

Ref.nr. : 89-381
Dossiernr. : 8725-21688
Datum : februari 1990
NP

Titel
ENERGIEBESPARING MET DE FREQUENTIAREGELAAR
BIJ KOELCOMPRESSOREN

Auteur(s):
A.D. Koppenol

Trefwoord(en):
- energiebesparing
- frequentieregelaar

Bestemd voor:
NOVEM B.V.
ref. 31360/2040
t.a.v. Ir. W. van Zanten
Postbus 17
6130 AA Sittard

SAMENVATTING

Door de afdeling Warmte- en Koudetechniek van TNO is in opdracht van NOVEM B.V. een meetprogramma uitgevoerd betreffende de elektriciteitsbesparing bij capaciteitsregeling van een industriële koelcompressor door middel van toerenvariatie met een frequentieregelaar.

P.I.V. Eldutronik te Bladel, een fabrikant van frequentieregelaars, werd bereid gevonden een frequentieregelaar ten behoeve van dit onderzoek ter beschikking te stellen.

Capaciteitsregeling door frequentieregeling levert energiebesparing ten opzichte van de regeling door cilinderafschakeling. De klepverliezen nemen namelijk meer dan evenredig af bij verlaging van het toerental, terwijl bij cilinderafschakeling het wrijvingsverlies aanwezig blijft.

Het onderzoek is gericht op de invloed van toerentalvariatie op de koudefactor voor de koudemiddelen R12 en R22. De koudefactor is het quotiënt van de koelcapaciteit en het opgenomen vermogen.

Het onderzoek is uitgevoerd aan een testopstelling waarin is opgenomen een 4-cilinder zuiger-koelcompressor met een koelvermogen bij $-10^{\circ}\text{C}/30^{\circ}\text{C}$ van ca. 26 kW voor R12 en ca. 44 kW voor R22.

Bij R12 treedt een verhoging van de koudefactor op van ca. 9% bij halvering van het toerental van 1488 naar 744 door frequentieregeling. Bij R22 bedraagt deze verhoging van de koudefactor 0 - 6%. Bij grotere drukverhouding blijft voor R22 de koudefactor in de range van 700 - 1500 tpm ongeveer gelijk. Ten opzichte van cilinderafschakeling wordt bij 50% capaciteit een besparing gerealiseerd van 35% bij R12 en 23% bij R22 door toerentalverlaging.

Met R12 als koudemiddel ligt een economisch verantwoorde toepassing van de frequentieregelaar binnen bereik. Bij een kWh-prijs van f 0,15 bedraagt de terugverdientijd 4 - 7 jaar. Met R22 als koudemiddel is de terugverdientijd (8 à 16 j) nog niet aantrekkelijk.

89-381/R.25/GVL

3

Een alternatieve vorm van toerenregeling is de 2-toerenmotor. Deze is zowel voor R12 als voor R22 een goede investering. Bij een kWh-prijs van f 0,15 is de terugverdientijd voor alle beschouwde gevallen kleiner dan 4 jaar.

Opgemerkt dient dat dit onderzoek zich beperkt heeft tot de zuigercompressor.

	Pagina
89-381/R.25/GVL	4
INHOUDSOPGAVE	
SAMENVATTING	2
1. INLEIDING	5
2. CAPACITEITSREGELING VAN DE COMPRESSOR	6
2.1 Vermindering van het aantal werkzame cilinders	6
2.2 Toerentalverlaging	7
3. PROEFOPSTELLING	9
4. MEETPROGRAMMA	13
4.1 Meetcondities	13
4.2 Resultaten	13
5. KOSTEN/BATENANALYSE	17
5.1 Kosten	17
5.2 Baten	20
5.3 Terugverdiëntijd	21
5.4 Nevenvoordelen van de frequentieregelaar	22
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
7. LITERATUUR	27
8. VERANTWOORDING	28

Tabellen 1 t/m 4

Figuren 1 t/m 7

1. INLEIDING

De koelinstallatie is gedimensioneerd op de ontwerpkoudevraag. Veelal is de actuele koudevraag geringer dan de ontwerpkoudevraag en is capaciteitsregeling van de compressor noodzakelijk. Veel toegepaste regelingen van de compressorcapaciteit zijn:

- aan/uitregeling;
- vermindering van het aantal werkzame cilinders door bijvoorbeeld klep-lichting.

Een mogelijkheid van capaciteitsregeling die uit energetisch oogpunt de voorkeur verdient is verlaging van het toerental. Dit kan gerealiseerd worden door continue toerenregeling met een frequentieregelaar of door een poolomschakelbare elektromotor (2-toerenmotor). Het laatste is eerder onderzocht en weergegeven in ref. [3], "Demonstratie van energiebesparing met de poolomschakelbare elektromotor bij koelcompressoren".

Het doel van het onderzoek, dat in opdracht van NOVEM B.V. is uitgevoerd, is een meetprogramma betreffende de elektriciteitsbesparing van capaciteitsregeling van een industriële koelcompressor door toerentalverlaging door middel van een frequentieregelaar.

P.I.V. Eldutronik te Bladel, een fabrikant van frequentieregelaars, werd bereid gevonden een frequentieregelaar ten behoeve van dit onderzoek ter beschikking te stellen.

Het onderzoek is beperkt tot zuigerkoelcompressoren en is uitgevoerd met de koudemiddelen R12 en R22.

In hoofdstuk 2 worden de voordelen van capaciteitsregeling door toerentalverlaging besproken. In hoofdstuk 3 wordt de testopstelling besproken. In hoofdstuk 4 worden de meetresultaten gepresenteerd. In hoofdstuk 5 wordt een kosten/batenanalyse van de toepassing van de poolomschakelbare elektromotor besproken en tot slot worden in hoofdstuk 6 de conclusies weergegeven.

2. CAPACITEITSREGELING VAN DE COMPRESSOR

2.1 Vermindering van het aantal werkzame cilinders

Vermindering van het aantal werkzame cilinders kan gerealiseerd worden door zuigkleplichting, door een interne by-pass tussen de zuig- en de persuimte of door afsluiten van de zuiggastoevoer. Bij grotere compressoren is capaciteitsregeling door middel van zuigkleplichting of door toepassing van een interne by-pass zeer gebruikelijk. Beide manieren van capaciteitsregeling hebben een verlaging van de koudefactor tot gevolg. De koudefactor is het quotiënt van de koelcapaciteit en het opgenomen asvermogen. Voor het opgenomen vermogen P_e geldt namelijk de volgende relatie:

$$P_e = P_{th} + P_{kl} + P_f$$

waarin: P_{th} het benodigd vermogen om de aangezogen damp te comprimeren,

P_{kl} het klepverliesvermogen en

P_f het wrijvingsverliesvermogen in de compressor.

Als bij een zuigerkoelcompressor het aantal werkzame cilinders door zuigkleplichting wordt verminderd, zal bij uitgeschakelde cilinders in feite alleen het compressievermogen (= ongeveer theoretisch vermogen) geheel verdwijnen. Het wrijvingsvermogen van die cilinder blijft namelijk in volle omvang aanwezig omdat de zuigers heen en weer blijven bewegen, terwijl het "normale" klepverliesvermogen wordt vervangen door het pompvermogen dat nodig is om zuiggas via de vol geopende zuigkleppen aan te zuigen en uit te drijven. Daarom zal bij afname van het werkzame slagvolumedebiet het effectief opgenomen vermogen P_e in minder sterke mate afnemen.

In figuur 1 is het opgenomen vermogen weergegeven als functie van het slagvolume. Voor koudemiddel R12 neemt bij afname van het slagvolume van 50% het opgenomen vermogen met 34% af [1]. Als we de afname van het koelvermogen gelijkstellen aan die van het slagvolume dan bedraagt de afname van de koudefactor (het quotiënt van koelvermogen en opgenomen vermogen) 24% bij een verdampingstemperatuur (t_o) van $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een condensatietemperatuur (t_c) van $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij afname van het slagvolume tot 25% neemt voor R12 de koudefactor tot ca. 48% af. De afname van de

koudefactor bij toepassing van R22 en ammoniak is lager dan bij toepassing van R12; bij toepassing van R502 is deze afname juist groter dan bij R12 (zie figuur 1).

2.2 Toerentalverlaging

Het bij zuigercompressoren toepassen van capaciteitsregeling door toerentalreductie heeft als groot voordeel dat hierbij de koelcapaciteit nagenoeg evenredig met het toerental daalt (via het slagvolumedebiet bij constant volumetrisch rendement), terwijl het opgenomen vermogen P_e sterker dan evenredig afneemt. Het klepverliesvermogen verandert met de derde macht van het toerental zodat P_e meer dan evenredig met het toerental afneemt, zodat bij deellastbedrijf het compressorrendement groter wordt. Verdere voordelen zijn:

- er zijn geen speciale constructieve voorzieningen bij de compressor vereist;
- het toerental is gedurende het merendeel van de bedrijfstijd lager dan de ontwerpwaarde, zodat gerekend kan worden met een langere levensduur en gemiddeld genomen een lager geluidsniveau.

Wel dient vermeld te worden, dat onder andere in verband met de oliehuishouding een minimum toerental aangehouden moet worden. Dit bedraagt ca. 40 à 50% van het maximum toerental. De laatste tijd echter kan dit toerental bij een aantal open compressoren al teruggeregeld worden tot 20% van de maximum waarde. Bij open koelcompressoren steekt de aandrijf-as naar buiten en vormen compressor en aandrijfmotor twee volledig gescheiden componenten. Dit in tegenstelling tot het gesloten type, waarbij compressor en aandrijfmotor in één behuizing zijn ondergebracht.

De toename van de koudefactor bij toerentalverlaging bij gelijkblijvende verdampings- en condensatiedruk is voor de Grasso RC6 (koelvermogen 80-160 kW) weergegeven in figuur 2 [1]. In figuur 2 is af te lezen dat halvering van het toerental een verhoging van de koudefactor van ca. 14% betekent voor R12.

Capaciteitsregeling door toerentalverlaging met een frequentieregelaar is een continue regeling en biedt derhalve meer mogelijkheden dan een

poolomschakelbare elektromotor. Dit is een 2-standen regeling. Continue toerenregeling heeft de volgende voordelen boven de 2-toeren regeling:

- De geregelde grootte (zuigdruk, koelruimtetemperaturen) kan op constantere waarde geregeld worden.
- De te bereiken energiebesparing is groter, omdat het toerental continu op de momentane koudevraag aangepast wordt. Als bij een installatie met een 2-toeren motor bijvoorbeeld 4.000 uur op vollast gedraaid wordt en 2.000 uur op deellast kan met een continue toerenregeling continu op een stand gedraaid worden, die lager is dan vollast. Bij installaties met één compressor is het voordeel het grootst. Zie hiervoor figuur 3 [2].
- Bij toepassing van een frequentieregelaar kan het opgesteld compressorvermogen eventueel kleiner gekozen worden, omdat het toerental boven nominaal ingesteld kan worden. Alle compressoren kunnen in ieder geval op 60 Hz draaien.

Concluderend kan gesteld worden, dat het omlaag regelen van de compressorcapaciteit door toerentalvariatie aanmerkelijk gunstiger is dan door vermindering van het aantal werkzame cilinders. Het koudemiddel heeft hierbij ook duidelijk invloed.

3. PROEFOPSTELLING

De koelinstallatie waarmee het onderzoek is uitgevoerd is schematisch weergegeven in de figuur 4. Aan de installatie kunnen een 3-tal gesloten kringlopen worden onderscheiden:

- het primair koudemiddel circuit;
- het secundaire water/glycol circuit;
- het secundaire koelwater circuit.

Het betreft hier een ééntapscompressie koelsysteem met droge expansie, een watergekoelde condensor en een vloeistofkoeler als verdamper.

De werking van de installatie met betrekking tot de primaire kringloop is in hoofdlijnen als volgt:

in de verdamper(vloeistofkoeler) wordt door een elektronisch expansie ventiel zoveel koudemiddelvloeistof ingespoten dat alle koudemiddelvloeistof hierin verdampt ten gevolge van warmte-uitwisseling met het secundaire water/glycol circuit. Het water/glycol mengsel van het secundaire circuit koelt daardoor in de verdamper af. De aldus gevormde koudemiddeldamp verlaat met een constante instelbare oververhitting de verdamper. Deze damp wordt aangezogen door de compressor, waarin de druk in één compressietrap wordt verhoogd tot condensatiedruk.

De gecomprimeerde damp stroomt vervolgens door een olie-afscheider, waarin de damp ontdaan wordt van de oliedruppels, die tijdens het verblijf in de compressor door de damp zijn opgenomen. Daarna stroomt de koudemiddeldamp naar de condensor, waarin de damp condenseert tengevolge van de warmte-uitwisseling met het koelwater van het secundaire koelwatercircuit.

De aldus ontstane koudemiddelvloeistof vervolgt zijn weg naar het regelorgaan (expansieventiel), waar de vloeistof tengevolge van het drukverschil over dit orgaan expandeert tot het verdampingsdrukkniveau. Hiermede is het primaire kringproces gesloten.

