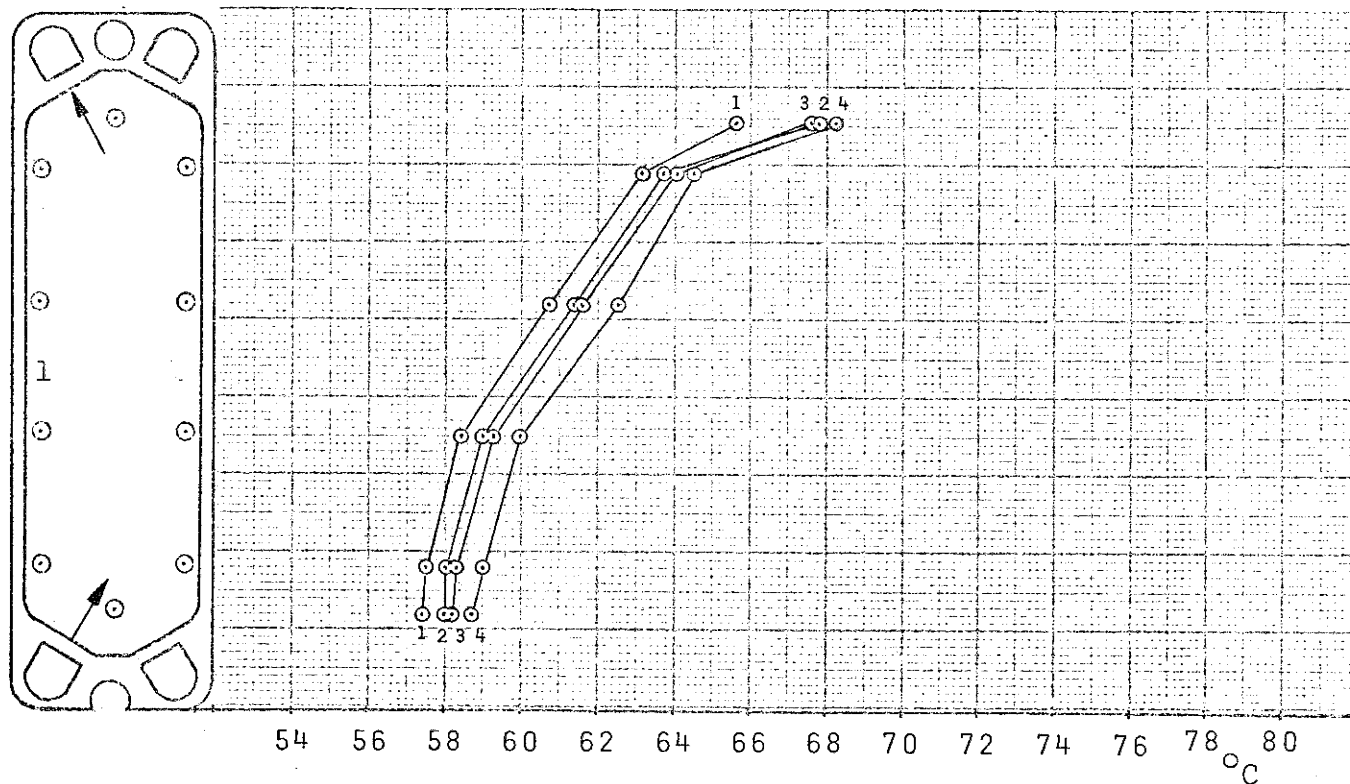


Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.



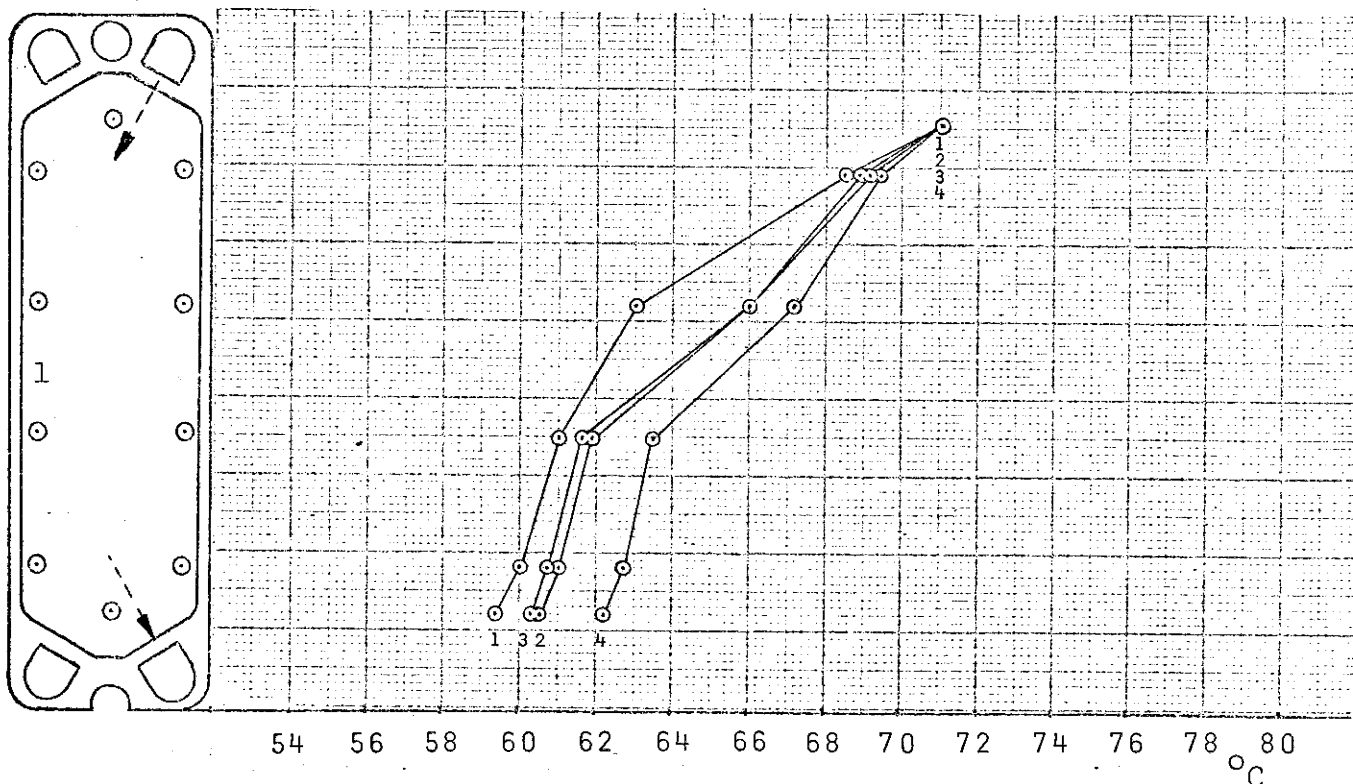
Målt på baksiden av platen mot varmtvann.  
Gjennomstrømning av 6000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.12. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 1 ved varierende gjennomstrømning av varmtvann.



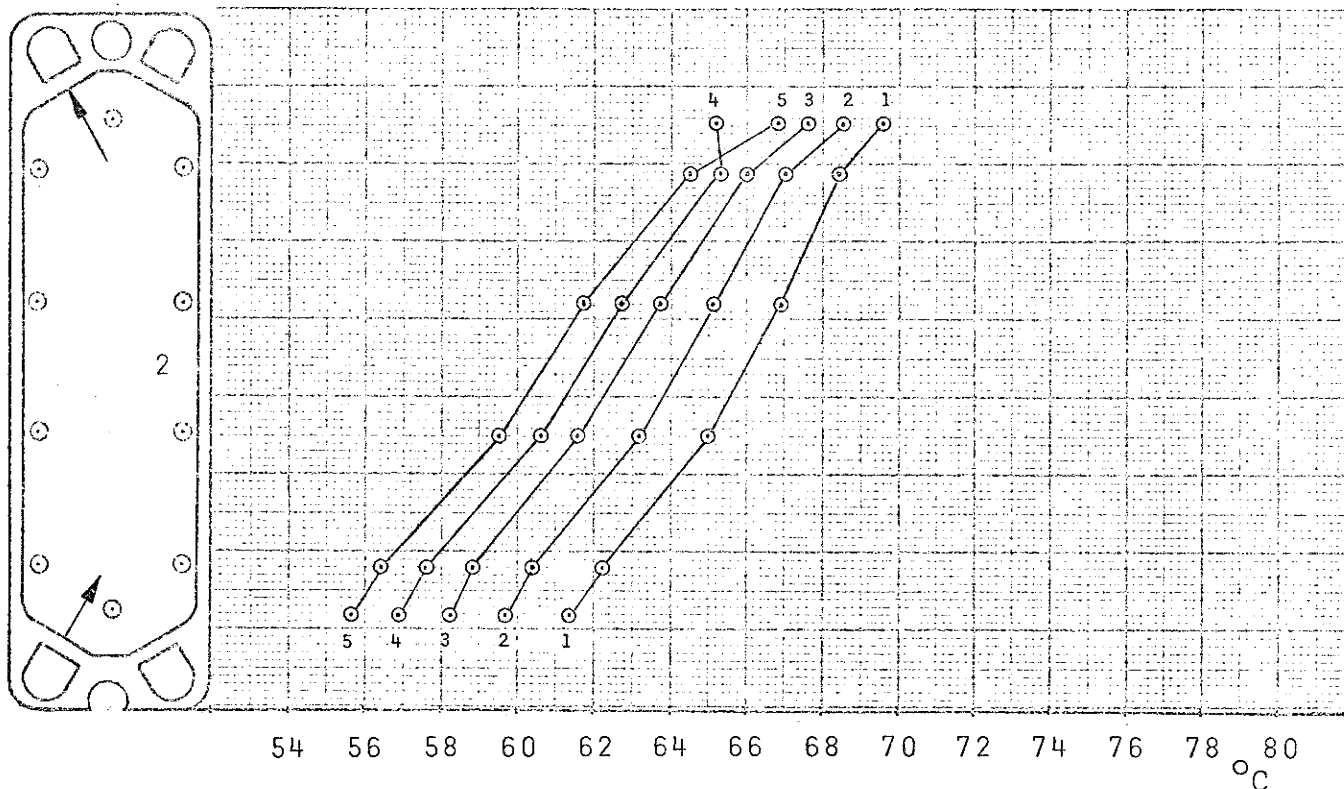
Målt på siden mot melk.

Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.

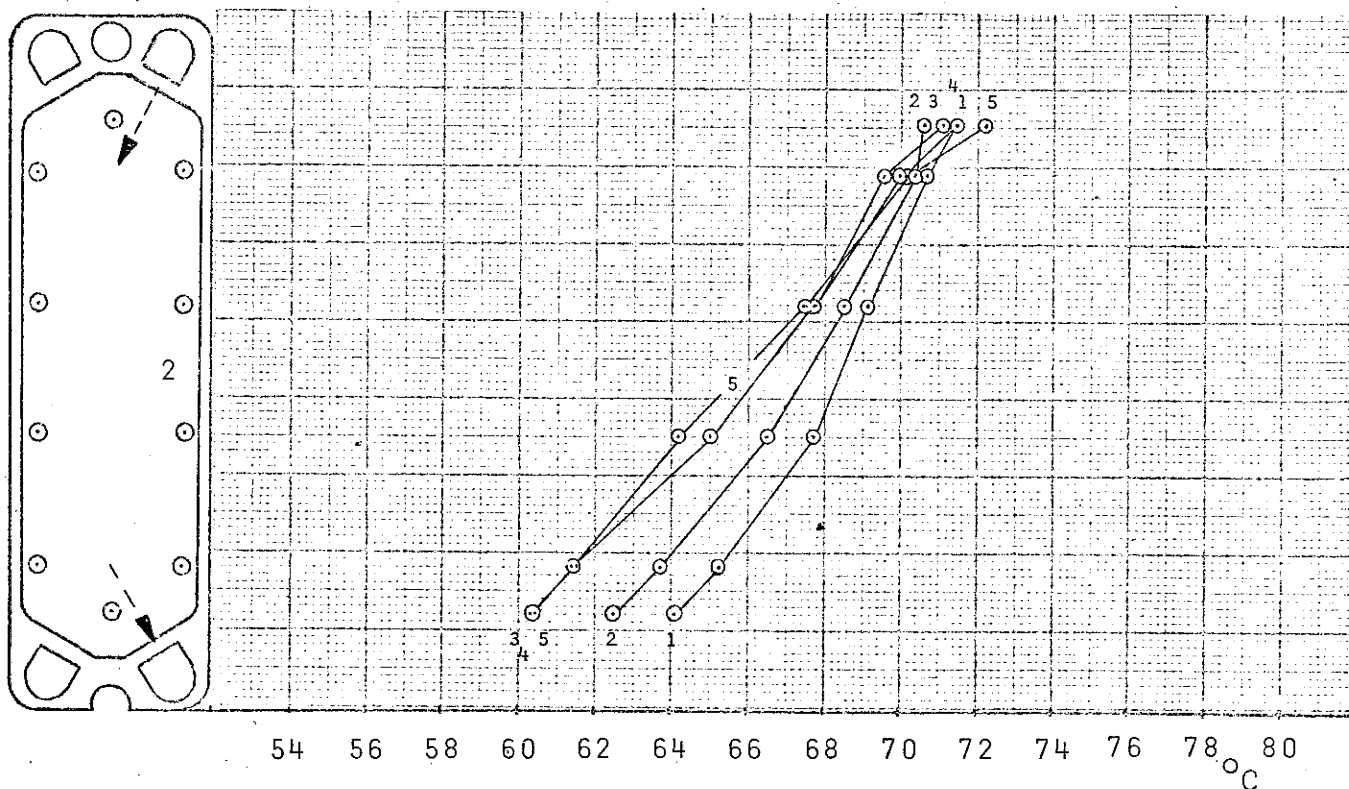


Målt på baksiden av platen mot varmtvann. Kurve 1 gjelder for 4000, kurve 2 for 5000, kurve 3 for 6000 og kurve 4 for 7000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.13. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 2 ved varierende gjennomstrømning av helmelk og oppvarming med varmtvann.