De toegepaste compressor is een 4-cilinder open-compressor van het merk Worthington, type 2VXC4. Bij de open-compressor vormen compressor en aandrijfmotor twee volledig gescheiden componenten. Dit in tegenstelling tot het gesloten compressortype, waarin compressor en elektromotor in een gesloten behuizing zijn ondergebracht.

Door kleplichting van respectievelijk één of twee cilinders kan de capaciteitsregeling gerealiseerd worden van respectievelijk 75% en 50%. De toegepaste verdamper/koeler is een "shell and tube" warmtewisselaar van het fabrikaat Helpman. Het koudemiddel stroomt hierbij dóór de pijpen en het te koelen medium (het water/glycol mengsel) er rondom heen.

In de condensor (eveneens een "shell and tube" warmtewisselaar) is de situatie omgekeerd en wordt het koelwater dóór de pijpen gestuurd terwijl de koudemiddeldamp rondom de pijpen stroomt, op de pijpen condenseert en zich onderin de condensor verzamelt als vloeistof.

De installatie is voorzien van een aantal veiligheden om de juiste werking te waarborgen, te weten: een hoge- en een lage druk pressostaat, een olieverschildruk pressostaat en in het water/glycol circuit een ontlastklep met een openingsdruk van 3,5 bar.

Via het secundaire water/glycol-circuit wordt de gewenste verdampingstemperatuur gerealiseerd. Dit wordt bereikt door de verdamper een zekere hoeveelheid energie aan te bieden. Hierbij stelt zich een verdampingstemperatuur in waarbij de afgifte en opname van energie in de verdamper met elkaar in balans zijn. Om de hoeveelheid energie te kunnen toevoeren is in dit secundaire circuit een elektrische boiler opgenomen.

Dit secundaire circuit is gevuld met een mengsel van water/glycol vanwege de vriespuntsverlagende werking van glycol om daarmee te voorkomen dat de verdamper bij lage verdampingstemperaturen dichtvriest. Voor het verpompen van het water/glycol mengsel is een direkt gekoppelde semihermetische centrifugaalpomp met elektromotor aangebracht.

Een beveiliging op het circuleren van de vloeistof is verkregen door een mechanische flowswitch in het circuit op te nemen.

Daarnaast wordt dit circuit tegen te hoge temperaturen beveiligd door een thermostaat.

Het secundaire koelwatercircuit regelt op analoge wijze, als beschreven voor het water/glycol-circuit, de condensatietemperatuur. In dit circuit zijn opgenomen naast de condensor, een koeltoren, een circulatiepomp en een waterregelventiel. De koeltoren dient voor het afvoeren van de warmte die in de condensor is opgenomen. Het waterregelventiel regelt elektronisch de waterhoeveelheid naar de condensor. Het waterdebiet wordt

dusdanig geregeld, met een druksensor op de condensor, dat de condensatiedruk constant blijft.

Tabel 1 geeft een gespecificeerd overzicht van de toegepaste componenten en instrumenten.

Alle meet-sensoren eventueel via hun specifieke verwerkingsapparatuur hebben een analoog uitgangssignaal, waarvan gebruik is gemaakt om deze signalen te bemonsteren via een HP 3497 data-acquisitie-unit en de signalen on-line op een HP-900 computer te verwerken tot hanteerbare fysische grootheden.

Elke 20 seconden worden een 20-tal kanalen bemonsterd. De 20 kanalen worden gevormd door 12 thermokoppels voor temperatuurmeting, 3 flowmetingen, 2 drukmetingen, en 3 energieverbruiksmetingen.

Na elke scan wordt de warmtebalans van de installatie doorgerekend en zo mogelijk die van de afzonderlijke componenten, zoals verdamper, condensor en voor het secundaire circuit van de verdamper. Na het instellen van de gewenste verdampingstemperatuur, geëffectueerd door het variëren van de belasting van de elektrische boiler, wordt gewacht tot een stationaire situatie is bereikt.

Het bereiken van een stationaire situatie is beoordeeld door een aantal karakteristieke temperaturen te plotten op een beeldschermterminal van de aangesloten computer.

Vanaf het bereiken van de stationaire situatie zijn de meetdata opgeslagen op een disc van de computer, om na verloop van een meetperiode van circa 1 uur, de gemeten grootheden te middelen over de beschouwde periode en met behulp van deze gemiddelde grootheden een 'overall' warmtebalans op te stellen geldend voor die betreffende verdampings- en condensatietemperatuur. Elke grootheid per conditie is dus gebaseerd op een verzameling van circa 180 afzonderlijke metingen, namelijk 1 scan per 20 seconden gedurende circa 1 uur.

De bepaling van de diverse capaciteiten van deze installatie is geschied door het opstellen van warmtebalansen.

Warmtebalansen zijn opgesteld voor (zie figuur 4):

- het primaire koudemiddelcircuit;
- de verdamper;
- de condensor;
- het secundaire water/glycol circuit.

De koelcapaciteit kan volgens 3 methoden worden bepaald:

- koudemiddelzijdig;
- water/glycol zijdig;
- volgens het opgenomen elektrisch vermogen van de boiler van het secundaire circuit van de verdamper.

De 3 koelcapaciteiten zijn met elkaar vergeleken om na te gaan waar eventuele verliesposten en/of meetfouten zich voordoen.

Het effectieve asvermogen is niet rechtstreeks bepaald. Wel direct bepaald is het opgenomen vermogen van de frequentieregelaar. De in hoofdstuk 4 weer te geven koudefactor heeft betrekking op het opgenomen vermogen van de frequentieregelaar

De koudefactor, gedefinieerd als het quotiënt van de koelcapaciteit en het opgenomen vermogen van de frequentieregelaar, geeft uitsluitsel over het energieverbruik.

In de koudefactor is dan tevens het elektromotorrendement en het rendement van de frequentieregelaar opgenomen.

De instelling van de frequentieregelaar is uitgevoerd door Eldutronic. De Volt-Hertz curve is ingesteld op het punt 380 V, 50 Hz en loopt lineair naar 0 V, 0 Hz.

89-381/R.25/GVL

13

4. MEETPROGRAMMA

4.1 Meetcondities

Het meetprogramma is uitgevoerd met de koudemiddelen R12 en R22 bij de volgende verdampingstemperaturen:

koudemiddel	R12	R22
verdampingstemperatuur	-2 °C, -9 °C	-9 °C, -20 °C

Metingen met R22 zijn bij lagere verdampingstemperatuur uitgevoerd omdat R22 bij lagere verdampingstemperatuur toegepast wordt. De condensatietemperatuur bedraagt in alle gevallen 30 °C. Voor alle bovenstaande situaties is de koudefactor bepaald bij de volgende toerentallen: 744, 1166, 1488 en 1786 toeren per minuut (tpm). De ingestelde frequenties zijn hierbij respectievelijk 25, 37,5, 50 en 60 Hz. Het normale toerental (bij 50 Hz) bedraagt 1488 tpm. De koelcapaciteit wordt ten opzichte van deze normale waarde gevarieerd van 50 tot 120%.

4.2 Resultaten

De resultaten zijn weergegeven in de tabellen 2 en 3. Elke kolom in deze tabel staat voor een gemeten conditie van verdampingstemperatuur en condensatietemperatuur. De bovenste groep data, namelijk de netto koelcapaciteit, het opgenomen elektrisch vermogen door de frequentieregelaar en de bijbehorende koudefactor, kan gekarakteriseerd worden als een samenvatting van de uiteindelijke resultaten.

Het onderste blok gegevens bevat de elementen van de warmtebalansen van het secundaire water/glycol-circuit, de verdamper, het primaire koudemiddel-circuit en de condensor. Uit de tabellen valt op te maken dat er een afwijking bestaat tussen de koudemiddelzijdig bepaalde koelcapaciteit en de water/glycolzijdig bepaalde koelcapaciteit. De koudemiddelzijdig bepaalde koelcapaciteit is 1 à 10% groter dan de water/glycol-

zijdig bepaalde koelcapaciteit. Nadere analyse toonde aan dat de afwijking veroorzaakt werd door de turbineflowmeting van het koudemiddel-debiet. Deze analyse omvatte tevens een controle van het water/glycol-debiet en -temperatuurverschil, die correct bleken te zijn.

Bij de verdere analyse is de water/glycolzijdig bepaalde koelcapaciteit aangehouden. Dit is overigens conform voorgaande meetprogramma's [3].

In de figuur 5 zijn de koudefactor en de koelcapaciteit weergegeven als functie van het toerental.

Uit figuur 5 is het volgende af te leiden:

- Bij R12 treedt een verhoging op van de koudefactor (c.o.p.) van ca. 9% bij halvering van het toerental van 1488 naar 744 tpm. Toerentalvermindering van 1786 naar 744 tpm levert een verhoging van de koudefactor van ca. 15%.
- Bij R22 bedraagt de verhoging van de koudefactor bij halvering van het toerental 0 - 5,7%. Bij grotere drukverhouding blijft voor R22 de koudefactor in de range van 700 - 1500 tpm ongeveer gelijk.
- De koudefactor voor R22 is bij $t_o = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ca. 10% hoger dan voor R12.

Teneinde een vergelijking te kunnen maken tussen capaciteitsregeling door respectievelijk kleplichting, de 2-toerenmotor en de frequentieregelaar zijn in onderstaand overzicht voor R12 procentuele veranderingen van de koudefactor bij 50% deellast ten opzichte van de koudefactor bij normaal vollastbedrijf weergegeven. Normaal vollastbedrijf is met een standaard-elektromotor ($n = 1488\text{ tpm}$) zonder kleplichting. De aangehouden condities hierbij zijn een verdampingstemperatuur $t_o = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een condensatietemperatuur $t_c = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. De gegevens zijn deels ontleend aan [3], zie figuur 6.

koudefactor ten opzichte van vollast

normaal vollast	-
kleplichting 50%	-29%
halftoeren met 2 toerenmotor	+11%
halftoeren met frequentieregelaar	+ 9%

Er is bij halvering van het toerental slechts een gering verschil (2%) tussen de regeling met de 2-toerenmotor en de frequentieregelaar. Dit

verschil wordt veroorzaakt door het verschil in elektromotorrendement. Ook het rendement van de frequentieregelaar speelt hierbij een rol.

Behalve de zojuist weergegeven vergelijking voor R12 is dezelfde vergelijking ook voor R22 weergegeven (eveneens bij een verdampingstemperatuur van -9°C).

koudefactor ten opzichte van vollast

normaal vollast	-
kleplichting 50%	-17%
halftoeren met 2-toerenmotor	+ 8% (schatting op basis R12)
halftoeren met frequentieregelaar	+ 6% (tabel 3)

De 2 eerstgenoemde percentages zijn niet gemeten. Het eerste is ontleend aan fabrieksspecificaties [1].

Verder is er van uitgegaan dat er evenals bij R12 slechts een gering verschil in rendement van de compressoraandrijving bestaat tussen toepassing van de 2-toerenmotor en de frequentieregelaar. Het opgenomen vermogen is met R22 weliswaar groter dan bij R12, echter de rendementskarakteristiek van de elektromotor is vlak, zodat de procentuele verschillen bij R22 nagenoeg gelijk zullen zijn aan die bij R12. Het rendement van de aandrijving is (zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven) tevens in de koudefactor opgenomen, zodat ook hierin een klein verschil naar voren komt.

In onderstaand overzicht wordt op basis van de hierboven weergegeven veranderingen in de koudefactor de besparing bij deellast door toerenregeling met de 2-toerenmotor en de frequentieregelaar ten opzichte van cilinderafschakeling gegeven.

regelstrategie	besparing t.o.v. cilinderafschakeling	
	R12	R22
50% 2-toeren	36%	23%
50% frequentieregeling	35%	22%
75% frequentieregeling	16%	10%

Met R12 als koudemiddel bedraagt ten opzichte van cilinderafschakeling de besparing door toerenregeling bij 50% koelcapaciteit ca. 35%. Deze situatie is te realiseren met zowel de 2-toerenmotor als met de frequentieregelaar. Op het geringe verschil tussen deze twee is hierboven reeds ingegaan. De frequentieregelaar is in tegenstelling tot de 2-toerenmotor een continue toerenregeling. Daarom is de regelstrategie 75% opgenomen. Deze regelstrategie is wel mogelijk met de frequentieregelaar en niet met de 2-toerenmotor.

Ten opzichte van cilinderafschakeling bedraagt met R12 de besparing 16%. Met R22 als koudemiddel bedraagt de besparing door toerenregeling (ten opzichte van cilinderafschakeling) ca. 22% bij 50% koelcapaciteit. Bij 75% bedraagt de besparing 10%.

Het koelvermogen bij bepaalde condities voor R22 is, zoals uit figuur 5 ook blijkt, aanmerkelijk groter dan voor R12. Zie hiervoor de vermogens bij een verdampingstemperatuur van -9°C , die voor R22 ca. 65% groter zijn dan voor R12.

Concluderend kan gesteld worden dat:

- Toerentalverlaging van 1488 naar 744 tpm met de 2 toerenmotor leidt tot een verhoging van de koudefactor van ca. 11% bij R12 en ca. 8% bij R22.
- Toerentalverlaging van 1488 naar 744 tpm met de frequentieregelaar leidt tot verhoging van de koudefactor van ca. 9% bij R12 en ca. 6% bij R22.
- Ten opzichte van cilinderafschakeling wordt bij capaciteitsregeling door toerentalverlaging een besparing gerealiseerd van ca. 35% bij R12 en ca. 23% bij R22. Deze getallen gelden voor 50% deellast.

5. KOSTEN/BATEN ANALYSE

Bij deze analyse zullen 3 capaciteitsregelsystemen beschouwd worden:

- capaciteitsregeling door cilinderafschakeling (referentie);
- capaciteitsregeling door toerenregeling met een 2-toerenmotor;
- capaciteitsregeling door toerenregeling met een frequentieregelaar.

Buiten beschouwing worden hier gelaten:

- de aan-uitregeling van de compressor;
- opdeling van de koelcapaciteit over meerdere compressoren.

5.1 Kosten

Voor de capaciteitsregelsystemen: cilinderafschakeling, 2-toerenmotor en de frequentieregelaar wordt een overzicht gegeven van de voor het regelsysteem benodigde kosten. Hierbij is uitgegaan van de brutoprijzen van voor Nederland gangbare compressoren: Eén in het gebied van ca. 30 kW koelvermogen en één in het gebied van ca. 100 kW.

Bij een systeem met capaciteitsregeling door cilinderafschakeling is, behalve dit afschakelsysteem, ook een systeem voor onbelaste aanloop, bestaande uit een magneetklep + terugslagklep, aanwezig. Om hoge aanloopstromen te beperken is een ster-driehoekschakeling opgenomen. Bij toepassing van een 2-toerenmotor wordt ervan uitgegaan dat de capaciteitsregeling door cilinderafschakeling gehandhaafd blijft. Als alleen de 2-toerenmotor gebruikt wordt voor capaciteitsregeling zijn namelijk slechts 2 stappen aanwezig: 50% en 100%. Bij cilinderafschakeling zijn veelal meer stappen aanwezig; bij een 6-cilinder compressor bijvoorbeeld 33%, 66% en 100%. Als de 2-stappenregeling echter acceptabel geacht wordt, kan ook bij de 2-toerenmotor de minderprijs voor cilinderafschakeling in rekening gebracht worden.

Bij de kostenbepaling voor het capaciteitsregelsysteem met de frequentieregelaar (continue regeling van 50% tot 120%) wordt ervan uitgegaan dat de capaciteitsregeling door cilinderafschakeling, de onbelaste aanloop en de ster-driehoekschakeling niet nodig zijn. Bovendien kan de compressor 20% kleiner gekozen worden omdat met de compressor tot 120% gedraaid kan worden (1800 in plaats van 1500 tpm). Hieronder zijn kos-

89-381/R.25/GVL

18

tenoverzichten weergegeven voor een koelvermogen van 30 kW en 100 kW bij een verdampingstemperatuur van -10°C en een condensatietemperatuur van 30°C . Het nominaal vermogen van de elektromotor bedraagt respectievelijk 15 kW en 50 kW. Onderscheid wordt hierbij gemaakt tussen R12 en R22, omdat voor een bepaalde compressor de capaciteit bij R22 ca. 65% groter is dan bij R12, hetgeen van invloed is op de minderprijs van de compressor.

Benadrukt wordt dat uitgegaan wordt van een nieuwbouwsysteem en dat de besturing van de regelaar buiten beschouwing gelaten is.

Overzicht kosten ($Q_0 \approx 30 \text{ kW}$) brutoprijzen exclusief BTW.

cilinderafschakeling	f 1.480,--
onbelaste aanloop	" 1.080,--
ster-driehoekschakeling	" 300,--
compressorprijs per kW	" 130,--/kW voor R22 (zie figuur 7)
	" 216,--/kW voor R12 (zie figuur 7)
standaardmotor 15 kW	" 1.150,--
2-toerenmotor 15 kW	" 2.300,--
frequentieregelaar 15 kW	" 9.975,--

Uit dit kostprijsoverzicht voor diverse componenten kunnen de volgende meerprijzen afgeleid worden:

2-toerenmotor	f 1.150,--
frequentieregelaar voor R12	" 6.035,--
frequentieregelaar voor R22	" 6.465,--

Ter illustratie wordt de meerprijs van de frequentieregelaar voor R22 bepaald:

frequentieregelaar	+ f 9.975,--
af:	- " 1.480,-- (cilinderafschakeling)
	- " 1.080,-- (onbelaste aanloop)
	- " 300,-- (ster-driehoekschakeling)
	- " 650,-- (kleinere compressor R22)
	+ f 6.465,--

Overzicht kosten ($Q_0 \approx 100$ kW) brutoprijzen exclusief BTW.

cilinderafschakeling	f 1.100,--
compressorprijs per kW	" 134,--/kW (R12) (zie figuur 7)
	" 83,--/kW (R22)
standaardmotor 50 kW	" 3.980,--
2-toerenmotor 34/50 kW	" 7.460,--
frequentieregelaar 50 kW	" 21.000,--

De volgende meerprijzen kunnen uit dit overzicht afgeleid worden:

2-toerenmotor	f 3.480,--
frequentieregelaar voor R12	" 17.622,--
frequentieregelaar voor R22	" 18.489,--

Uit bovenstaande overzichten blijkt dat de meerinvestering per kW bij toenemend vermogen afneemt. Bij een 15 kW frequentieregelaar bedraagt de meerinvestering f 402-431 per kW en bij 50 kW f 352-370 per kW.

Bij de 2-toerenmotor is ervan uitgegaan dat cilinderafschakeling gehandhaafd blijft. Als alléén 2-toerenregeling acceptabel geacht wordt kan ook de minderprijs voor het niet toepassen van cilinderafschakeling in rekening gebracht worden. De meerprijs voor de 2-toerenmotor is dan -f330,- voor $Q_0 = 30$ kW en f 2380,- voor $Q_0 = 80$ kW.

5.2 Baten

De baten bij toepassing van toerenregeling bij zuigerkoelcompressoren bestaan uit de besparing op elektriciteitskosten door de hogere koudefactor van de koelinstallatie. Nevenvoordelen leveren additionele baten die hier verder niet meegenomen zijn (zie § 5.1).

Referentie bij de bepaling van de besparing is een gekoeld opslagsysteem waarvan met cilinderafschakeling voor situaties A en B respectievelijk 1500 uren en 3000 uren op deellast (50%) gedraaid wordt. De verdampings-temperatuur wordt gesteld op $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en de condensatietemperatuur op $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, zowel voor R12 als voor R22. Dit is tevens de conditie die voor beide koudemiddelen onderzocht is.

Met de 2-toerenmotor hebben we dezelfde bedrijfsvoering als bij cilinderafschakeling. Met de continue toerenregeling met de frequentieregelaar wordt gesteld dat vanwege de uitgebreider regelmogelijkheid veel meer op deellast gedraaid kan worden. Toepassing van de frequentieregelaar bij industriële koeling is nieuw. Voor optimale inzet van de frequentieregelaar is een goede regelstrategie noodzakelijk. Deze strategie is niet beschikbaar en het opstellen van een handleiding voor de optimale regelstrategie wordt aanbevolen.

Benaderend is dit meer op deellast draaien weergegeven door 500 uren vollastbedrijf (voor bijvoorbeeld inkoelen) en de overige uren op 50% capaciteit. Om de invloed van het aantal vollasturen te bepalen is dit aantal gevarieerd. Ook de situatie met 1000 vollasturen is beschouwd. Het aantal deellasturen is telkens zodanig bepaald dat het totaal aantal vollasturen op jaarbasis 3500 bedraagt. Hierbij is er van uitgegaan dat met betrekking tot de koudeproductie één vollastuur gelijk is aan 2 uren op 50% deellast.

Op basis van de resultaten uit hoofdstuk 4 zijn de volgende koudefactoren aangehouden:

Overzicht koudefactoren (-10°C, 30°C)

	R12	R22
vollast	2,9	3,1
50%-deellast cilinderafschakeling	2,06	2,48
2-toerenmotor	3,20	3,28
frequentieregelaar	3,16	3,22

Verder is een kWh-prijs van f 0,15 aangehouden. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in tabel 4. De besparing door toepassing van de frequentieregelaar is groter dan met de 2-toerenmotor. Voor de gekozen situaties varieert de besparing bij R12 van ca. 13 tot 20% voor de frequentieregelaar en van ca. 10 - 18% voor de 2-toerenmotor. De invloed van de variatie van het aantal vollasturen bij toepassing van de frequentieregelaar is gering. De besparing met de frequentieregelaar is 3 - 5% groter dan met de 2-toerenmotor voor R12 als koudemiddel. Voor R12 bedraagt de elektriciteitskostenbesparing door toepassing van de frequentieregelaar ca. f 900,-- tot f 1300,-- per jaar en voor R22 ca. f 400,-- tot ca. f 700,-- per jaar bij een koelvermogen van 30 kW. Bij 100 kW zijn de besparingen 3,33 x zo groot. De baten zijn bij R12 aanmerkelijk groter dan bij R22 omdat de koudefactorafname bij cilinderafschakeling groter is.

5.3 Terugverdientijd

De terugverdientijd is de meerinvestering gedeeld door de jaarlijkse besparing. Deze terugverdientijd voor nieuwbouwinstallaties is weergegeven in tabel 4 en bedraagt voor toepassing van de frequentieregelaar voor R12 globaal 4 à 7 jaar en voor R22 globaal 8 à 16 jaar. De terugverdientijd voor de 2-toerenmotor is duidelijk kleiner dan voor de frequentieregelaar, namelijk 1 à 2 jaar voor R12 en 2 à 4 jaar voor R22. Bij bepaling van de terugverdientijd is een kWh-prijs van f 0,15 aangehouden. Bij een kWh-prijs van f 0,10 worden alle in tabel 4 genoemde terugverdientijden 1,5 x zo groot.

Bij toenemend koelvermogen neemt de terugverdientijd van de frequentieregelaar iets af. Dit geldt ook voor de 2-toerenmotor.

De hiervoor gehanteerde prijzen zijn brutoprijzen bij afname van 1 stuks. Wanneer uitgegaan wordt van een samenwerking tussen de leverancier van het koelsysteem en de leverancier van de frequentieregelaar kan op twee manieren bespaard worden:

- prijsreductie door grotere aantallen;
- vereenvoudiging van de universele regelaar specifiek voor deze applicatie.

Tengevolge hiervan worden door de frequentieregelaarleverancier de volgende prijzen geschat.

vermogen 15 kW	f 490,-/kW bij 50 st./jaar
vermogen 45 kW	f 320,-/kW bij 10 st./jaar

Uitgaande van deze prijzen bedraagt de terugverdientijd van de frequentieregelaar voor R12 globaal 2,5 à 5 jaar en voor R22 globaal 5 à 10 jaar.

Concluderend kan gesteld worden dat op basis van een terugverdientijd van 4 jaar of minder de poolomschakelbare elektromotor een economisch aantrekkelijke investering is voor R12 en R22 en een kWh-prijs van f 0,15. Met R12 als koudemiddel ligt economisch verantwoorde toepassing van de frequentieregelaar binnen bereik, als uitgegaan wordt van een redelijke omzet en uitvoering van de frequentieregelaar gericht op de koelinstallatie.

De meerinvestering van de frequentieregelaar bij R22 wordt echter nog niet terugverdiend uit de bespaarde energiekosten. Of de frequentieregelaar een economisch verantwoorde investering is, hangt af van de overige "nevenvoordelen" van de frequentieregelaar.

5.4 Nevenvoordelen van de frequentieregelaar

Bijna alle machines bij industriële toepassingen met een aandrijfvermogen van ca. 0,5 kW tot enkele honderden kW's worden aangedreven door elektromotoren. In veel gevallen is het goedkoper met een toerengeregelde aandrijving te werken met als doel:

- procesregeling;
- automatisering van het (produktie)proces;
- kwaliteitsverbetering van het eindprodukt;
- energiebesparing.

In de afgelopen jaren is er een sterke ontwikkeling geweest in de uitvoering van de frequentieregelaar, waardoor de toepassing van de frequentieregelaar steeds aantrekkelijker is geworden. Als belangrijke ontwikkelingen kunnen genoemd worden:

- Een sterke afname van de prijs;
- Een sterke afname van de afmetingen;
- Geen eisen aan omgeving met betrekking tot stof;
- Verbetering rendement (ca. 98%) en bedrijfszekerheid.

De toepassingsmogelijkheden en ook de economie van de frequentieregelaar (prijs, rendement) zijn duidelijk verbeterd en ook binnen de industriële koeltechniek is de introductie van de frequentieregelaar te verwachten. Behalve de energiebesparingsmogelijkheden zoals kwantitatief aangegeven in hoofdstuk 4 heeft de frequentieregelaar nog meer voordelen, die nu nog niet kwantificeerbaar zijn. Hieronder wordt kwalitatief ingegaan op een aantal nevenvoordelen van de frequentieregelaar ten opzichte van de 2 toerenmotor.