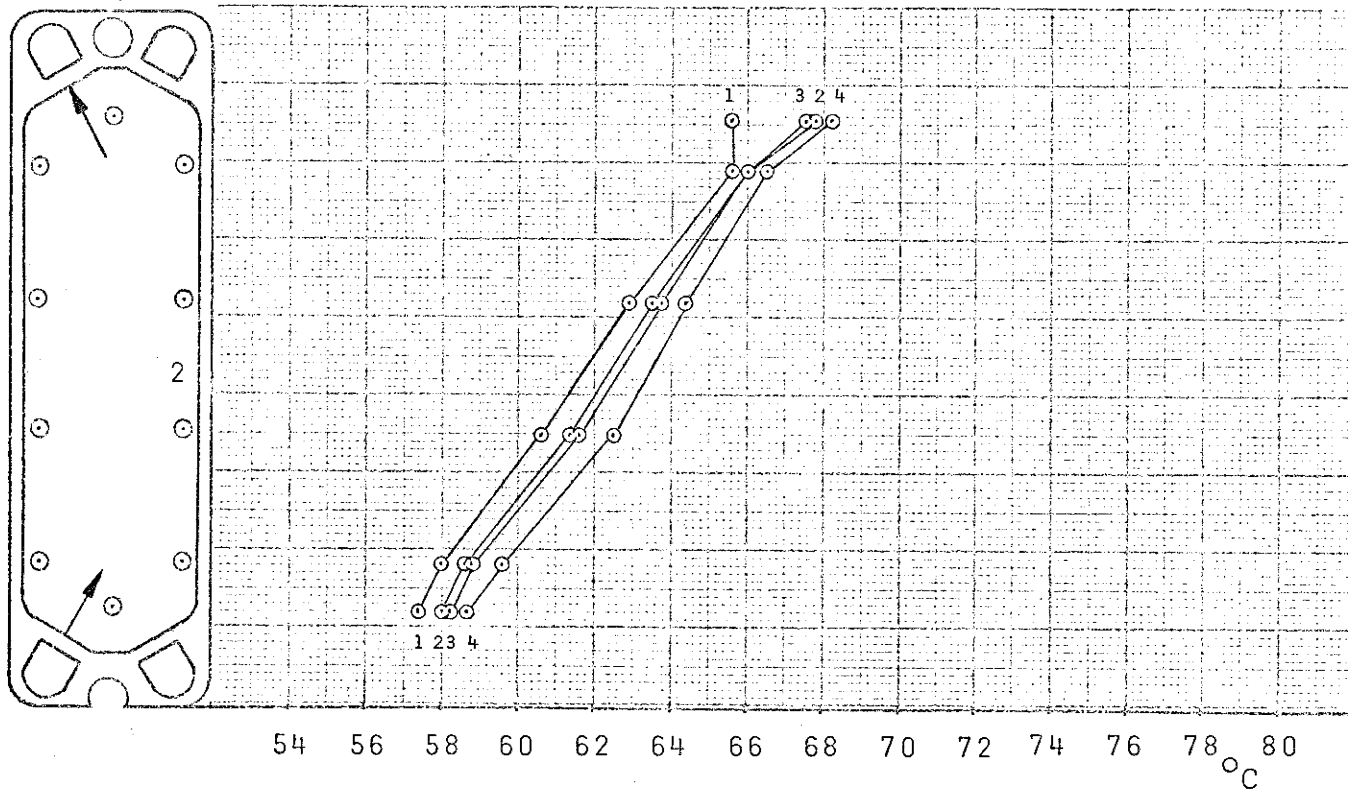


Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.



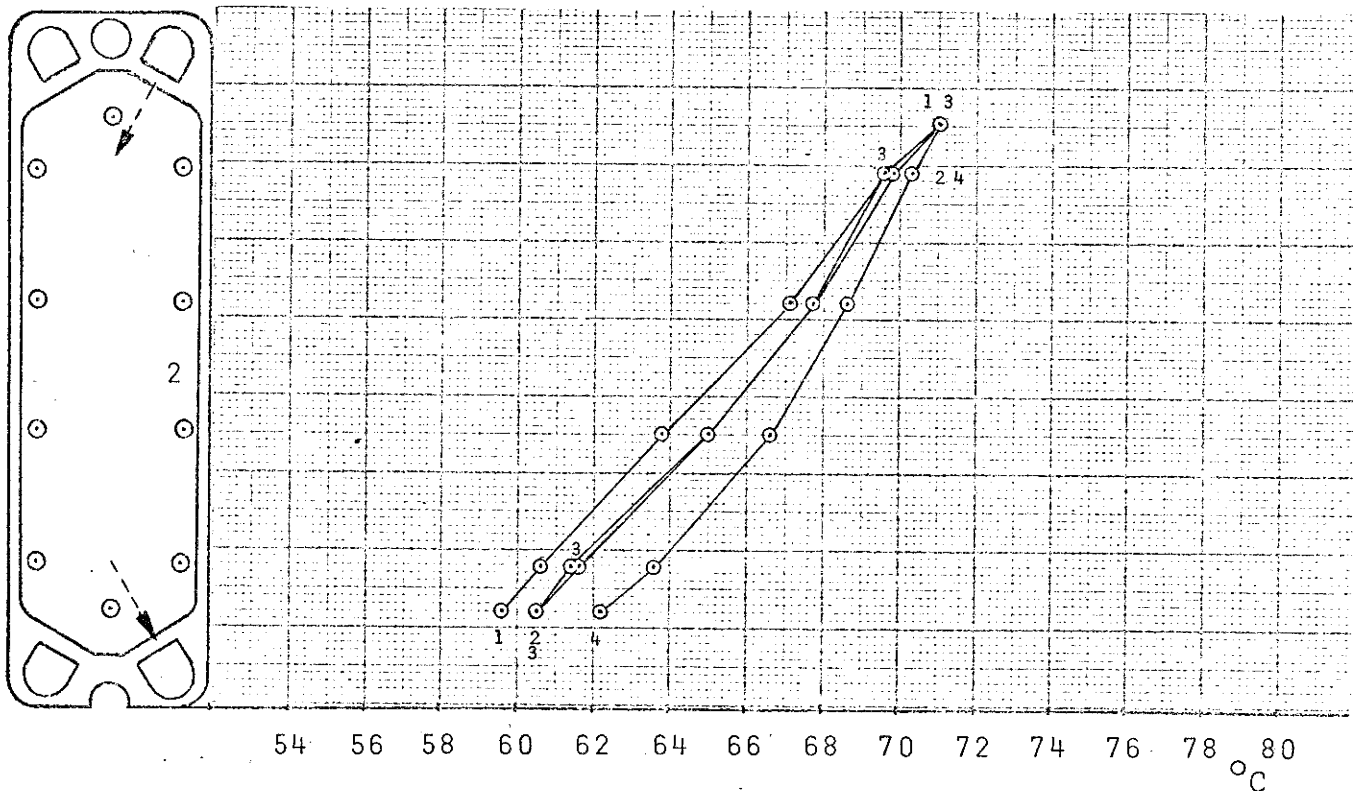
Målt på baksiden av platen mot varmtvann. Gjennomstrømning 6000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.14. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 2 ved varierende gjennomstrømning av varmtvann.



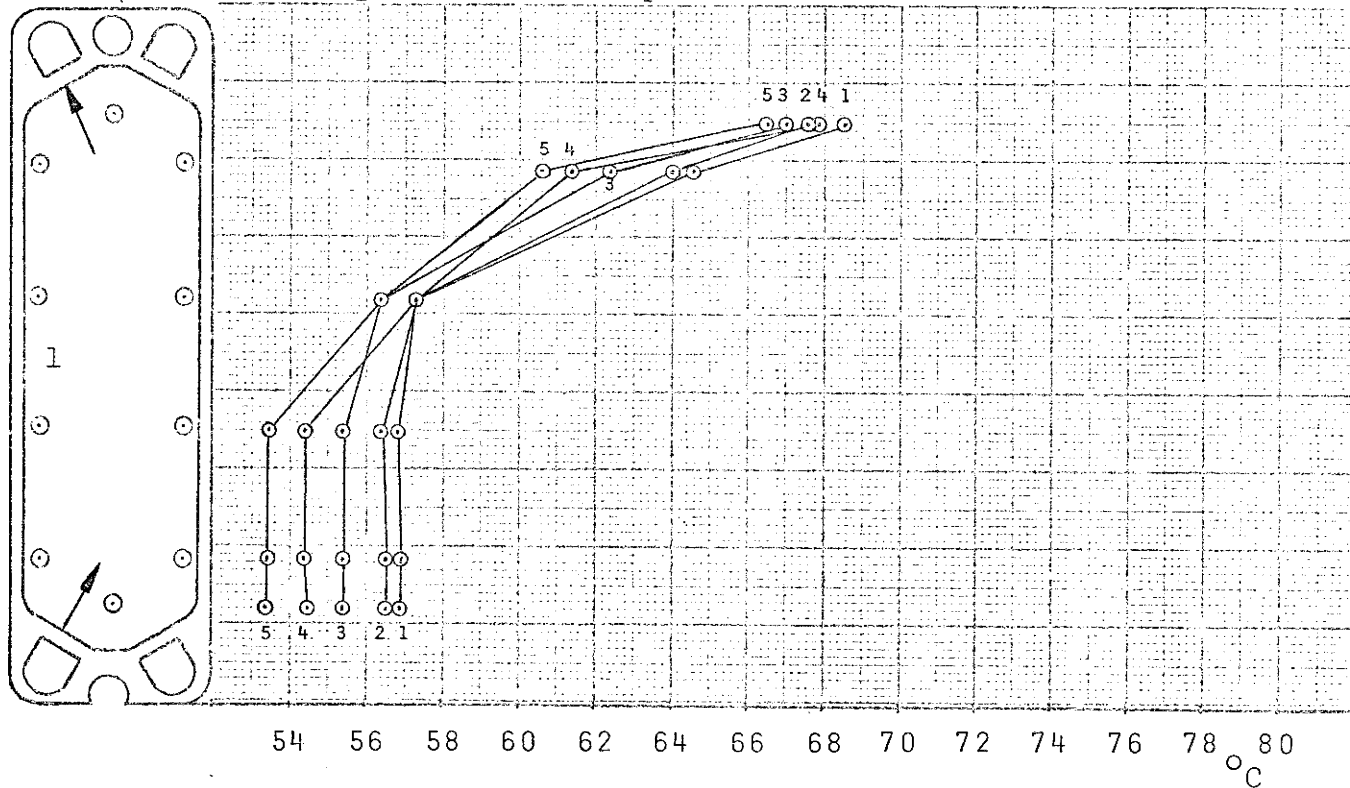
Målt på siden mot melk.

Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.