- De geregelde grootte (zuigdruk, koelruimtetemperatuur) kan op constantere waarde geregeld worden. De ontvochtiging van het produkt wordt beïnvloed door de verdampingstemperatuur en de bedrijfstijd. De verdampingstemperatuur bij toepassing van de frequentieregelaar zal hoger komen te liggen, echter de bedrijfstijd neemt toe. Het netto effect op de ontvochtiging is niet bekend. De ontvochtiging van het produkt kan mogelijk afnemen of toenemen.
- Bij optimale regeling is de compressor veel meer continu in bedrijf, waardoor de in- en uitschakelverliezen afnemen. Dit betekent tevens minder slijtage.

- Door het meer continu in bedrijf zijn bij lager koelvermogen zijn de temperatuurverschillen bij de verdamper en de condensor kleiner [2]. De koudefactor neemt (additioneel op hetgeen in § 5.2 besproken is) hierdoor toe.
 - Bij roterende compressoren is de range in toerentalvariatie groter dan bij zuigercompressoren (vanwege de mogelijkheid van hogere rotatiefrequenties en de afwezigheid van kleppen). De frequentieregelaar is bij uitstek geschikt voor toerenregeling over een groot gebied. Bij schroefcompressoren levert capaciteitsregeling door een interne by-pass een drastische afname van het rendement bij deellast. Toerenregeling is hierbij aanmerkelijk gunstiger [4].
- De situatie ten aanzien van frequentieregeling in de koeltechniek kan als volgt worden samengevat: de toepassing van frequentieregeling geeft in potentie de grootste energiebesparing; de techniek verdient zich echter nog niet terug uit uitsluitend de energiekostenbesparing, terwijl de economische waarde van de mogelijke nevenvoordelen niet kwantificeerbaar zijn.
- Verdere introductie van frequentieregeling in de koeltechniek wordt daarom ondersteund door studies c.q. demonstraties waarbij de nevenvoordelen aangetoond en gekwantificeerd worden.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- Toerentalverlaging met de frequentieregelaar van 1488 naar 744 tpm leidt tot verhoging van de koudefactor van de koelinstallatie van ca. 9% bij R12 en ca. 6% bij R22.
- Ten opzichte van cilinderafschakeling wordt bij 50%-capaciteit door toerentalverlaging een energiebesparing gerealiseerd van 35% bij R12 en 23% bij R22.
- De te bereiken besparingen met de frequentieregelaar zijn groter dan die met de 2-toerenmotor. Voor de gekozen situaties bedraagt voor R12 het verschil 3 - 5%.
- De 2-toerenmotor is in alle gevallen een verantwoorde investering (terugverdientijd < 4 jaar).

Op basis van de bespaarde energiekosten bedraagt de terugverdientijd van de frequentieregelaar (huidige stuksprijs, kWh prijs f 0,15) 4 - 7 jaren voor R12 en 8 à 16 jaren voor R22. Door prijsreductie tengevolge van grotere aantallen en vereenvoudiging van de universele regelaar speciaal voor deze applicatie kan deze terugverdientijd omlaag gebracht worden tot 2,5 à 5 jaren voor R12 en 5 à 10 jaren voor R22. Economische verantwoorde toepassing van de frequentieregelaar ligt dan binnen bereik.
- Belangrijke nevenvoordelen van de frequentieregelaar zijn:
 - betere procesbeheersing waardoor mogelijk minder ontvochtiging en minder slijtage;
 - extra energiebesparing door afname van het temperatuurverschil bij verdamper en condensor en door afname van in- en uitschakelverliezen;
 - voordelen bij roterende compressoren.

- De toepassing van frequentieregeling geeft in potentie de grootste energiebesparing; de techniek verdient zicht echter nog niet terug uit uitsluitend de energiekostenbesparing terwijl de economische waarde van de mogelijke nevenvoordelen niet kwantificeerbaar zijn.
Verdere introductie van frequentieregeling in de koeltechniek wordt daarom ondersteund door studies c.q. demonstraties waarbij de nevenvoordelen aangetoond en gekwantificeerd worden.
- De frequentieregelaar wordt nog niet toegepast bij industriële koelinstallaties. Bij introductie van de frequentieregelaar is een goede regelstrategie van belang. Deze is er niet. Daarom wordt aanbevolen een handleiding op te stellen voor de optimale regelstrategie.

89-381/R.25/GVL

27

7. LITERATUUR

[1] Grasso-fabrieksdocumentatie

[2] Touber, S.;
Energiebesparing bij compressiekoelinstallaties.
Koeltechniek (1987) nr. 11.

[3] Koppenol, A.D.;
Demonstratie van energiebesparing met de poolomschakelbare elektro-
motor bij koelcompressoren.
MT-TNO rapport 88-271.

[4] Koppenol, A.D.;
Literatuurstudie betreffende capaciteitsregeling bij koelinstalla-
ties.
MT-TNO rapport 87-329.

89-381/R.25/GVL

28

8. VERANTWOORDING

- Naam en adres van de opdrachtgever:

NOVEM B.V.
ref. 31360/2040
t.a.v. Ir. W. van Zanten
Postbus 17
6130 AA Sittard

- Namen en functies van de medewerkers:

A.D. Koppenol

- Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

n.v.t.

- Datum waarop, of tijdbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

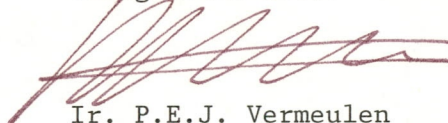
september tot december 1989

- Ondertekening:



A.D. Koppenol
onderzoekleider

Goedgekeurd door:



Ir. P.E.J. Vermeulen
werkgroep leider

Tabel 1 Toegepaste componenten

Compressor	: Worthington 4 cil. 2V x C4 (met kleplichting) boring :63,5 mm slag :69,85 mm
Electromotor	: SKA Heemaf 18,5/25 kW Δ 440 V 60 Hz $\cos\phi = 0,84$ 1760 omw/min. aangesloten op 380 V, 50 Hz 1488 omw/min
Frequentieregelaar:	Eldutronic, type P3T-22 kW
Expansieventiel	: Danfoss Type TQ 20 orifice no. 1 (R12 = 86 kW; R22 = 139 kW).
Koeler	: "Shell and Tube" fabrikaat Helpman uitvoering: RVS 14 passeringen cap. 5,2 kW bij $t_o = -32^\circ \text{C}$ (R502).
Condensor	: "Shell and Tube", watergekoeld fabrikaat Helpman HB 13-2-6-K-0
Waterregelventiel	: Stäfa Control System M3B25G
Electrische boiler:	Sinus 49 kW.
Glycolpomp	: Sihi LD 302 K
motor	: SKA Heemaf 220/380 V 2,8/1,6 A 1410 omw./min.
Vermogensmeter compressor	: SOAR 2/20/200 kW type 2720
Vermogensmeter electr.verw.:	SOAR 2/20/200 kW type 2720
Vermogensmeter electr.verw	: P/i meetomvormer eigenbouw 0-11 kW.
Flowmeter glycol	: turbinemeter Küppers HM 24E
Flowmeter freon	: turbinemeter Küppers HM 7E
Uitleesapp. turbinemeter	: Küppers DFVR 100 R (1/min.) voor 2 turbinemeters.
Drukmetingen	: Drukopnemers Gould 0-10b ab. $\rightarrow$ 0-1 V.
Verdeling drukopnemers	: Speisegerät - Signalwandler Camille-Bauer 0-1 V $\rightarrow$ 0-20 mA.
Temperatuurmetingen	: Koper-Const. thermo-elementen (geijkt) referentie: smeltend ijs.
Verwerking	: druk, temperatuur, flow, vermogen via HP 10 computer met HP 3497 data acquisitie unit.
Debietmeter water	: Watermeter 0-10 m ³ /h met opnemer. Gas en Wassermesserfabrik A.G. Luzern.

Tabel 2 Resultaten toerenregeling met frequentieregelaar met R12

Toerental		1786	1488	1116	745	1785	1488	1116	745
Verdampingstemperatuur (°C)		- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 2,0	- 2,0	- 2,0	- 2,0
Condensatietemperatuur (°C)		29,7	29,7	29,7	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Netto koelcapaciteit (kW)		30,87	26,31	19,99	13,46	43,00	36,4	27,32	18,56
Opgenomen elektrisch vermogen (kW)		11,39	9,26	6,82	4,37	12,22	9,8	7,25	4,56
Koudefactor (-)		2,71	2,84	2,93	3,08	3,52	3,72	3,77	4,07
Verdampingsdruk (bara)		2,27	2,27	2,27	2,27	2,89	2,89	2,88	2,88
Condensatiedruk (bara)		7,38	7,38	7,38	7,44	7,44	7,44	7,45	7,44
Drukverhouding (-)		3,25	3,25	3,25	3,28	2,57	2,57	2,58	2,58
<u>WATER/GLYCOL circuit:</u>									
Vermogen boiler elektrisch (kW)		32,14	27,14	20,08	12,78	44,60	37,81	27,97	18,39
Volumedebiet (l/min)		56,04	55,96	55,84	55,95	56,62	36,65	56,59	56,46
T-boiler-in (°C)		1,50	1,03	0,25	- 2,10	8,78	8,09	7,47	5,88
T-boiler-uit (°C)		10,46	8,62	5,98	1,61	20,98	18,39	15,17	11,05
Vermogen boiler afgifte (kW)		30,71	25,94	19,44	12,57	42,89	36,16	26,92	17,94
T-verdamper-in (°C)		10,52	8,68	6,07	1,72	20,99	18,45	15,22	11,11
T-verdamper-uit (°C)		1,51	0,98	0,18	- 2,26	8,77	8,08	7,41	5,77
Afgegeven vermogen verdamper (kW)		30,87	26,31	19,19	13,46	43,00	36,40	27,32	18,56
<u>KOUDEMIDDEL circuit:</u>									
Volumedebiet (l/min)		11,71	10,00	7,81	5,42	15,53	13,43	10,05	6,99
T-verdamper-uit (°C)		- 7,75	- 7,97	- 7,97	- 7,98	0,34	- 0,99	- 1,49	- 1,32
Opgenomen vermogen verdamper (kW)		32,08	27,40	21,2	14,70	43,43	37,38	28,87	19,30
T-compressor-in (°C)		1,56	1,35	1,50	1,22	6,70	6,62	6,18	6,43
T-compressor-uit (°C)		63,11	60,34	58,23	34,76	58,34	55,94	53,93	50,54
Geïnd. vermogen compressor (kW)		8,57	6,92	5,12	3,27	9,47	7,71	5,50	3,43
T-condensor-in (°C)		60,1	57,19	54,99	50,93	55,96	53,63	51,38	47,73
T-condensor-uit (°C)		24,47	24,35	25,26	25,34	25,34	25,16	25,29	25,79
Afgegeven vermogen condensor (kW)		41,60	35,10	26,93	18,32	53,71	46,03	34,05	23,17
<u>KOELWATER circuit:</u>									
Volumedebiet (l/min)		67,1	55,11	40,05	21,71	84,92	74,28	52,77	32,57
T-condensor-in (°C)		19,11	19,11	19,70	19,31	19,12	19,11	19,30	19,68
T-condensor-uit (°C)		27,94	28,19	29,13	30,02	28,32	28,08	28,56	29,82
Opgenomen vermogen condensor (kW)		41,3	34,82	26,35	17,65	54,40	46,0	34,0	22,98