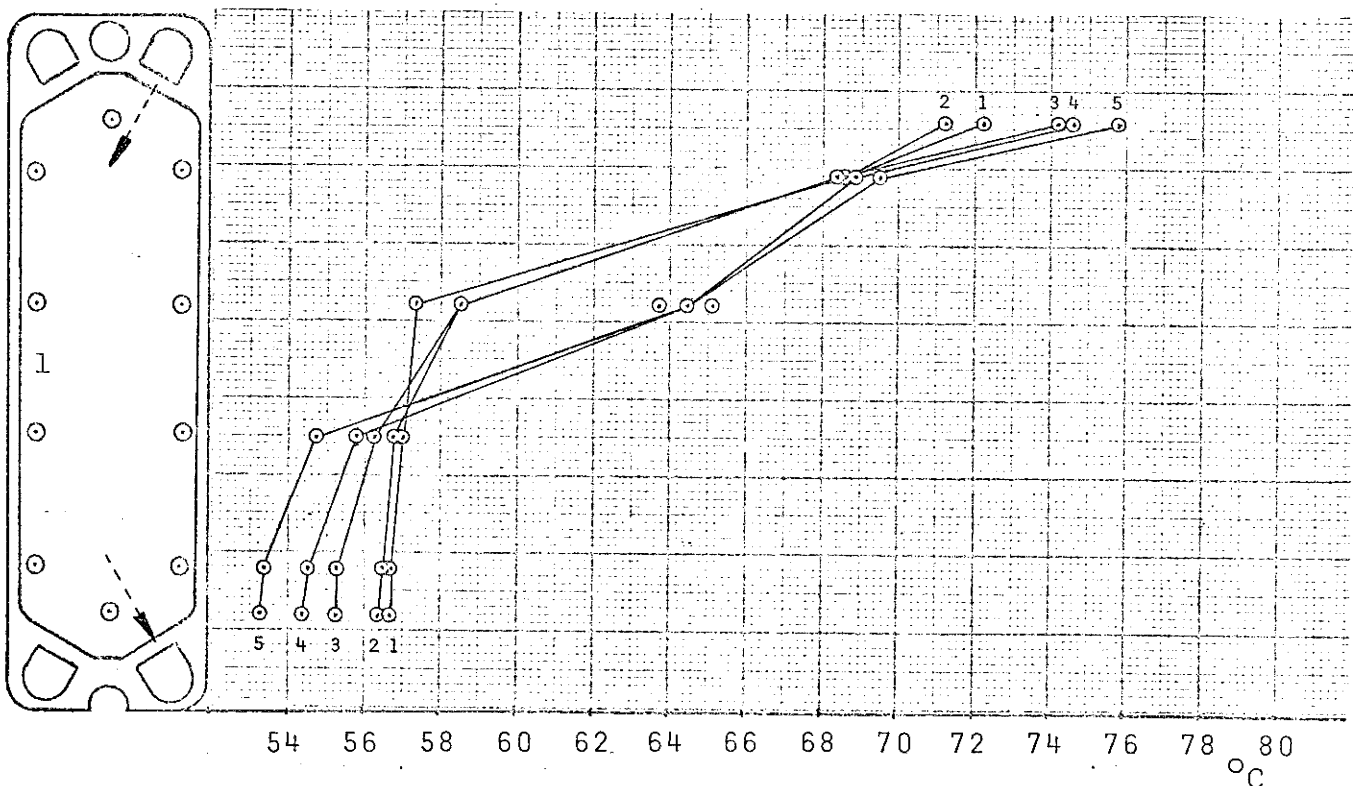


Målt på baksiden av platen mot varmtvann. Kurve 1 gjelder for 4000, kurve 2 for 5000, kurve 3 for 6000 og kurve 4 for 7000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.15. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 1 ved varierende gjennomstrømning av melk og oppvarming med vakuumdamp.

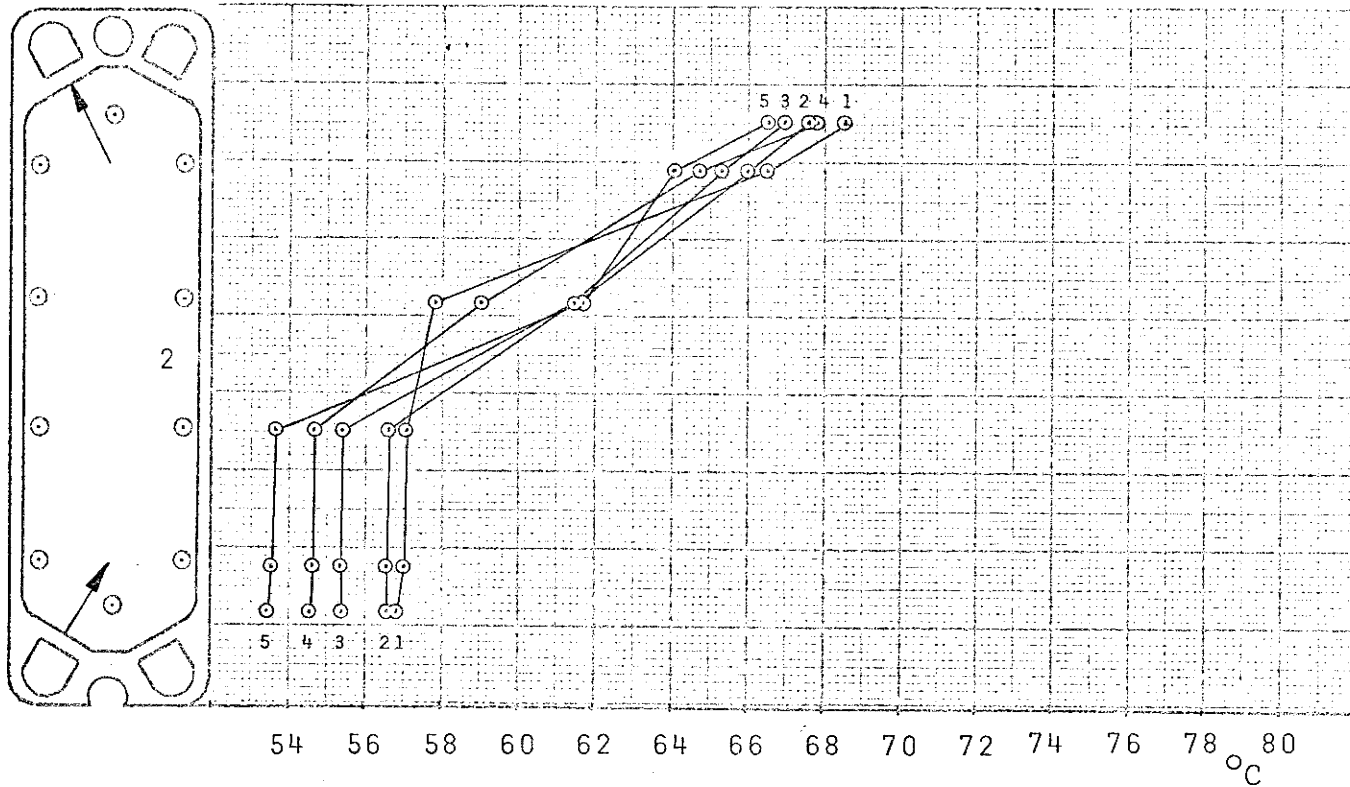


Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.

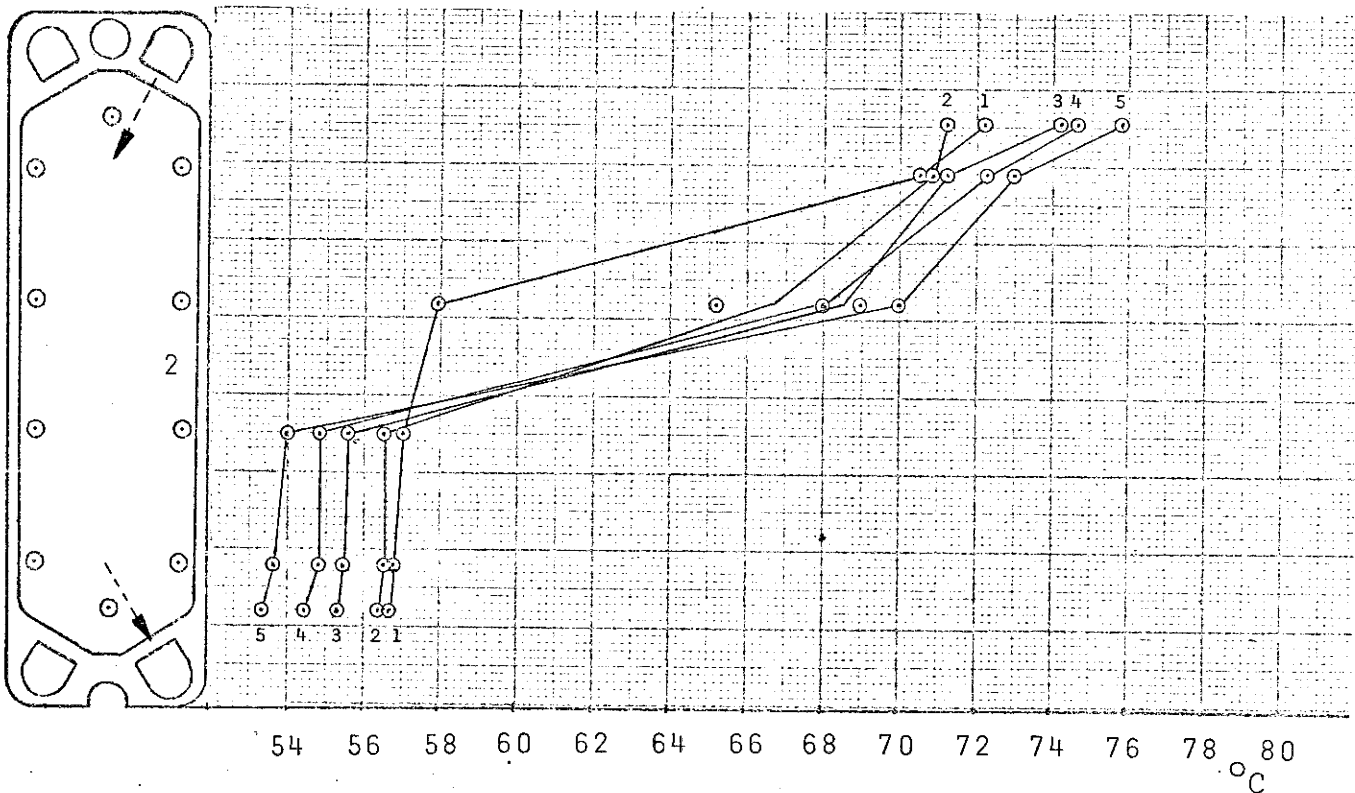


Målt på baksiden av platen mot vakuumdamp.

Fig. 8.16. Temperaturfordelingen over plate 2 langs platekant 2 ved varierende gjennomstrømning av melk og oppvarming med vakuumdamp.

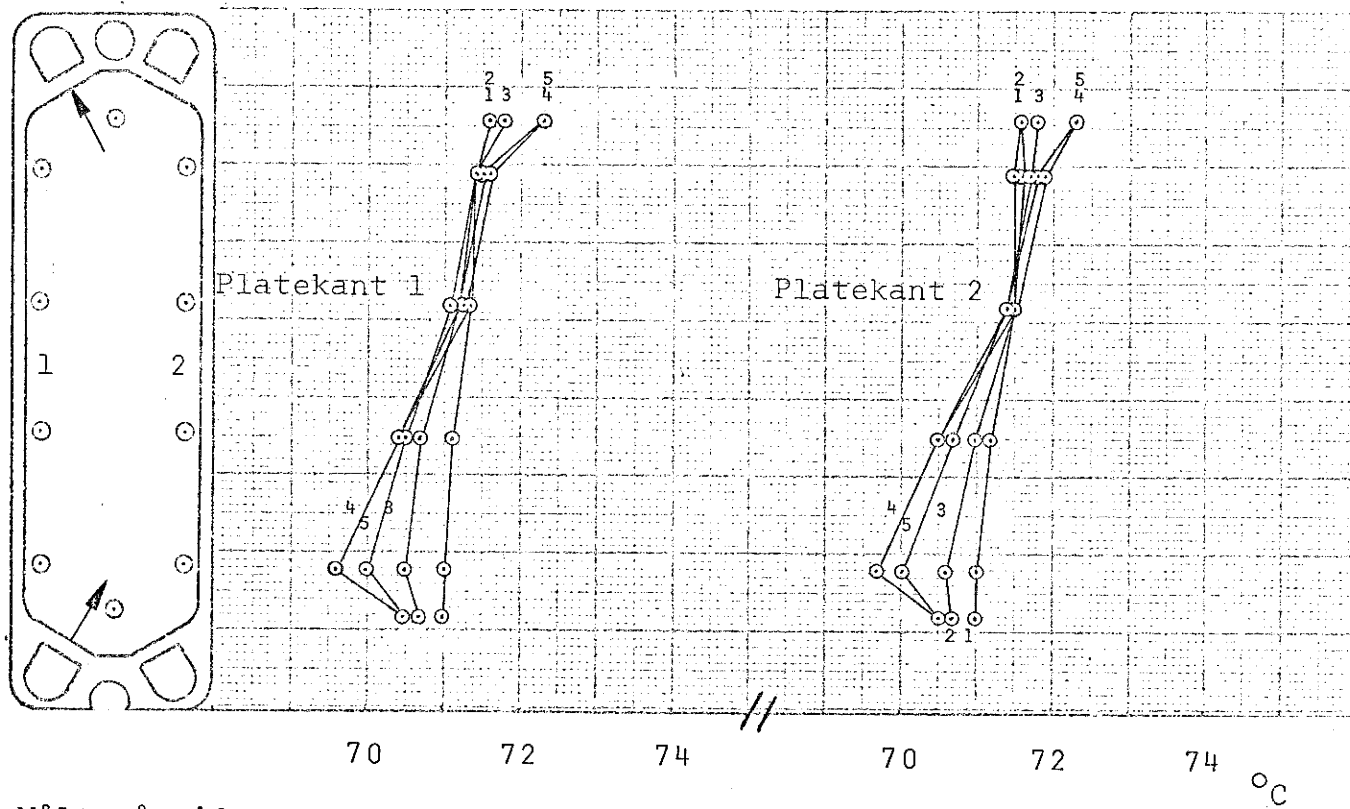


Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.

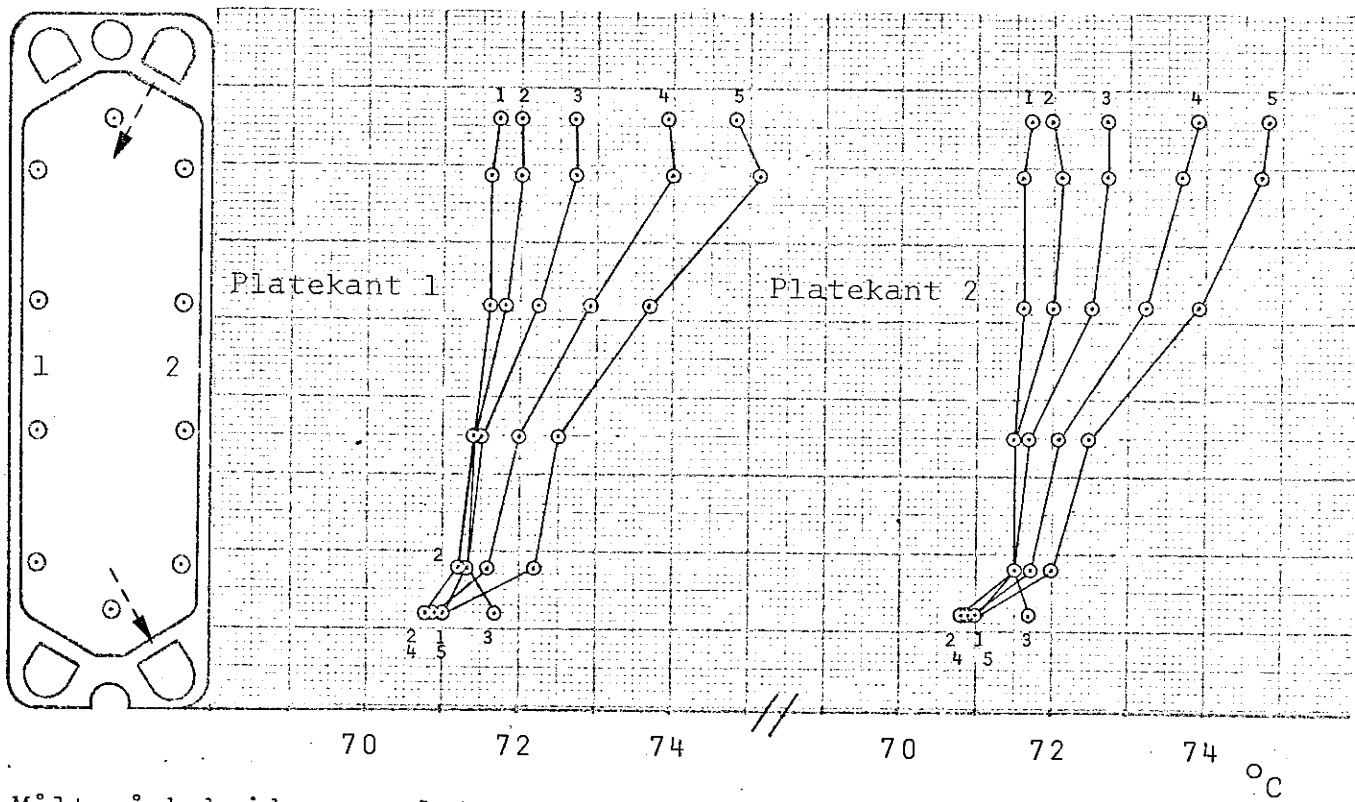


Målt på baksiden av platen mot vakuumdamp.

Fig. 8.17. Temperaturfordelingen over plate 14 langs platekant 1 og 2 ved varierende gjennomstrømning av melk og oppvarming med varmtvann.

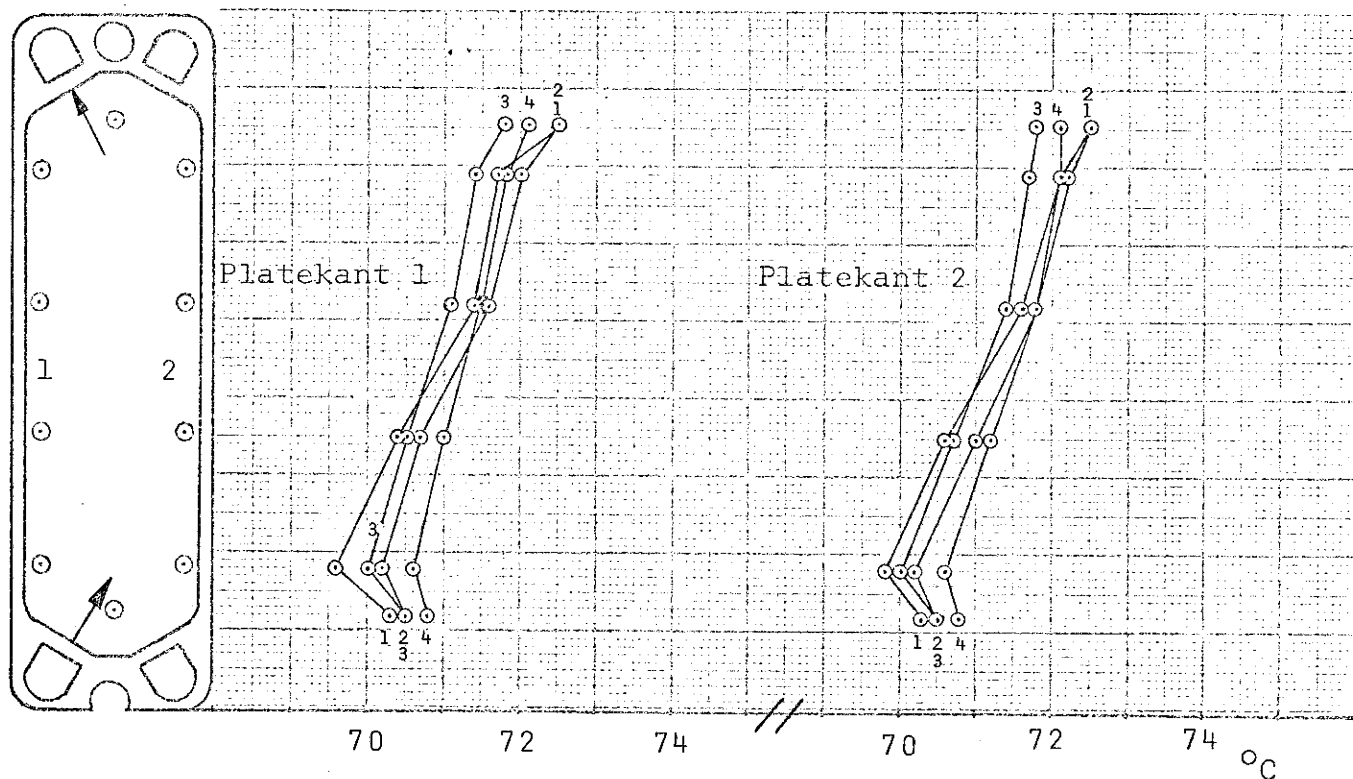


Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.



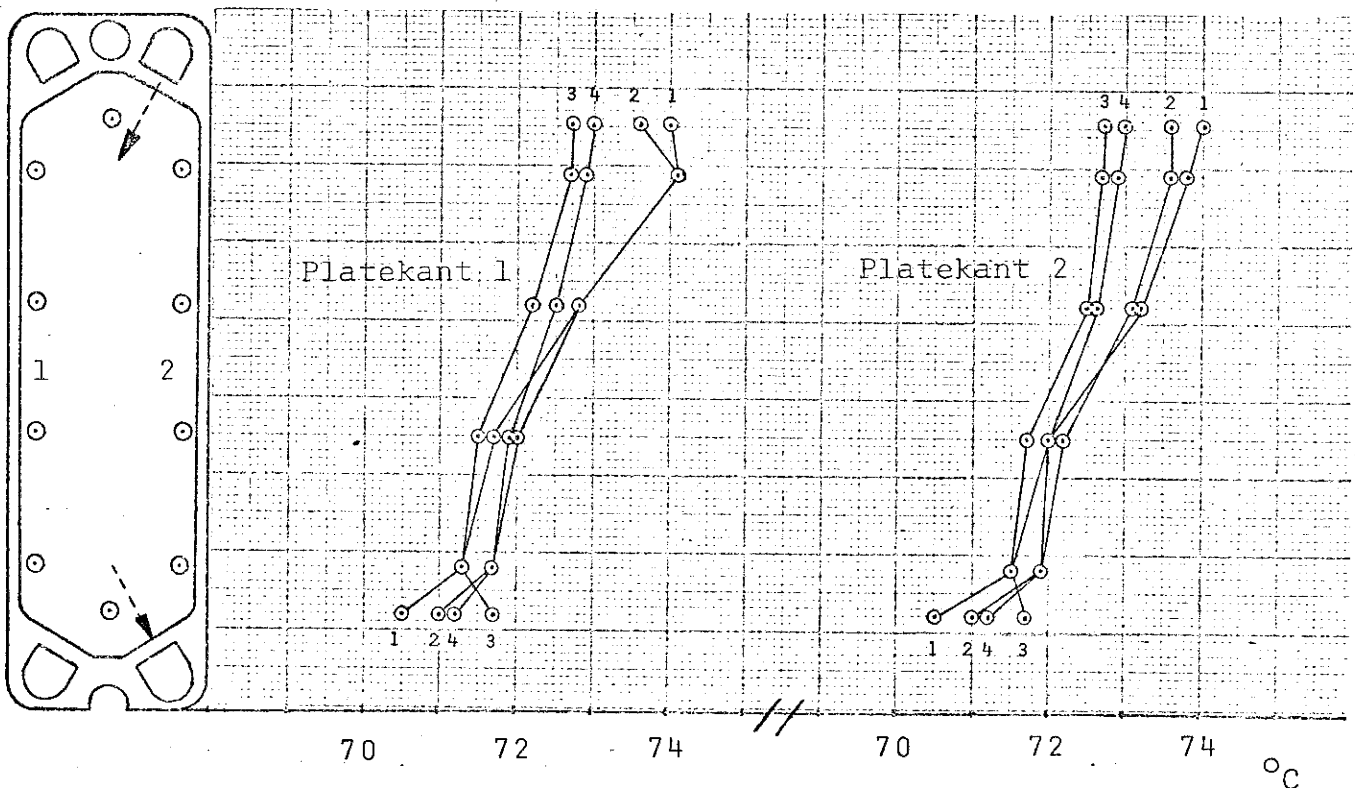
Målt på baksiden av platen mot varmtvann. Gjennomstrømning 6000 liter varmtvann pr. time.

Fig. 8.18. Temperaturfordelingen over plate 14 langs platekant 1 og 2 ved varierende gjennomstrømning av varmtvann.



Målt på siden mot melk.

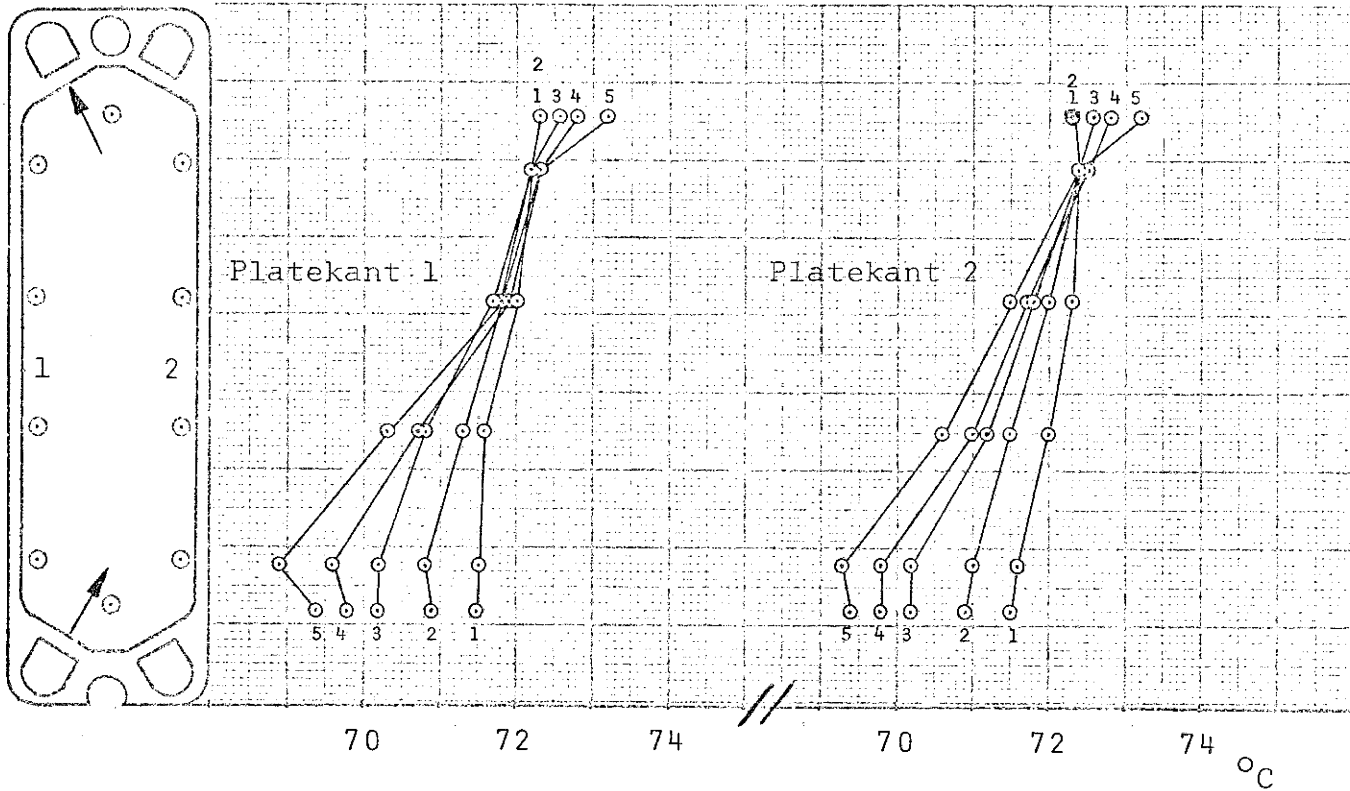
Gjennomstrømning 2000 liter melk pr.time.