Tabel 3 Resultaten toerenregeling met frequentieregelaar met R22

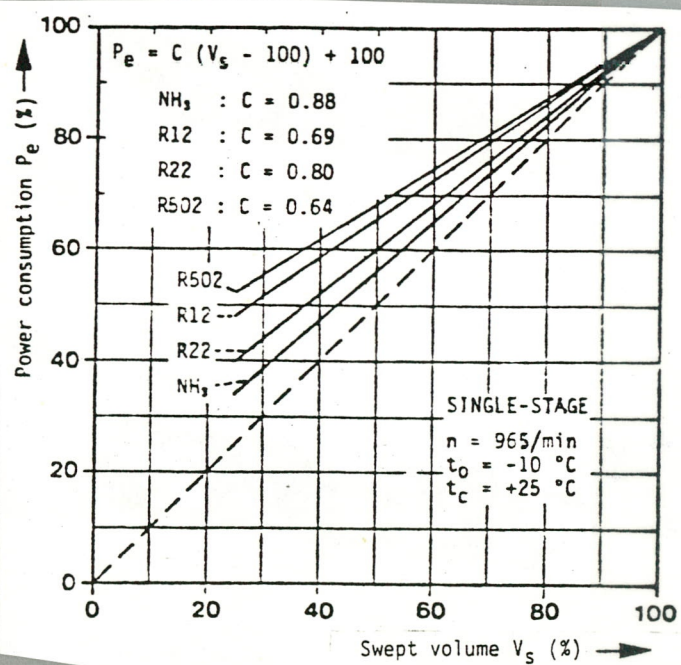
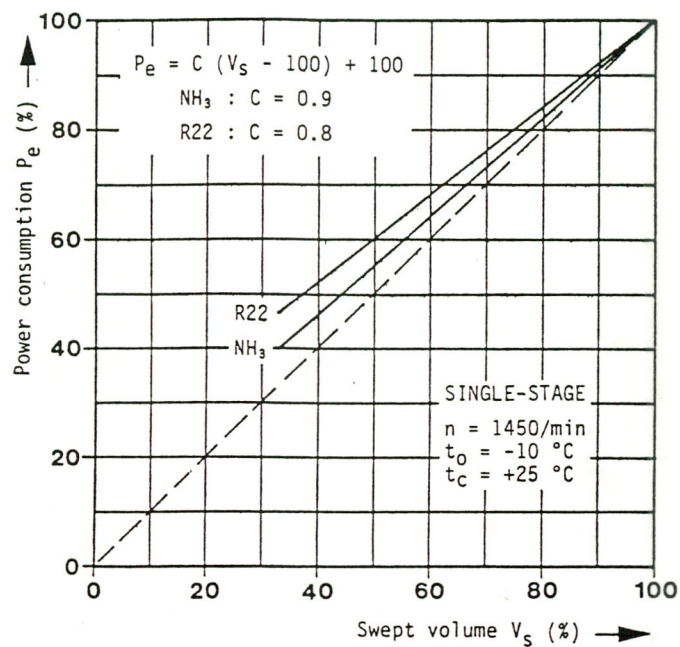
Toerental		1785	1488	1116	744	1780	1490	1118	744
Verdampingstemperatuur	(°C)	- 9,15	- 9,2	- 9,1	- 9,1	-20,0	-19,9	-20,0	-19,9
Condensatietemperatuur	(°C)	30,3	30,3	30,3	30,3	30,1	30,1	30,1	30,1
Netto koelcapaciteit	(kW)	51,40	43,63	33,16	22,02	29,90	24,95	18,32	11,91
Opgenomen elektrisch vermogen	(kW)	17,07	13,90	10,06	6,62	13,97	11,63	8,49	5,63
Koudefactor	(-)	3,01	3,14	3,30	3,32	2,14	2,15	2,16	2,11
Verdampingsdruk	(bara)	3,65	3,64	3,66	3,66	2,45	2,46	2,45	2,46
Condensatiedruk	(bara)	12,0	12,0	12,0	12,04	11,95	11,95	12,0	11,95
Drukverhouding	(-)	3,29	3,30	3,28	3,28	4,88	4,86	4,89	4,86
<u>WATER/GLYCOL circuit:</u>									
Vermogen boiler elektrisch	(kW)	53,35	45,10	33,93	22,24	30,84	25,80	18,53	11,81
Volumedebiet	(l/min)	56,34	56,33	56,17	56,03	53,07	53,05	52,72	34,36
T-boiler-in	(°C)	2,43	1,29	0,51	- 0,76	- 9,50	- 9,58	-10,8	-12,47
T-boiler-uit	(°C)	17,22	13,82	10,00	5,50	- 0,51	- 2,06	- 5,33	- 7,20
Vermogen boiler afgifte	(kW)	51,36	43,29	32,55	21,34	28,51	23,78	17,08	10,68
T-verdamper-in	(°C)	17,24	13,84	10,02	5,58	- 0,48	- 2,01	- 5,25	- 7,11
T-verdamper-uit	(°C)	2,43	1,22	0,30	- 0,89	- 9,92	- 9,90	-11,11	-12,98
Afgegeven vermogen verdamper	(kW)	51,40	43,63	33,16	22,02	29,90	24,95	18,32	11,91
<u>KOUDEMIDDEL circuit:</u>									
Volumedebiet	(l/min)	15,33	13,20	10,13	6,86	9,35	7,88	5,91	4,04
T-verdamper-uit	(°C)	- 8,02	- 8,28	- 8,23	- 8,35	-19,19	-19,03	-19,47	-18,80
Opgenomen vermogen verdamper	(kW)	52,47	45,10	34,53	23,36	31,32	26,33	19,63	13,29
T-compressor-in	(°C)	0,17	0,03	- 0,13	- 0,06	- 8,10	- 7,72	- 7,70	- 7,80
T-compressor-uit	(°C)	72,93	71,30	67,80	64,72	83,65	83,00	80,48	75,33
Geïnd. vermogen compressor	(kW)	12,77	10,67	7,64	4,82	9,99	8,30	5,97	3,74
T-condensor-in	(°C)	69,93	68,11	64,53	60,51	78,10	77,02	74,15	67,08
T-condensor-uit	(°C)	25,17	25,26	25,46	25,52	24,61	24,90	25,30	26,43
Afgegeven vermogen condensor	(kW)	66,25	56,59	42,76	28,49	41,84	35,03	25,91	17,07
<u>KOELWATER circuit:</u>									
Volumedebiet	(l/min)	96,54	87,0	68,9	35,20	63,5	54,72	34,6	19,74
T-condensor-in	(°C)	18,73	19,41	19,67	18,58	18,78	19,24	19,14	18,89
T-condensor-uit	(°C)	28,58	28,58	28,43	29,81	27,95	28,36	29,64	30,67
Opgenomen vermogen condensor	(kW)	66,25	55,52	42,0	27,52	40,55	34,44	25,75	16,15

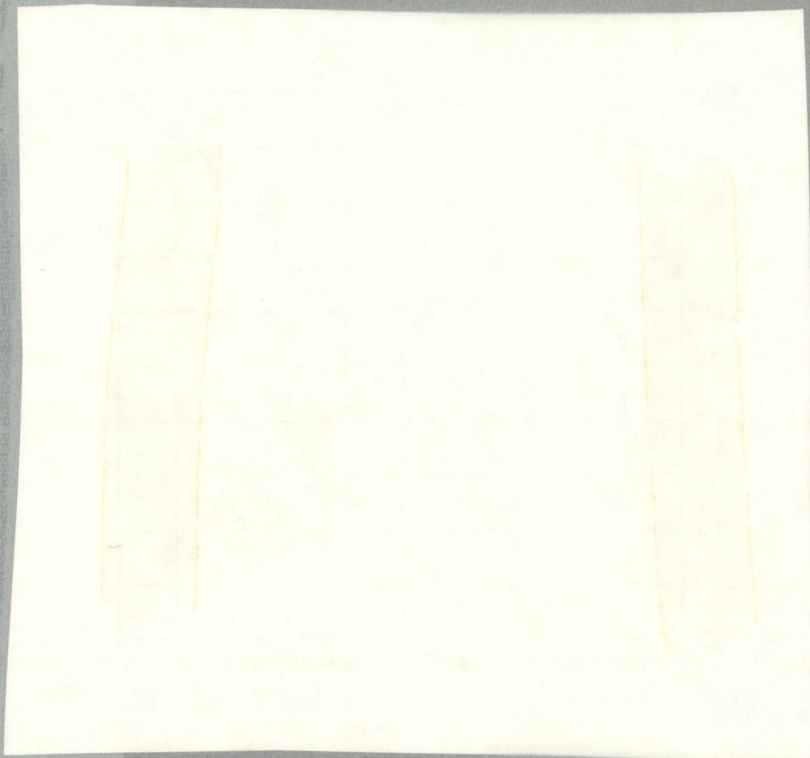
Tabel 4 Besparing door toerenregeling

Koudemiddel koelvermogen	*Regeling/ bedrijfs- tijd	Elektra verbruik (kWh/j)	Besparing t.o.v. cilinderafsch.			Meer in- investering (f)	Terugver- dientijd** (j)
			%	kWh/j	f/j**		
R12; 30 kW	A	1 39370	-	-	-	-	-
		2 35480	9,9	3890	584	1150	2,0
		3 33650	14,5	5720	858	6035	7,0
		4 34070	13,5	5300	891	6035	7,6
	B	42530	-	-	-	-	-
		34750	18,3	7780	1167	1150	1,0
		33650	20,9	8880	1332	6035	4,5
		34070	19,9	8400	1269	6035	4,8
	A	35680	-	-	-	-	-
		33470	6,2	2210	332	1150	3,5
		32790	8,1	2890	434	6465	14,9
		32970	7,6	2710	407	6465	15,9
R22; 30 kW	B	37500	-	-	-	-	-
		33070	11,8	4430	665	1150	1,7
		32790	12,6	4710	706	6465	9,1
		32910	12,1	4530	680	6465	9,5
R12; 100 kW	A	131230	-	-	-	-	-
		118260	9,9	12970	1946	3480	1,8
		112180	14,5	19050	2858	17600	6,2
		113590	13,5	17640	2646	17600	6,7
	B	141790	-	-	-	-	-
		115850	18,3	25940	3891	3480	0,9
		112180	20,9	29610	4442	17600	4,0
		113590	19,9	28220	4230	17600	4,2
R22; 100 kW	A	118950	-	-	-	-	-
		111570	6,2	7380	1106	3480	3,1
		109300	8,1	9650	1448	18500	12,8
		109900	7,6	9050	1358	18500	13,6
	B	125005	-	-	-	-	-
		110235	11,8	14753	2213	3480	1,6
		109300	12,6	15705	2356	18500	7,9
		109900	12,1	15105	2266	18500	8,2

* Bedrijfstijd/regeling	A		B	
	vollast(h)	50%- deellast (h)	vollast (h)	50%- deellast (h)
1 cilinderafschakeling	2750	1500	2000	3000
2 2-toerenmotor	2750	1500	2000	3000
3 frequentieregelaar	500	6000	500	6000
4 frequentieregelaar	1000	5000	1000	5000