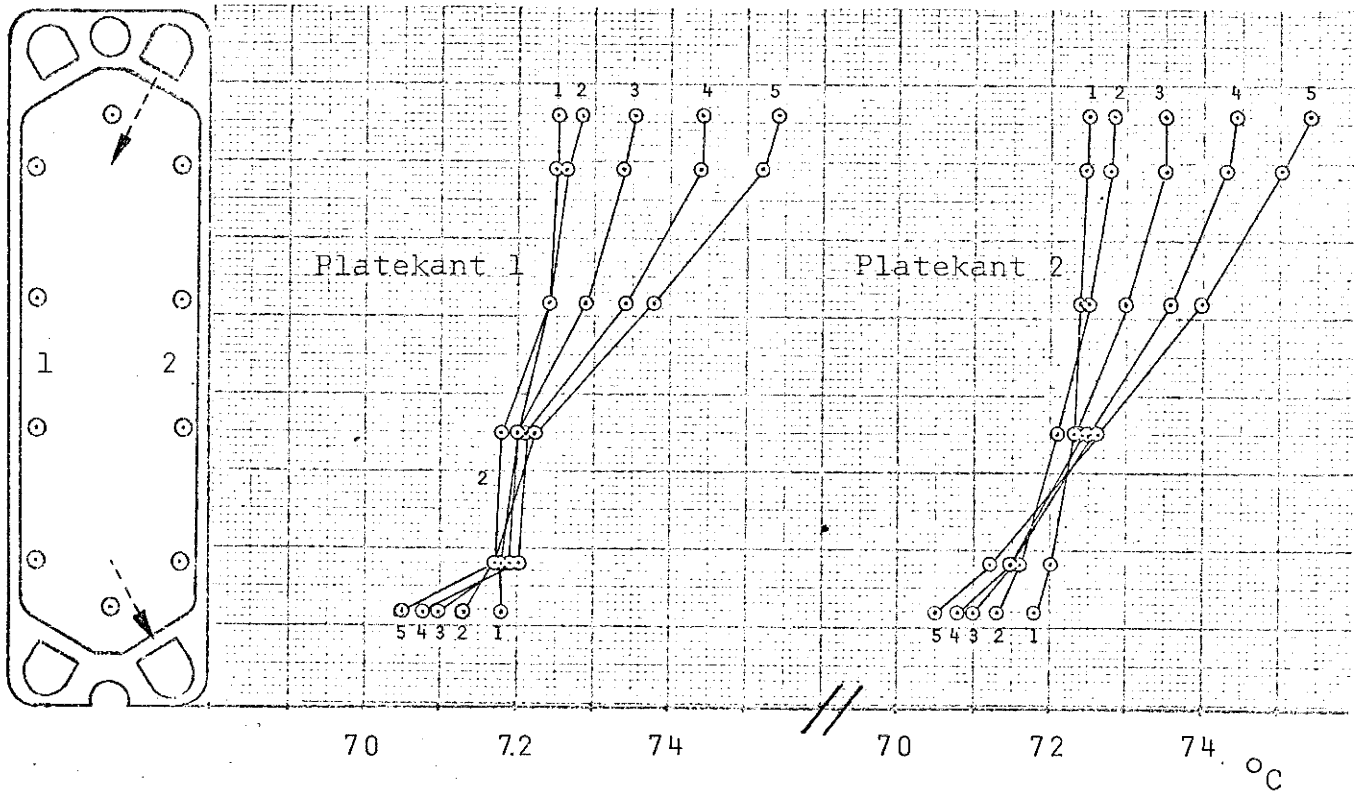
Målt på baksiden av platen mot varmtvann. Kurve 1 gjelder for 4000, kurve 2 for 5000, kurve 3 for 6000 og kurve 4 for 7000 liter varmtvann pr. time.



Fig. 8.19. Temperaturfordelingen over plate 14 langs platekant 1 og 2 ved varierende gjennomstrømning av melk og oppvarming med vakuumdamp.



Målt på siden mot melk. Kurve 1 gjelder for 1000, kurve 2 for 1500, kurve 3 for 2000, kurve 4 for 2500 og kurve 5 for 3000 liter melk pr. time.



Målt på baksiden av platen mot vakuumdamp.

8.6. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom platene i pasteuravdelingen.

Betingelsen for at varmestrøm skal oppstå gjennom en plate er at en har temperaturdifferanse mellom de to sidene av platen. Som beskrevet i avsnitt 8.5., måler en høyere temperaturdifferans gjennom platene når en lodder på termoelementer på overflaten enn differansen mellom virkelig overflatetemperatur.

Resultatene av målingene gir likevel et bilde av fordelingen av temperaturdifferansen mellom målepunktene over platen. Fordelingen gir også et bilde av hvorledes platene blir belastet ved de to måtene å oppvarme melk på.

I figur 8.20 til 8.23. er det gjengitt måleresultater for temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 2 og 14 ved varierende gjennomstrømning av melk. For å kunne sammenligne oppvarmingssystemene er sammenhørende figurer for oppvarming med varmtvann og vakuumdamp plassert på samme side.

Figur 8.20. viser temperaturdifferansen gjennom plate 2 ved konstant gjennomstrømning av varmtvann og variasjon i gjennomstrømningen av melk fra 1000 til 3000 liter pr. time. Ved 1000 liter pr. time var den laveste temperaturdifferansen  $0,9^{\circ}$  C og den høyeste  $3,1$ . Ved 3000 liter pr. time var de tilsvarende temperaturdifferansene  $4,2^{\circ}$  C og  $7,4^{\circ}$  C. Figuren viser forøvrig at det var relativt jevn temperaturdifferanse over platen med noe høyere temperaturdifferanser oppe på platen. Nederst i figur 8.20. ser en temperaturdifferansen mellom melkens innløpstemperatur til pasteuravdelingen og temperaturen nederst på platen på oppvarmings-siden. Dette blir et tilnærmet mål på den temperaturdifferansen melken møter når den kommer inn i pasteuravdelingen. Temperaturdifferansen varierte fra  $5,1$  til  $7,2^{\circ}$  C. Det var uventet at den høyeste temperaturdifferansen ble målt ved 1000 og 3000 liter melk pr. time, mens den laveste ble målt ved 2000 liter melk pr. time.

I figur 8.21. er de tilsvarende temperaturdifferansene vist ved oppvarming med vakuumdamp. Nederst på platen viser målingene flere steder negativ temperaturdifferans. En antar at dette skyldes målefeil. Spredningen var fra  $-0,1$  til  $-0,3^{\circ}$  C i temperaturdifferans og dette er innenfor de feilgrensene en må regne med på termografen. Resultatene viser også at det var

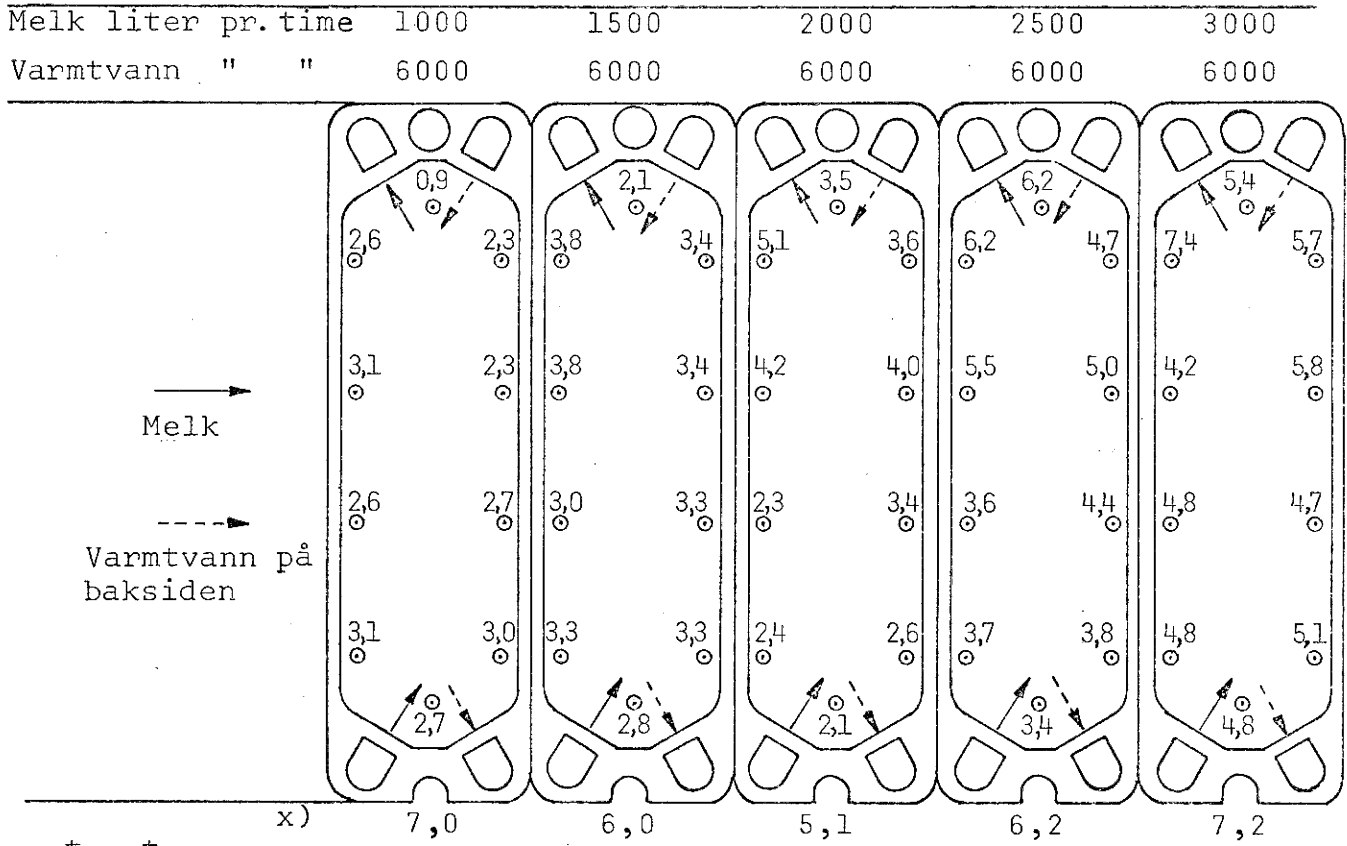
ubetydelig temperaturdifferans på nederste halvdel av platen mens på øverste halvdel foregår den vesentligste delen av varmetransporten. Nederst i figur 8.21. er vist temperaturdifferansen mellom melken og oppvarmingsmediet ved innløpet til pasteuravdelingen. Ved samtlige variasjoner i gjennomstrømningen av melk var temperaturdifferansen negativ. Det går klart fram av måleresultatene at den temperaturdifferansen melken blir utsatt for ved innløpet til pasteuravdelingen ved oppvarming med varmtvann ikke er større enn temperaturdifferansen oppe på platen ved oppvarming med vakuumdamp.

I figur 8.22. og 8.23. er måleresultatene for temperaturdifferansene på plate 14 gjengitt. Som en ser i tabellen var det ubetydelig forskjell i temperaturdifferansene ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp. Ved gjennomstrømning av 1000, 1500 og 2000 liter pr. time var forskjellen i temperaturdifferansen ikke ved noen målepunkter større enn  $0,4^{\circ}$  C. Ved 2500 liter pr. time var forskjellen ved målepunktene 1 og 5 henholdsvis  $0,6$  og  $1,4^{\circ}$  C. Ved 3000 liter pr. time var de tilsvarende temperaturdifferansene henholdsvis  $0,6$  og  $0,6^{\circ}$  C.