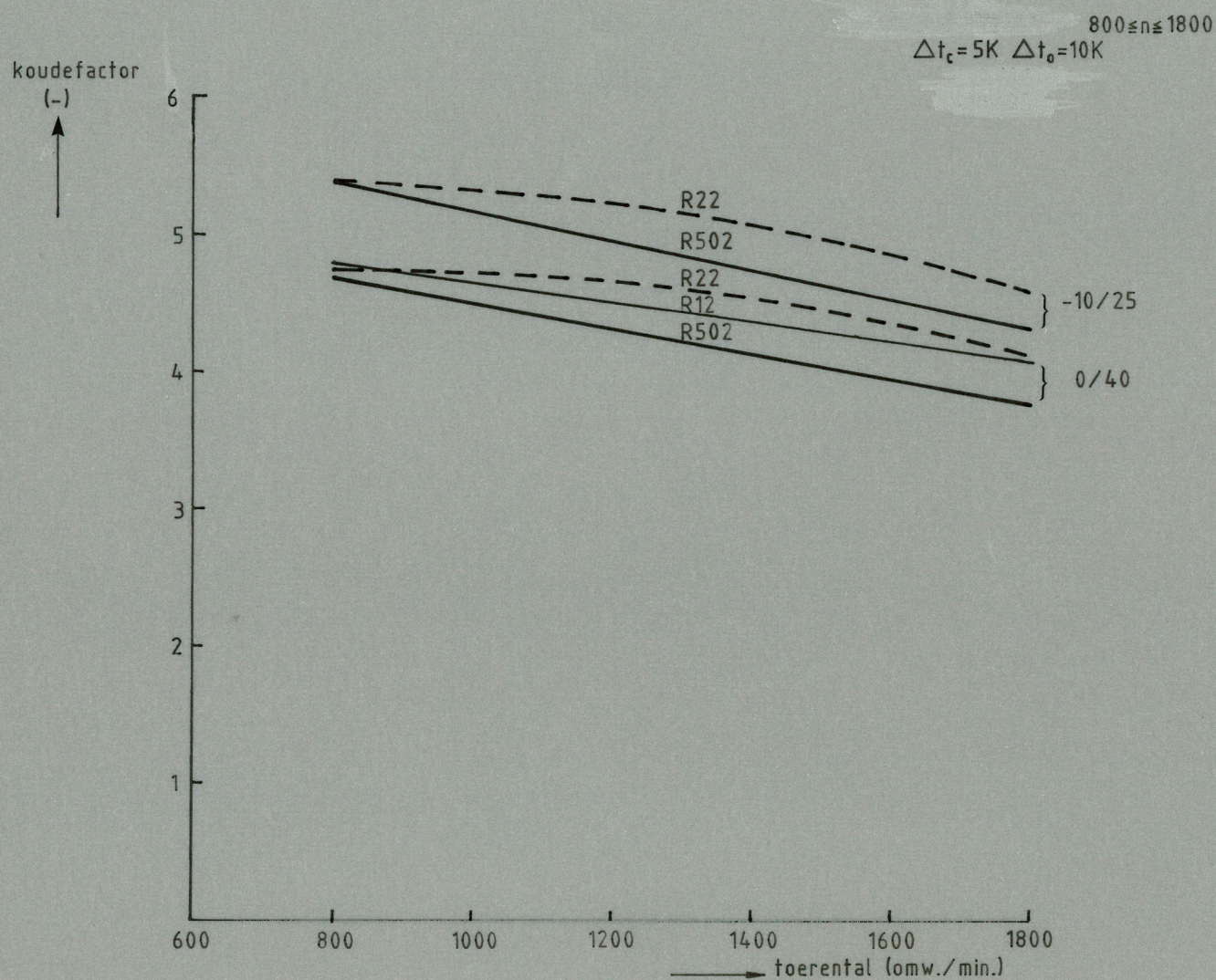
** kWh-prijs f 0,15

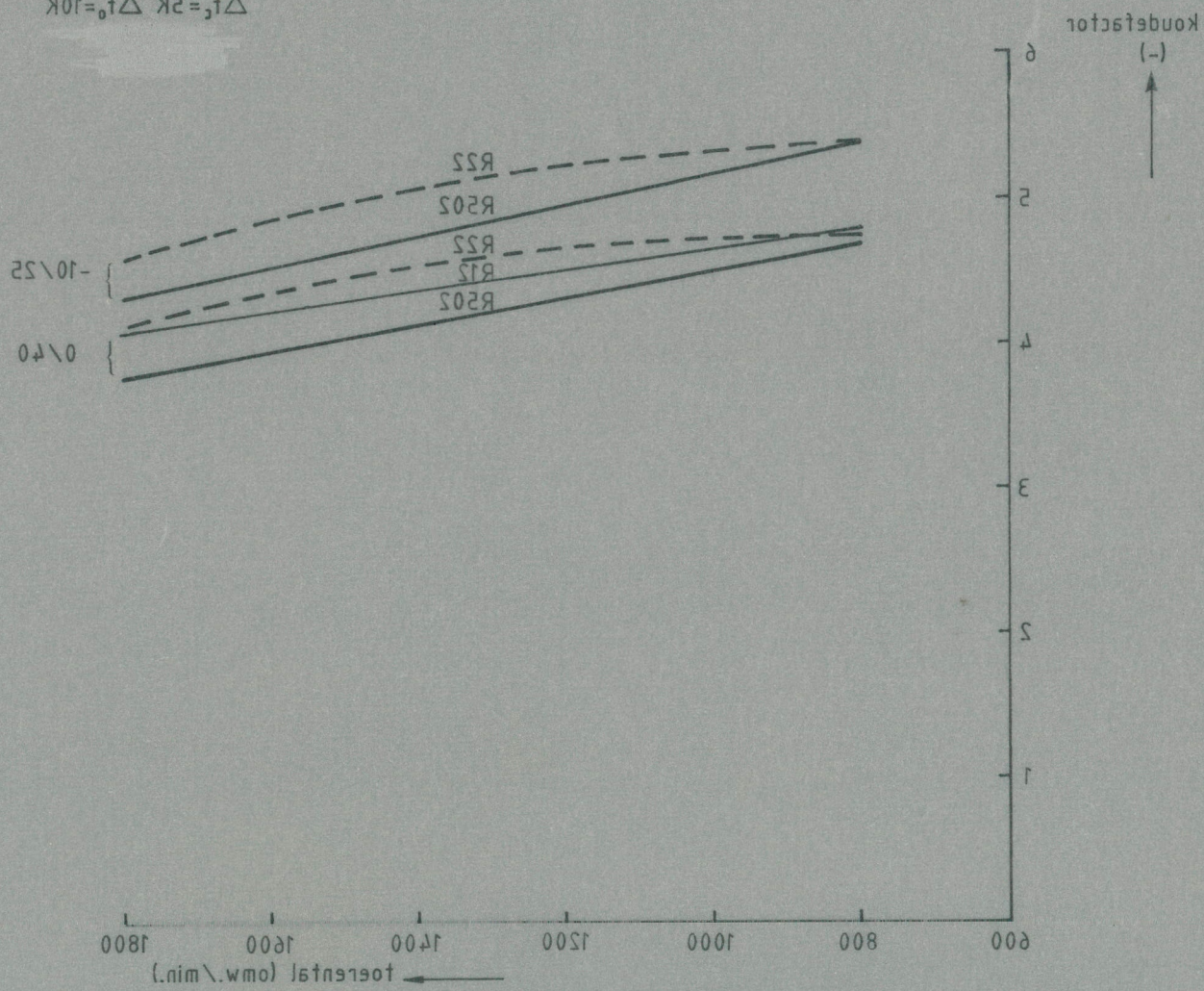




Deelst energieverbruik bij zuigkleplichting.