I figur 8.24. er det gjengitt en sammenligning mellom oppvarming med varmtvann og vakuumdamp ved de platene som ble målt ved gjennomstrømning av 2000 liter melk pr. time. Den øverste delen av figuren viser temperaturdifferansen gjennom plate 2 og 14 oppvarmet med varmtvann. Midt på platen var det minst temperaturdifferans ved punkt 3. Ved punkt 4 og 8 var det tilnærmet like stor temperaturdifferans. Dette var ikke uventet fordi melken har større hastighet langs side 2 dvs. på motsatt side av innløp og utløp. Varmeovergangstallet på melkesiden blir derfor vesentlig bedre langs side 2. På plate 14 viser målingene ubetydelig forskjell i temperaturdifferansen.

Nederst i figur 8.24. er temperaturdifferansen ved gjennomstrømning av 2000 liter melk pr. time oppvarmet med vakuumdamp gjengitt. På plate 2 var det ubetydelig temperaturdifferanse nederst på platen. Øverst på platen ved punkt 5, 6, 7 og 8 varierte temperaturdifferansen mellom  $5,9$  og  $7,2^{\circ}$  C. Resultatene viser at selv om melken møter ubetydelig temperaturdifferanse ved innløpet til pasteuravdelingen, møter den en temperaturdifferanse på  $6$  til  $7^{\circ}$  C øverst på platen. Temperaturdifferansen på plate 14 viste tilnærmet samme forløp ved oppvarming med vakuumdamp som ved oppvarming med varmtvann.

Fig. 8.20. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 2, oppvarmet med varmtvann.



x)  $t_1$  = temperaturen nederst på platen på oppvarmingssiden °C.  
 $t_2$  = temperaturen i væskestrømmen mellom regenerativ- og pasteuravdelingen °C.

Fig. 8.21. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 2, oppvarmet med vakuumdamp.

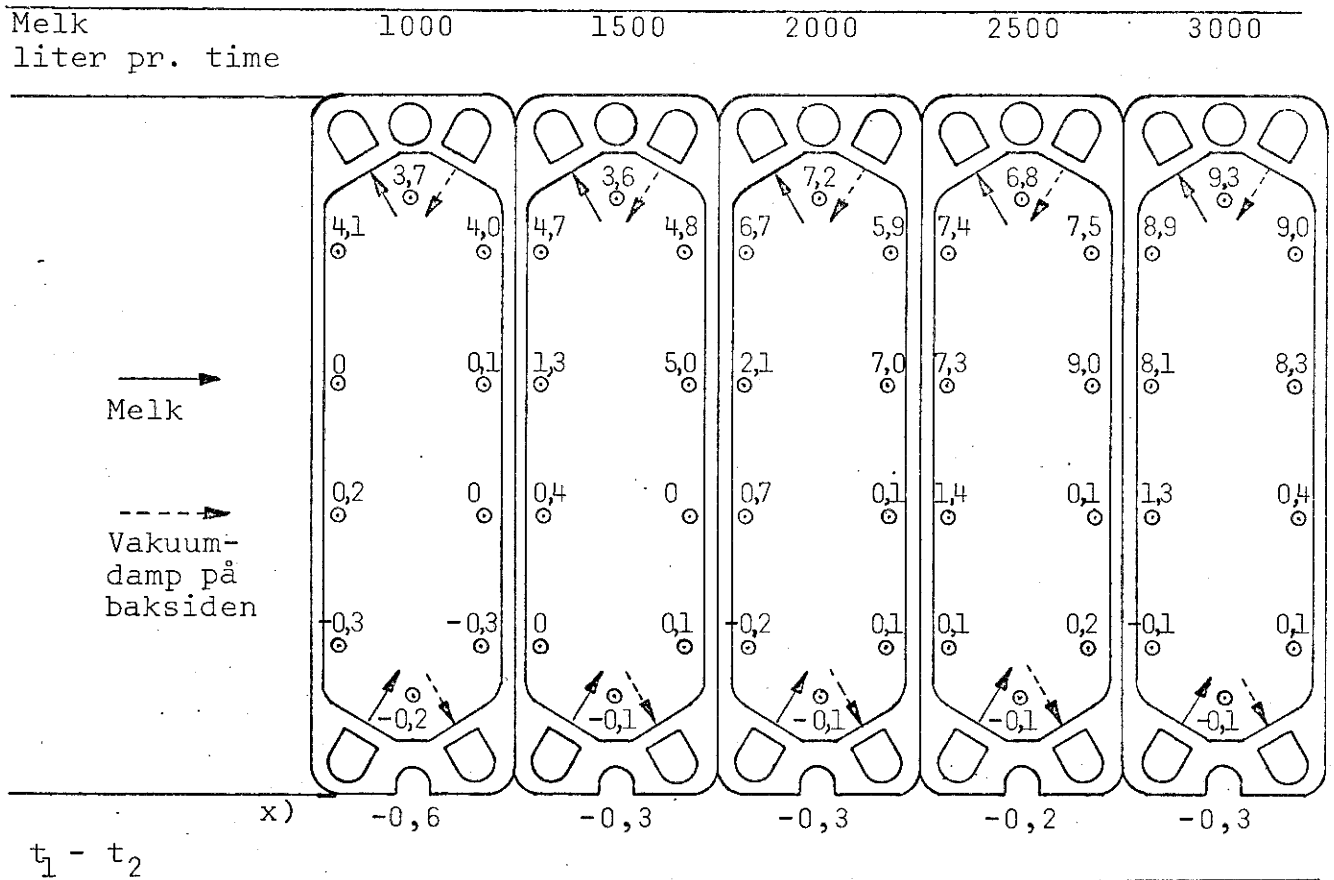


Fig. 8.22. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 14, oppvarmet med varmtvann.

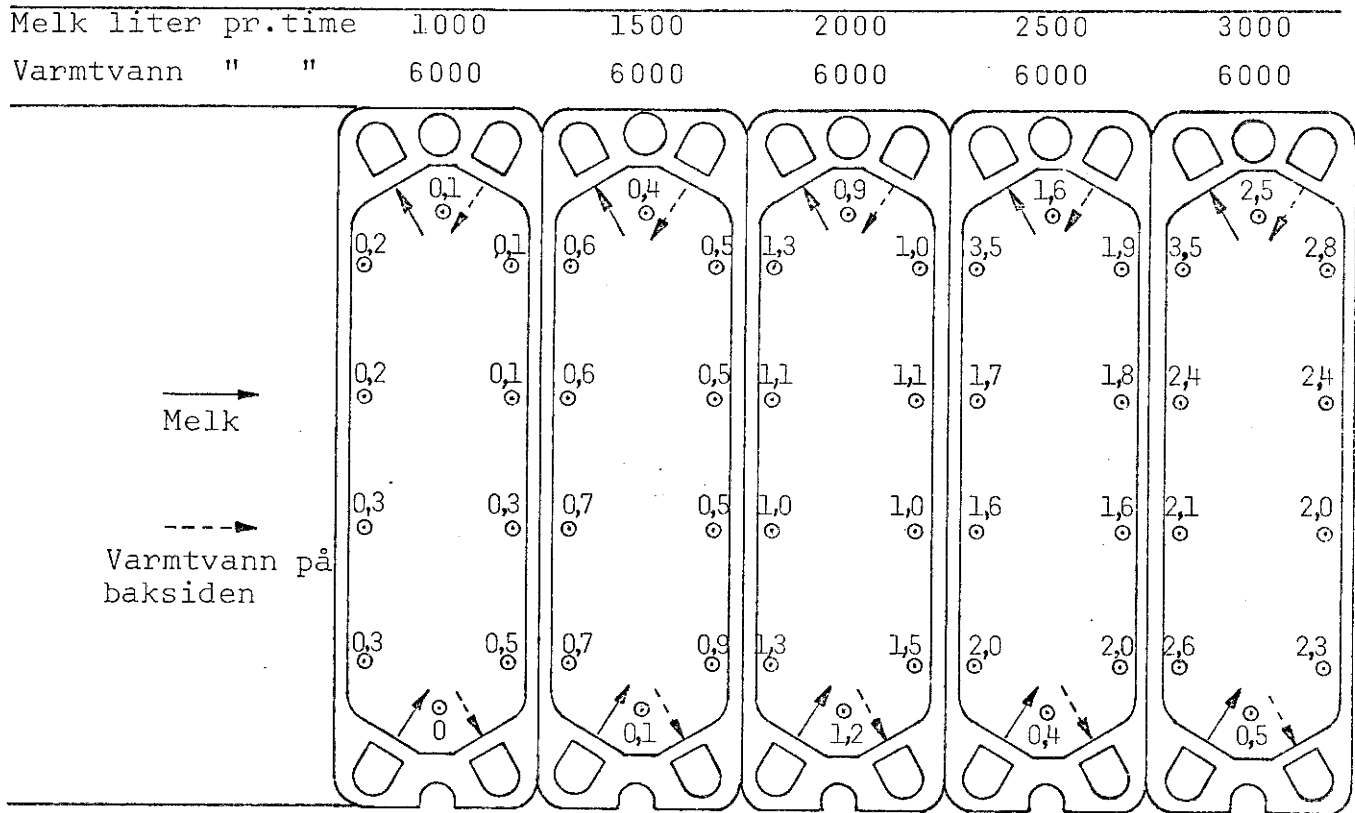


Fig. 8.23. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 14, oppvarmet med vakuumdamp.