Fig. 1
89-381
MT-TNO

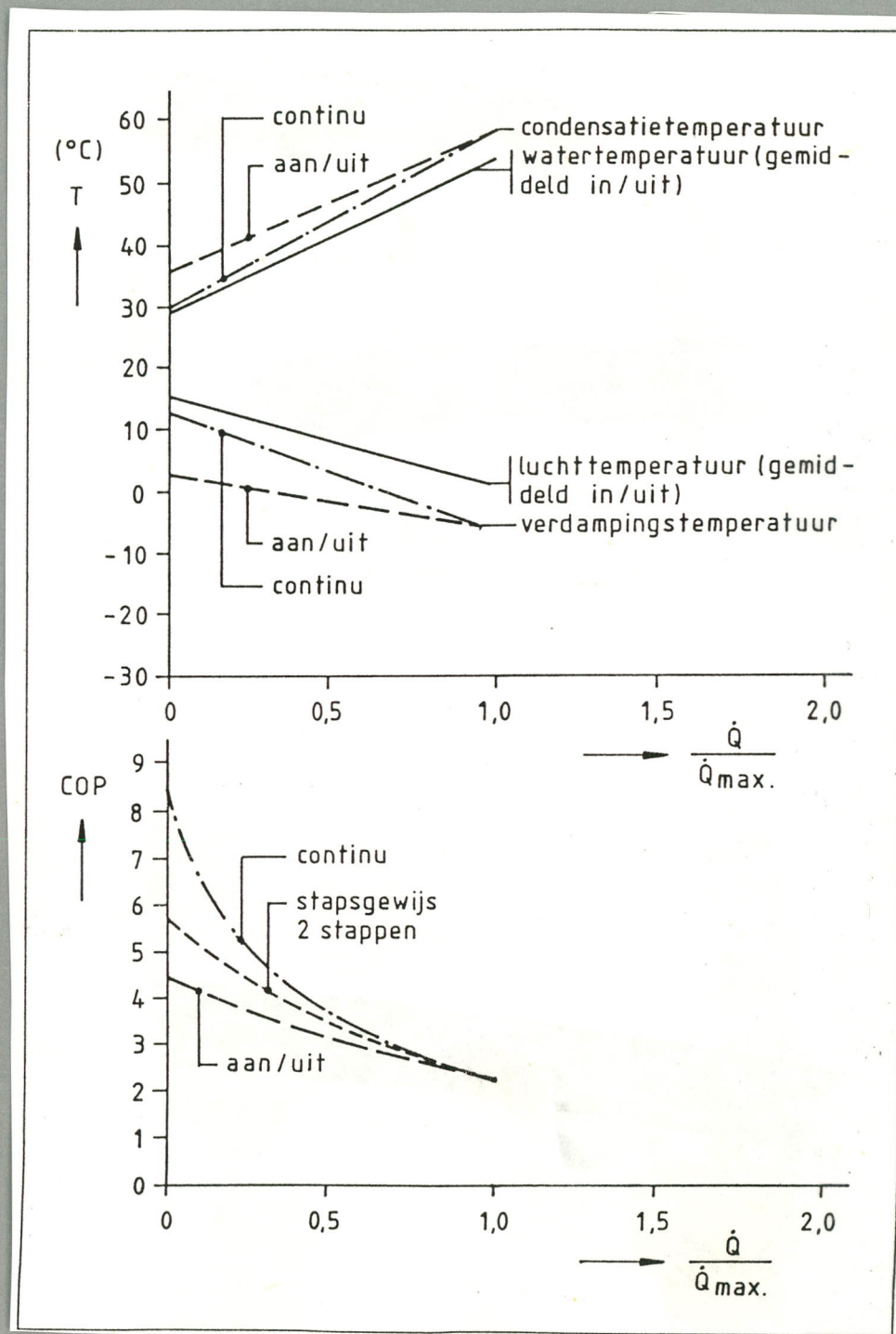


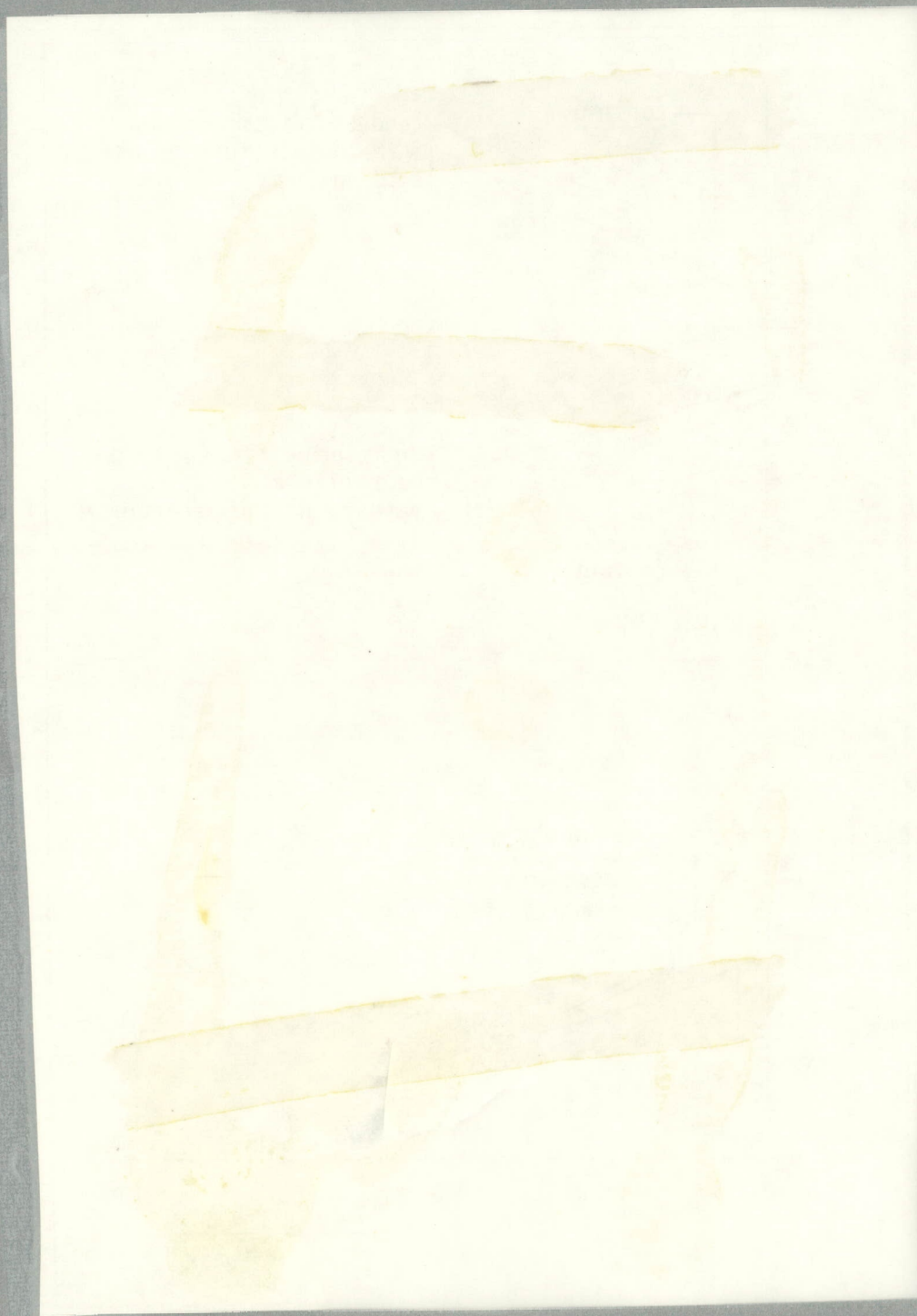


$\Delta t_c = 2K \Delta t_0 = 10K$
 $800 \pm u \approx 1800$

Kondensator als functie van het toerental

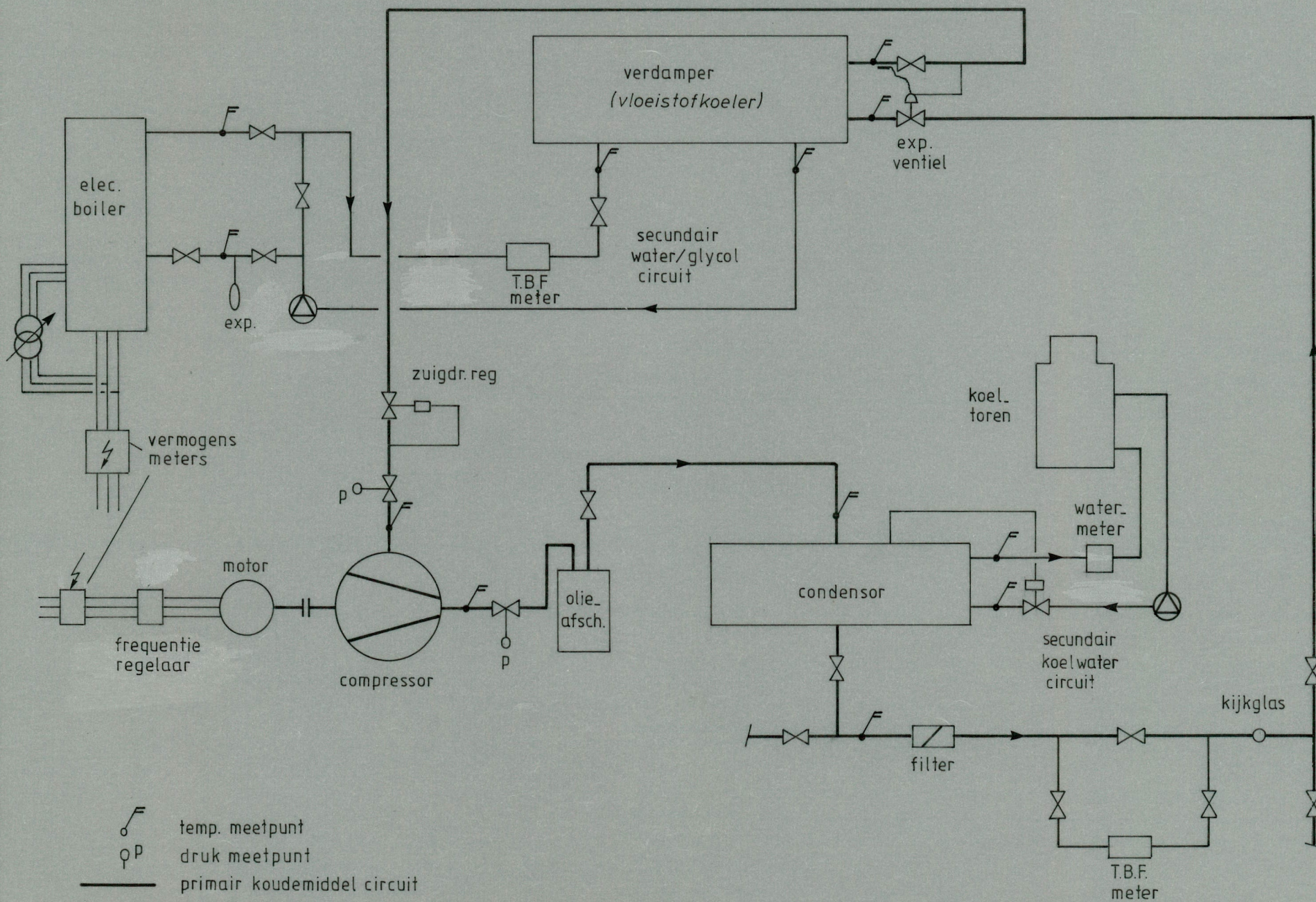
MT-TNO
 89-381
 Fig. 2

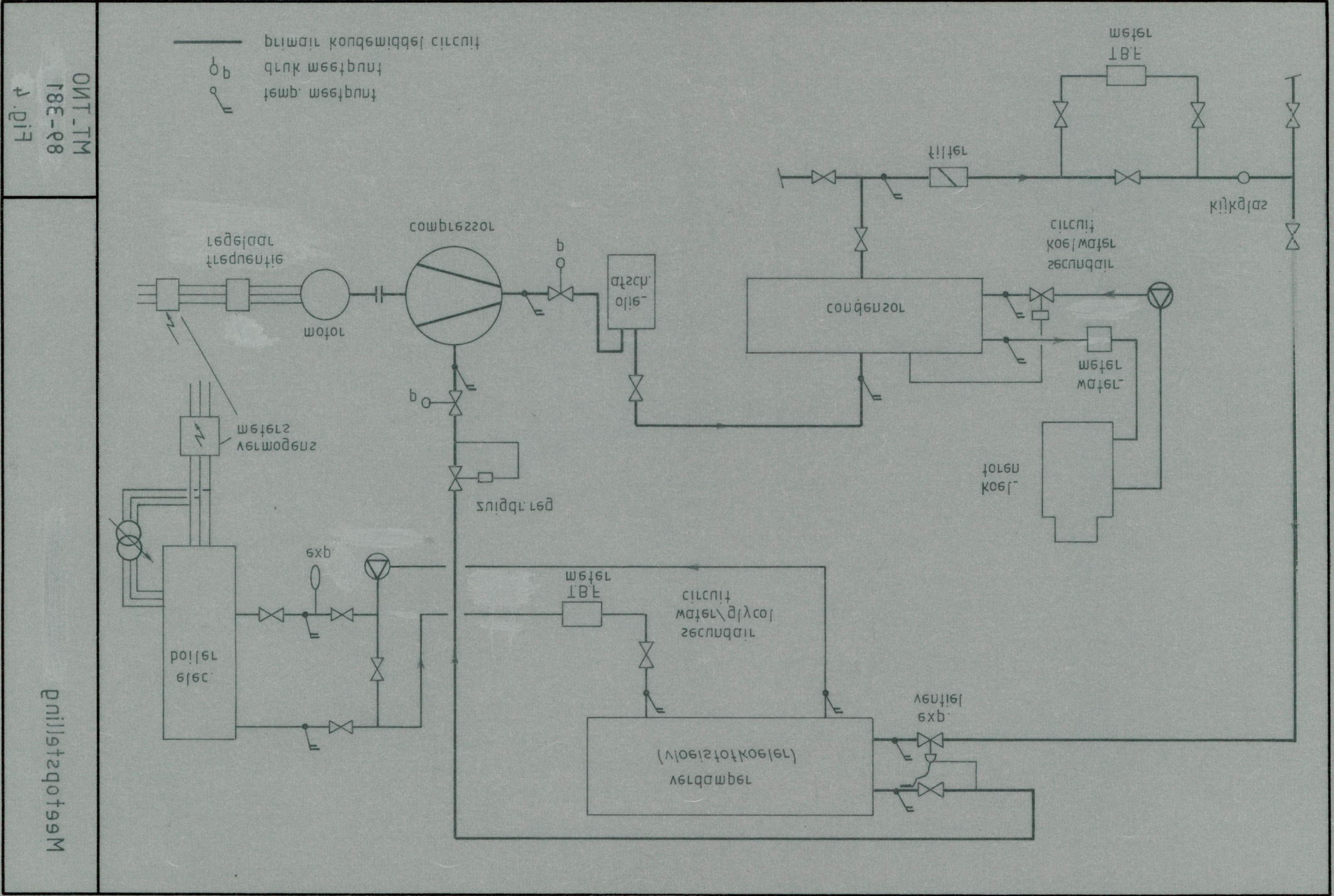


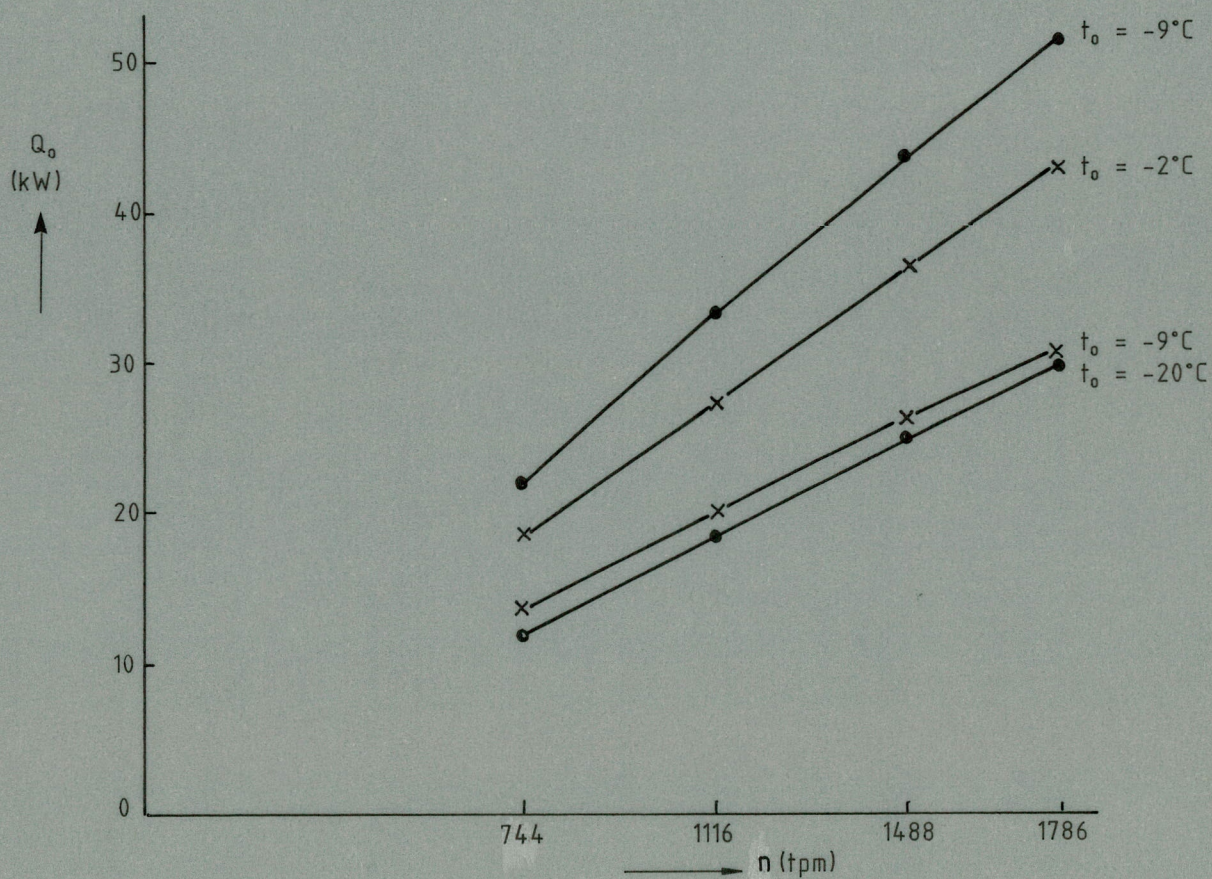
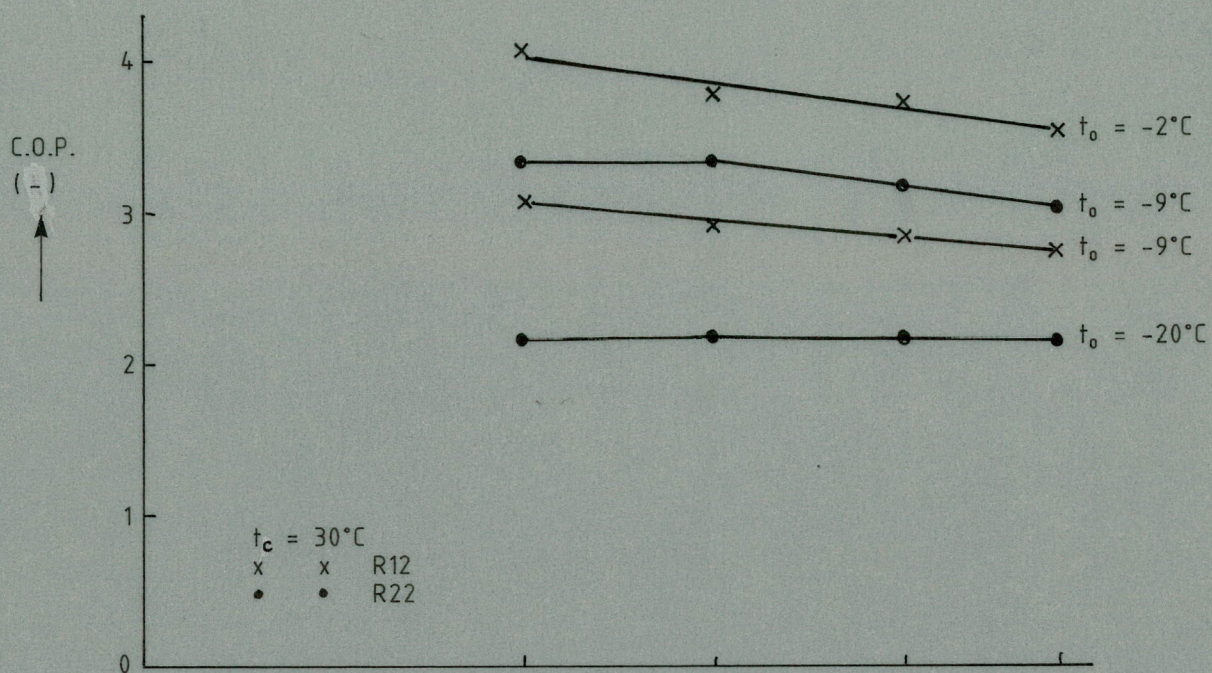