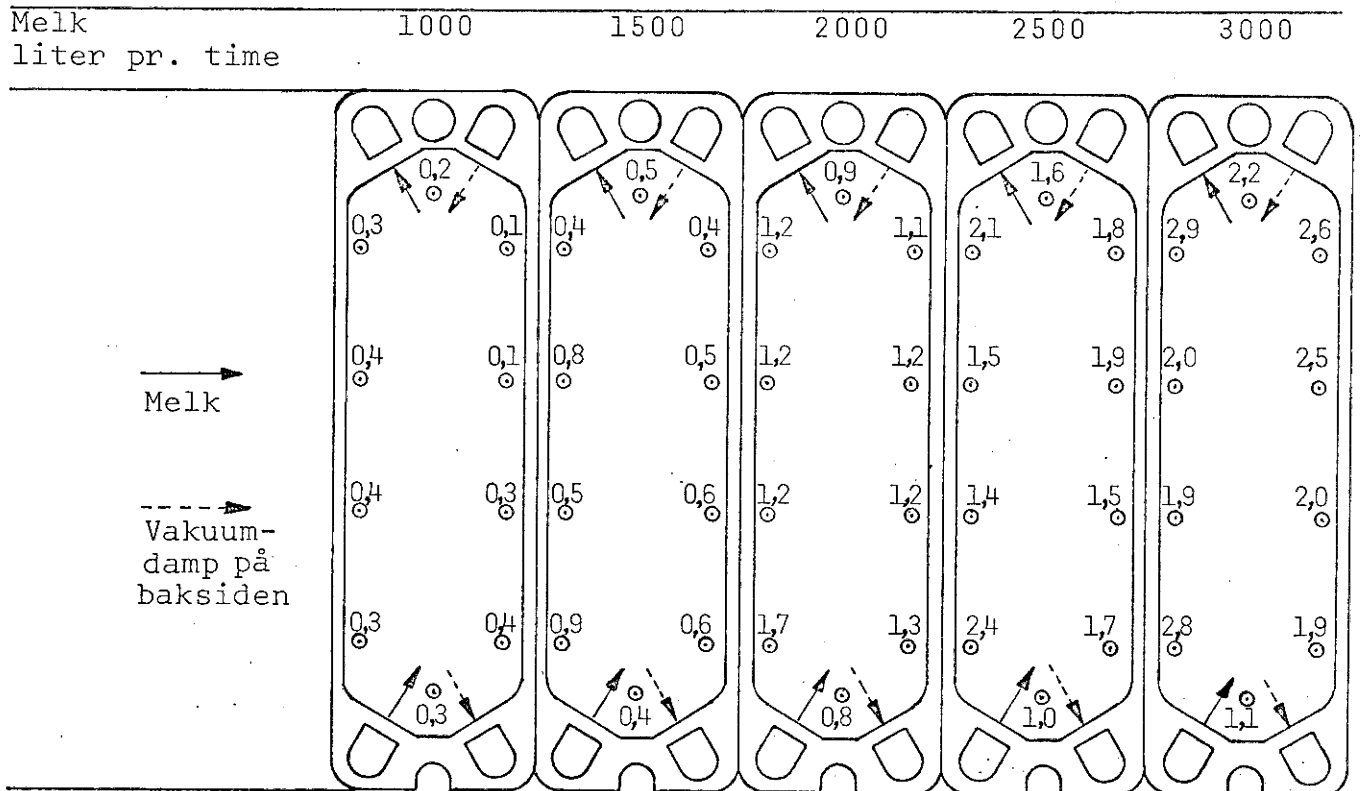
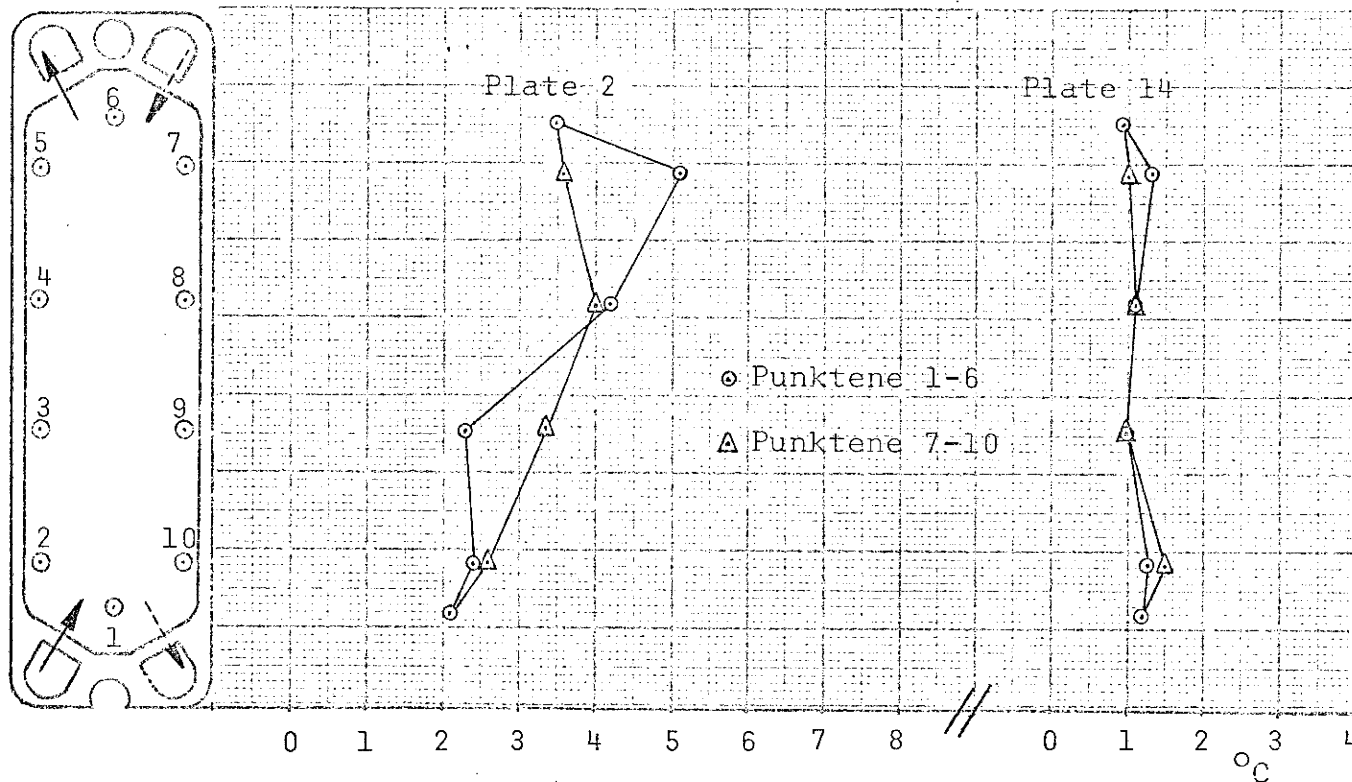
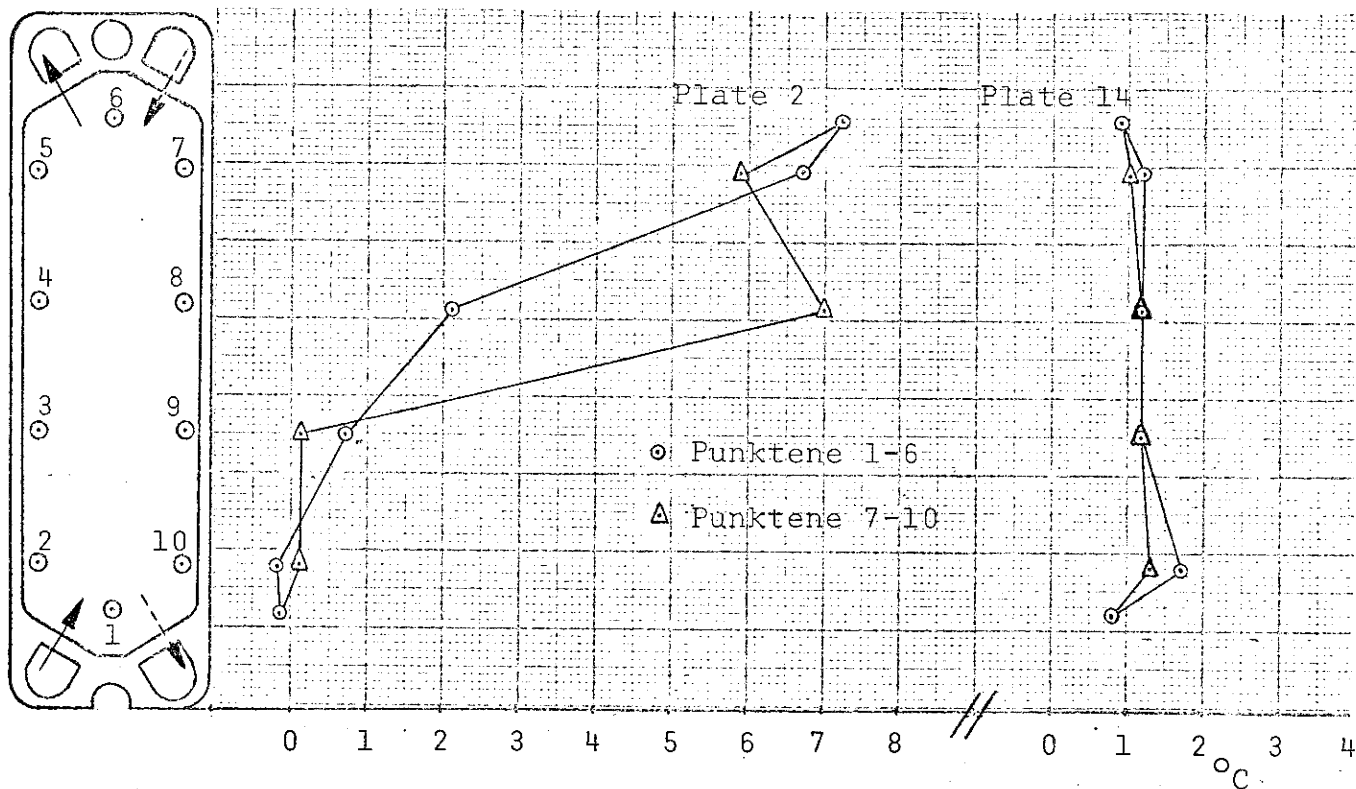


Fig. 8.24. Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom plate 2 og 14.



Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.

" " 6000 liter varmtvann pr. time.



Gjennomstrømning 2000 liter melk pr. time.

" " vakuumdamp.

## 9. Sammendrag.

Undersøkelsen omfattet reguleringstekniske og varmetekniske forhold vedrørende en platepasteur, type P5-RB, med kapasitet 2000 liter melk pr. time. Platepasteuren og reguleringsutstyret er beskrevet i avsnittene 3, 4 og 5. Pasteuriseringsanlegget var produsert av firmaet Alfa Laval A. B., Sverige.

I den reguleringstekniske delen av undersøkelsen er det gjort rede for faktorene damptrykk ( $1,1 - 3,8 \text{ kp/cm}^2$ ), gjennomstrømmet mengde melk ( $2000 \pm 500$  liter pr. time) og variasjon av melkens innløpstemperatur ( $9-20^\circ \text{ C}$  og  $20-9^\circ \text{ C}$ ). Disse faktorene har innvirkning på tilført varmemengde, og de kan regnes til faktorer som har forsterkende virkning. Åpningsarealet i strupeventilen i vakuumbøret ved dampreguleringsventilen ( $1,37, 2,32$  og  $2,93 \text{ mm}^2$ ) ble også undersøkt. Denne faktoren har også forsterkende virkning i reguleringsløyfen. Plassering av regulatorens temperaturføler (tidsforsinkelse mellom posisjon 1 og 2, 1,44 sekunder) og gjennomstrømmet mengde varmtvann (4000, 6000 og 8000 liter pr. time med transportforsinkelse henholdsvis 8,52, 5,67 og 4,27 sekunder), regnes til faktorer som har tidsforsinkende virkning i reguleringsystemet.

Prøvene ved oppvarming med varmtvann og ved oppvarming med vakuumdamp ble utført på samme måte for å kunne sammenligne de to oppvarmingssystemenes innvirkning på reguleringsforløpet.

For å vurdere virkningen av transportforsinkelsen i reguleringsystemet, var det nødvendig å lage en tilnærmet teoretisk overføringsfunksjon av varmevekslerprosessen og behandle funksjonen ved hjelp av frekvensanalyse.

Resultatet ved oppvarming med varmtvann viste ikke noen klar forskjell mellom plasseringen av regulatorens temperaturføler i posisjon 1 ved utløpet av pasteuravdelingen eller om den var plassert i posisjon 2 med 1,44 sekunder tidsforsinkelse. Derimot viste den interne transportforsinkelse ved gjennomstrømmet mengde varmtvann klar forskjell. Ved 4000 liter pr. time var 23 av 30 driftstilstander ustabile ved damptrykk på  $2,6 \text{ kp/cm}^2$  og lavere. Ved 6000 liter pr. time kunne en pasteurisere stabilt ved 16 av 30 driftstilstander ved maksimalt tilgjengelig damptrykk,  $3,8 \text{ kp/cm}^2$ .

Ved 8000 liter pr. time var samtlige driftstilstander stabile ved maksimalt damptrykk. Ved det minste åpningsareal i strupeventilen, fant en ved sirkulasjon av 8000 liter varmtvann pr. time et område i damptrykket fra 2,4 til 2,7 kp/cm<sup>2</sup> hvor driftstilstanden var betinget stabil. Svingningene hadde høy frekvens og lav amplitude og virket ikke inn på pasteurens termograf.

Ved samtlige driftstilstander som ble undersøkt, viste det seg at variasjon av gjennomstrømmet mengde melk og variasjon av melkens innløpstemperatur hadde liten innvirkning på forsterkingen i reguleringsystemet. Åpningen av dysen i vakuumsystemet viste seg å ha større forsterkende virkning på reguleringsystemet. Resultatene viste at bortsett fra 5 driftstilstander ved gjennomstrømning av 4000 liter varmtvann pr. time, var de øvrige driftstilstandene stabile ved maksimalt damptrykk når åpningsarealet i strupeventilen ved dampreguleringsventilen var størst, 2,93 mm<sup>2</sup>.

Variasjon av damptrykket hadde stor forsterkende virkning. Ved oppvarming med varmtvann ble damptrykket variert fra 2,2 til 3,8 kp/cm<sup>2</sup>. Med regulatorens temperaturføler i posisjon 2 og åpning på 2,93 mm<sup>2</sup> i strupeventilen ved dampreguleringsventilen, var samtlige driftstilstander stabile ved maksimalt damptrykk. Ved oppvarming med vakuumdamp viste resultatene klar forskjell mellom de to posisjonene regulatorens føler var plassert i. Med føleren plassert i posisjon 1 var det ikke mulig å oppnå ustabil driftstilstand når en økte forsterkingen maksimalt. Med føleren i posisjon 2 fikk en ustabile driftstilstander ved damptrykket i området 1,1 til 2,1 kp/cm<sup>2</sup>. Forsterkningsvariasjon i dysen ved dampreguleringsventilen hadde ingen innvirkning på dette resultatet. Variasjon i melkens gjennomstrømning og melkens innløpstemperatur var årsak til spredningen i damptrykket.

Den varmetekniske delen av undersøkelsen omfattet måling og beregning av varmegjennomgangstallet i pasteuravdelingen og regenerativavdelingen ved varierende gjennomstrømning. Videre ble regenerativvirkning ved varierende gjennomstrømning, varmetap i pasteuravdelingen, trykktap i pasteurens enkelte avdelinger undersøkt. Det ble også foretatt måling av temperaturfordelingen over to plater, en ved innløpet og en ved utløpet i pasteuravdelingen og temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom de foran nevnte plater.



I pasteuravdelingen var varmegjennomgangstallet 1958 kcal/m<sup>2</sup>h °C ved gjennomstrømming av 1000 liter melk pr. time. Ved 2000 og 3000 liter pr. time var varmegjennomgangstallet henholdsvis 2840 og 3278 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Gjennomstrømmet mengde varmtvann var 6000 liter pr. time. De tilsvarende varmegjennomgangstall i regnerativavdelingen var henholdsvis 1513, 2653 og 3439 kcal/m<sup>2</sup>h °C ved oppvarming med varmtvann. Ved oppvarming med vakuumdamp var de tilsvarende varmegjennomgangstallene henholdsvis 1520, 2676 og 3459 kcal/m<sup>2</sup>h °C.

Regnerativvirkningen i platepasteuren var 78,6 og 73,5 prosent ved gjennomstrømming av henholdsvis 1000 og 3000 liter melk pr. time ved oppvarming med varmtvann. Ved oppvarming med vakuumdamp var de tilsvarende tall for regnerativvirkningen henholdsvis 78,5 og 73,5 prosent.

Varmetap fra pasteuravdelingen som ble utregnet på grunnlag av differansen mellom den utvendige overflatetemperaturen og lufttemperaturen, viste tilnærmet samme resultat ved varierende gjennomstrømming. Det varmetapet som ble beregnet som differansen mellom avgitt og mottatt varmemengde viste imidlertid stor spredning p.g.a. relativt stor spredning i måleresultatene.

Trykktapet ble målt som differansen mellom det statiske trykk ved innløpet og ved utløpet av regnerativavdelingen, pasteuravdelingen og holdercellen. Resultatene viste betydelig større trykktap ved utløpssiden enn ved innløpssiden i regnerativavdelingen.

På plate 2 ved innløpet til pasteuravdelingen, viste temperaturfordelingen over platen stor forskjell mellom oppvarming med varmtvann og vakuumdamp. Ved oppvarming med varmtvann var det tilnærmet lineær temperaturstigning langs plate 2 ved varierende gjennomstrømming. Ved oppvarming med vakuumdamp viste målingene ingen temperaturstigning på nederste halvdel av platen, men på øvre halvdel var det meget stor temperaturstigning. Temperaturfordelingen over plate 14 ved utløpet av pasteuravdelingen viste tilnærmet samme forløp ved oppvarming med varmtvann og vakuumdamp.

Temperaturdifferansen mellom målepunktene gjennom platene 2 og 14 ble målt ved de samme punktene som temperaturfordelingen over platene. Ved oppvarming med varmtvann og gjennomstrømming av 2000 liter melk pr. time var det 2,6 ganger større temperaturdifferanse gjennom plate 2 øverst på platen enn nederst. Det samme forhold ble målt til 7,2 ganger ved oppvarming med vakuumdamp.

10. Summary.

The aim of the present work was to study some control- and heat technical problems concerning a plate heat exchanger, type P5-RB with a capacity of 2000 liters of milk per hour. The plant was manufactured at the company Alfa-Laval A.B., Sweden. A brief description of the plate heat exchanger and the components of the control system is shown in chapter 3, 4 and 5.

In the first part of the investigation concerning control technical problems, the following factors are studied: steam pressure (1,1 - 3,8 kp/cm<sup>2</sup>), the flow of milk (2000 ± 500 liters per hour) and variations in the inlet temperature of the milk (9-20 and 20-9° C). The mentioned factors has influence on the heat supplied, and the factors therefor put gain into the control system. The variable open area of the throttle valve in the vacuum tube at the steam regulating valve (1,37, 2,32 and 2,93 mm<sup>2</sup>) was investigated. This factor has also gain influence on the control loop. The position of the temperaturesensitive bulb of the regulator (delay time between position 1 and 2 1,44 seconds) and the flow of hot water (4000, 6000 and 8000 liters per hour with a delay time of respectively 8,52, 5,67 and 4,27 seconds) is counted to factors which have delay time influence on the control system.

The test series when heating with hot water and heating by vacuum steam were carried out in similar manner in order to be able to compare the influence of heating systems on the control system.

In order to study the effect of the delay time in the control system, it was necessary to make a teoretical transfer-function of the heat exchange process and treat this by means of the frequency analysis method.

When heating with hot water the results showed no real difference whether the temperaturesensitive bulb was located at position 1 or at position 2 with a delay time between the two positions of 1,44 seconds. On the other hand the internal delay time caused of the circulation of hot water showed distinct difference. By circulation of 4000 liters per hour, 23 of 30 changes of the system state were unstable at a steam pressure of

2,6 kp/cm<sup>2</sup> and lower. By 6000 liters per hour it was possible to obtain stable system state at 16 of the 30 investigated changes of the system state at maximum steam pressure obtained, 3,8 kp/cm<sup>2</sup>. By 8000 liters per hour all the 30 investigated changes of the system state were stable at steam pressure of 3,8 kp/cm<sup>2</sup>. At steam pressure between 2,4 and 2,7 kp/cm<sup>2</sup>, by circulation of 8000 liters of hot water per hour and the smallest open area in the throttle valve, the system states were conditionally stable. The oscillations consisted of high frequency and low amplitude and had no influence on the thermograph of the plant. By all the system states investigated, the variation of milk flow and the inlet temperature had minimal gain influence on the control system. The variable open area in the throttling valve in the vacuum tube had higher effect on the control system. Except 5 variations of the system state by flow of 4000 liters hot water per hour, the remaining changes of the system state were stable at maximum steam pressure of 3,8 kp/cm<sup>2</sup> when the variable open area in the throttle valve was 2,93 mm<sup>2</sup>.

The variation of the steam pressure had relative high effect on the control system. When heating with hot water the steam pressure was varied between 2,2 and 3,8 kp/cm<sup>2</sup>. With the temperaturesensitive bulb in position 2 and the open area in the throttle valve at the steam regulating valve, each and all of the system states were stable at maximum steam pressure. When heating with vacuum steam the result showed distinct difference between the two alternate positions of the temperaturesensitive bulb. With the bulb located at position 1 it was not possible to obtain unstable states when the gain was increased. On the other hand when the bulb was located at position 2 unstable states were obtained with a steam pressure between 1,1 and 2,1 kp/cm<sup>2</sup>. The effect of the gain variations caused of the throttle valve at the steam regulating valve had no influence on the results. The variations of the flow of milk and the variations of the inlet temperature caused the deviation in the steam pressure.

The second part of the investigation comprise measurement and calculation of the overall heat transfer coefficients in the heating section and the regenerative section. Further the regenerative effect by varying the flow, heat loss from the heating

section and the pressure drops in the different sections of the heat exchanger were investigated. The temperature distribution along two plates, one at the inlet and one at the outlet of the heating section, was also investigated as well as the temperature-difference through the plates between the points of measurement.

The average overall heat transfer coefficient in the heating section was found to be  $1958 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$  by flow of 1000 liters of milk per hour and 6000 liters of hot water per hour. By 2000 and 3000 liters of milk per hour the coefficients were found to be respectively 2840 and  $3278 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$ . In the regenerative section the overall heat transfer coefficients were respectively 1513, 2653 and  $3439 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$  when heating with hot water. When heating with vacuum steam the transfer coefficients were respectively 1520, 2676 and  $3459 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$ .

The regenerative effect in the plate heat exchanger was found to be 78,6 and 73,5 per cent at a flow of milk respectively 1000 and 3000 liters per hour and when heating with hot water. When heating with vacuum steam the regenerative effect was respectively 78,5 and 73,5 per cent.

The calculation of the heat loss from the heating section was based on the difference between the external surface temperature and the ambient air temperature. The results showed almost the same when the flow was varied. The heat loss calculation based on the difference between supplied and received amount of heat, showed on the other hand relatively high deviation in the results.

The pressure drop was measured as the difference between the static pressure at the inlet and at the outlet of the regenerative section, the heating section and the holding section. The results showed considerable higher pressure drop at the outlet than at the inlet side of the regenerative section.

The temperature distribution along the plate no 2 at the inlet of the heating section showed distinct difference between heating with hot water and vacuum steam. When heating with hot water, the temperature distribution along the plate no 2 was almost linear when the flow of milk was varied. When heating with vacuum steam the results showed no increase in the temperature on the lower half of the plate. However on the upper half

of the plate there was a high increase of the temperature. The temperature distribution along the plate no 14 at the outlet of the heating section showed approximately the same results either when heating with hot water or vacuum steam.

The temperature difference between the points of measurement was measured at the same spots as the temperature distribution on the plate no 2 and 14. When heating with hot water and flow of 2000 liters of milk per hour the temperature difference was 2,6 times greater at the top of the plate than at the bottom. The corresponding proportion was measured to 7,2 times when heating with vacuum steam.

LITTERATUR.

1. ALFA-LAVAL, U-2230-10S4, 11/68: Bruksanvisning och reservdelslistor för plattvärmväxlare, typ P5-EB,-RB.
2. ALFA-LAVAL, U-2250-5S2, 01/66: Bruksanvisning och reservdelslistor för temperaturregulator, typ TC-1.
3. ALFA-LAVAL, U-2250-2E: Instruction för temperature regulator, type TC-1.
4. ALFA-LAVAL, U-2245-1S3, 11/68: Bruksanvisning och reservdelslistor för ångregleringsventil, typ SRV-5.
5. ANONYM, 1956: Die Bedeutung der Wärmedurchgangszahl "k". Die Molkereizeitung, Hildesheim, 10 (1): 5 und 13: 379-380.
6. BALCHEN, J. G., 1965: Reguleringssteknikk, bind 1. Tapirs forlag, 1-256.
7. BENDER, W., 1955: Betrachtungen über Wärmedurchgangszahlen und Druchverluste bei Plattenerhitzern für Milch. Molkereizeitung, Hildesheim, 9 (51/52): 1619-1620.
8. CAFFYN, J. E., 1946: Control of H.T.S.T. Pasteurization. 1 - The Problem of Control. Dairy Industri, 11 (5): 327-330.
9. DICKERSON, R. W. jr., PARKER, R. W. and READ, R. B. jr., 1969: Thermometric lag of a high-temperature short-time recorder-controller. Journal of Dairy Science, 52 (4): 449-455.
10. DØVLE, H., FRAMHUS, O. og SAUGE, P. 1958: Prøve av kontrollpanel for pasteuriseringsapparater. Meld. fra Meieriinst. Norges landbrukshøgskole, nr. 69.
11. DØVLE, H., FRAMHUS, O. og SAUGE, P., 1959: Prøving av kontrollpanel for pasteuriseringsapparater. Meld. fra Meieriinst. Norges landbrukshøgskole, nr. 82.
12. DØVLE, H. og SAUGE, P., 1960: Prøving av Tuchenhagen kontrollpanel for pasteuriseringsapparater. Meld. fra Meieriinst. Norges landbrukshøgskole, nr. 93.
13. ELGERD, O. I., 1967: Control Systems Theory. McGraw-Hill Book Company, 1-553.
14. FRAMHUS, O., 1952: Thermal economy of the plate heat exchangers. Proceedings, XIII th International Dairy Congress, The Hague.
15. GLØSEL, A., 1937: Studien über die wirkung eines Plattenapparates. XI Milzhirtschaftlicher Weltkongress Berlin.
16. GOODMAN, H. F. and HOTCHEN, C. W., 1946: II.-A new mercury-in-steel thermometer. Dairy Industries, 11 (5): 331-343.
17. HALL, J. A., 1945: Temperature Controll in the H.T.S.T. Pasteurization Process. J. Dairy Research, 14 (1 and 2): 1-20.

18. HALL, J. A., 1946: Sensitivity and Response in the Temperature Measurement. Dairy Industr., 11 (6): 408-416.
19. HASSAN, S. A., HALL, C. W. and TROUT, G. M., 1962: Heat Transfer Analyse of a Heat Exchanger Plate Pakist. J. Sci. Industr. Res., 5 (4): 219-221.
20. McKILLOP, A. A. and DUNKLEY, W. L., 1960: Plate Heat Exchanger: Heat Transfer. Ind. Eng. Chem., 52 (9): 740-744.
21. MO, O. 1966: Undersøkelse av varmetekniske forhold og trykk-tap i platepasteuren ved varierende gjennomstrømning. Hovedoppgave ved Meieriinst., avd. for meierimaskiner, ved Norges landbrukshøgskole.
22. PLANK, R. 1959: Handbuch der Kältetechnik, dritter Band, 98-493.
23. PLOCK, K. und WÄLZHOLTZ, C., 1951: Die technischen Voraussetzungen für den Betrieb von Milcherhitzern. Gross - Statische Milchversorgung, 10: 23-61.
24. SAUGE, P., 1958: Registrering av temperaturforløpet ved pasteurisering. Meieriposten, 46: 899-902.
25. SAUGE, P., 1959: Prøving av termograf. Meld. fra Meieriinst. Norges landbrukshøgskole, nr. 87.
26. SOLHEIM, O. A., 1966: Instrumenteringsteknikk. Tapirs forlag, 1-316.
27. STEIGHART, F., 1947: Measurements of the Rate of Change of Temperature in High Temperature - Short Time Pasteurization Plant. - J. Dairy Res. 15, 18-23.
28. TROUPE, R. A., MORGAN, J. C. and PRIFTI, J., 1960: The plate heater - versatile chemical engineering tool. Chemical engineering progress, 56 (1): 124-128.
29. WATSON, E. L., McKILLOP, A. A., DUNKLEY, W. L. and PERRY, R. L., 1960: Plate Heat Exchangers. Flow Characteristics. Ind. Eng. Chem., 52 (9): 733-740.
30. WÄLZHOLZ, C., 1954: Richtlinien für Schaltung, Montage und Betrieb von Erhitzungseinrichtungen. Milchwirtschaftliche Forschungsberichte, 4 (1 und 2): 151-168.
31. WÄLZHOLZ, C., 1954: Wärme- und strömungstechnische Probleme der Milchpasteurisierung. Molkereizeitung, Hildesheim, 8 (17): 499-504.
32. WÄLZHOLZ, C., LEMBKE, A., SEELEMANN, M. und SCHULZ, M. E., 1956: Plattenhocherhitzer "Hecht 150" der Firma Fritz Hecht und Tødt GmbH., Kiel. Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte, 8: 523-547.