ONT-TM
18E-98
E.gif

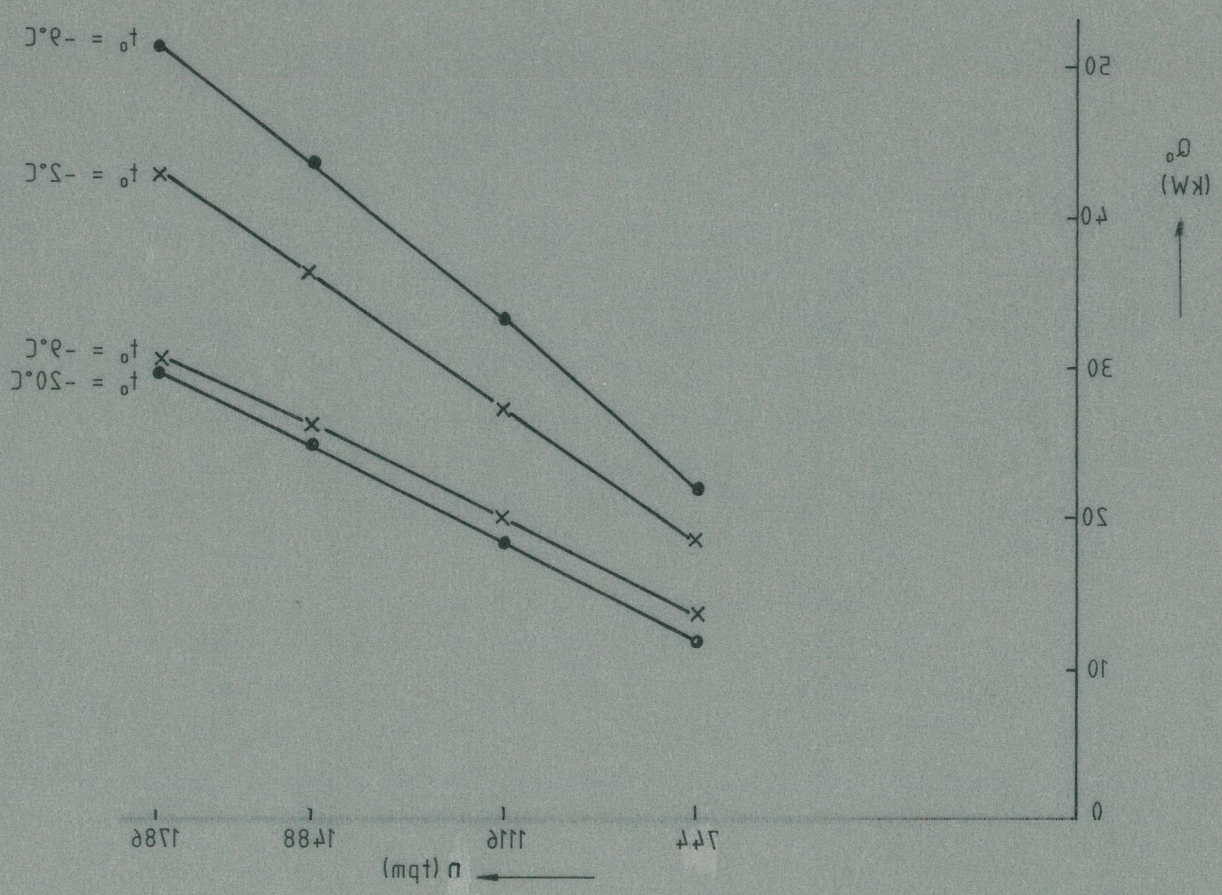
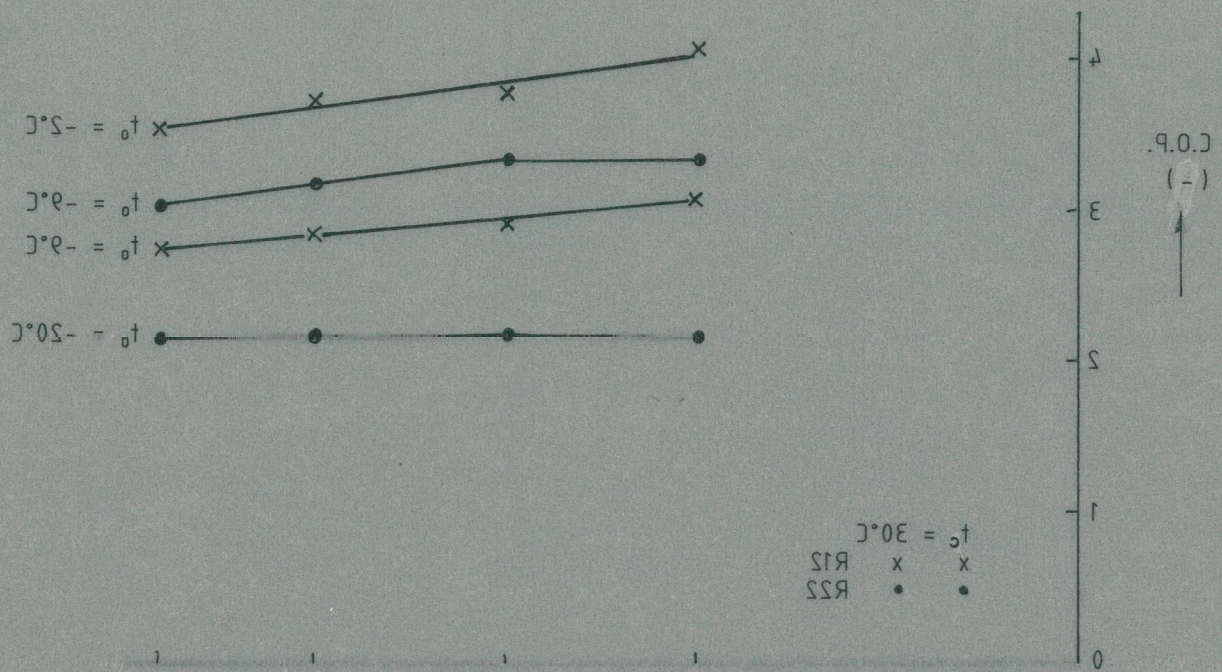
Effect van aan\uit regeling resp. continue resp. op de CO₂

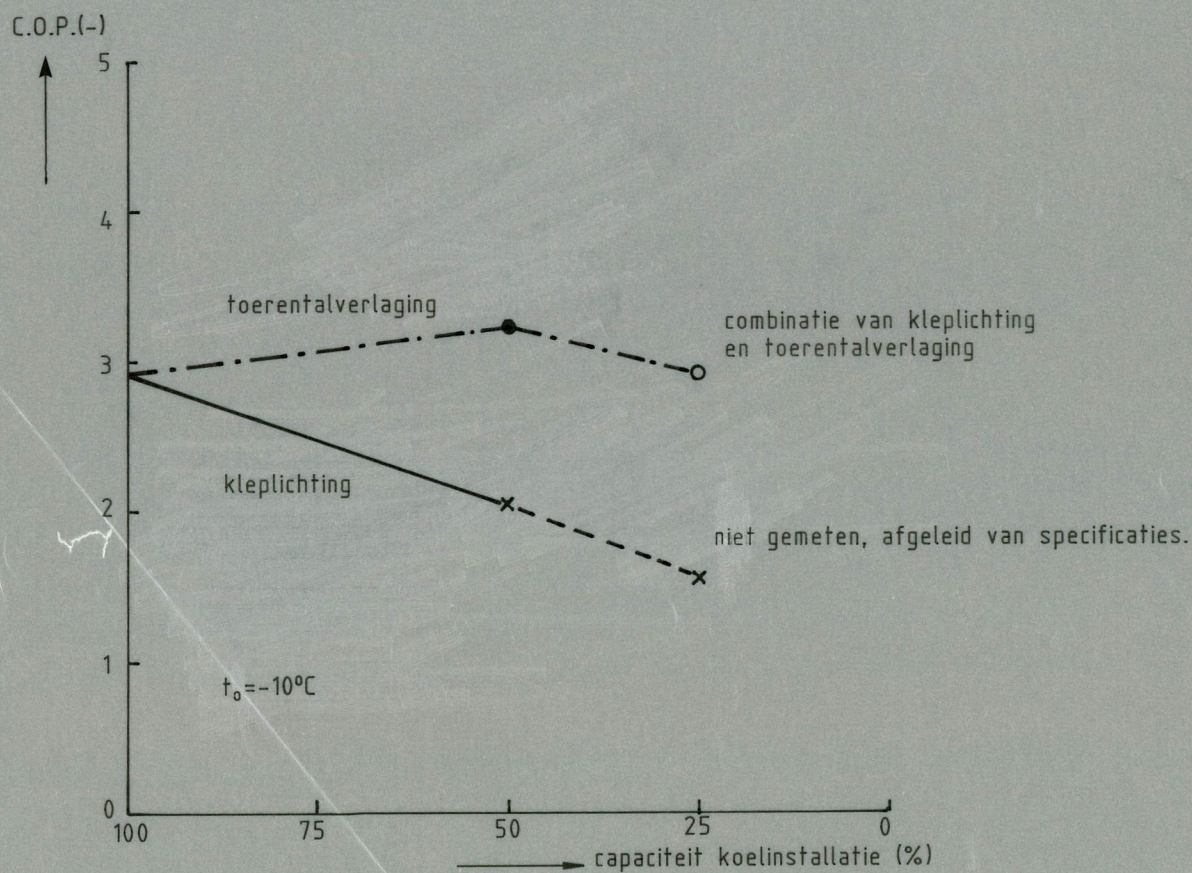
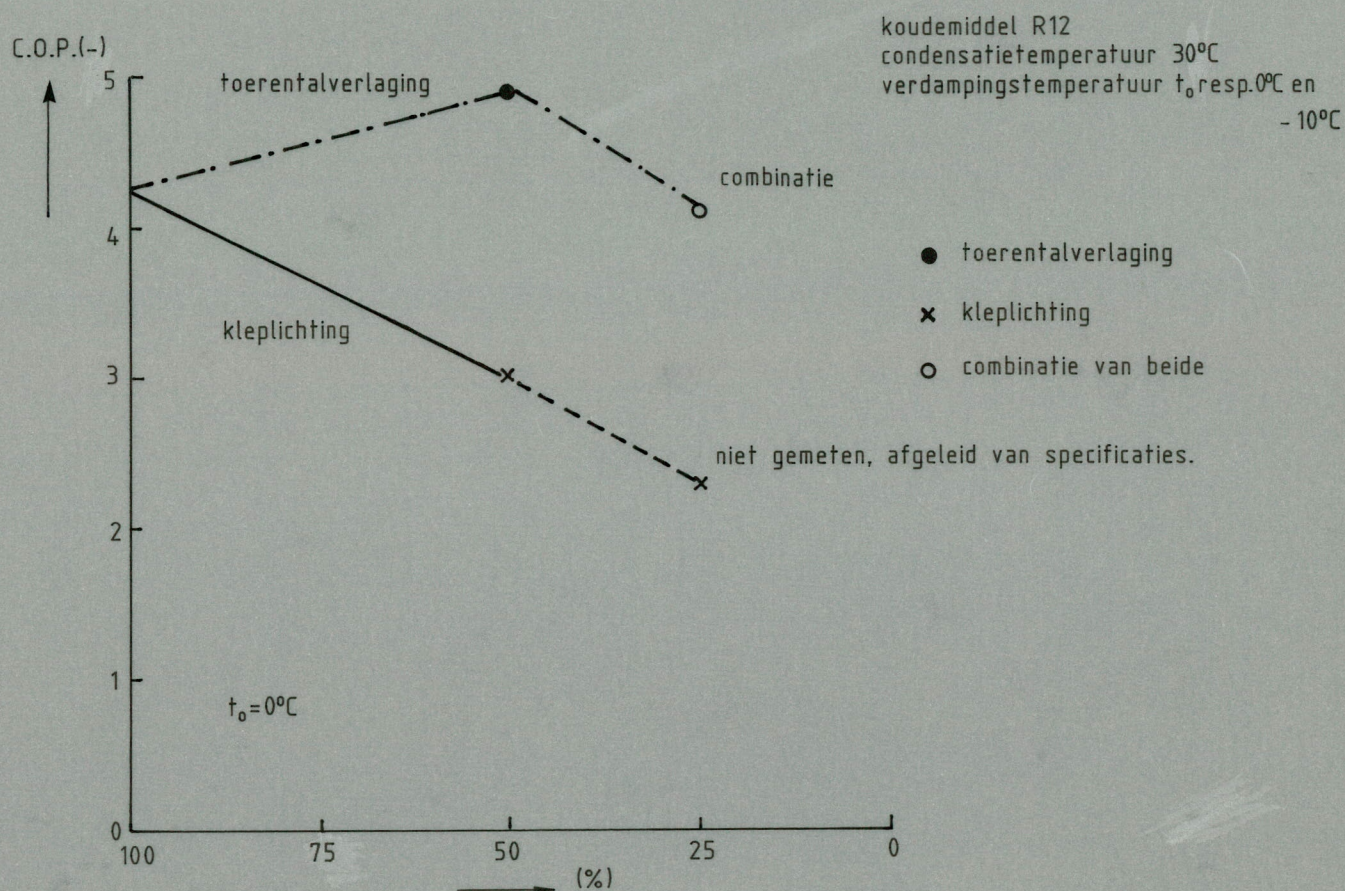






Koudefactor en koelcapaciteit als functie van het toerental.

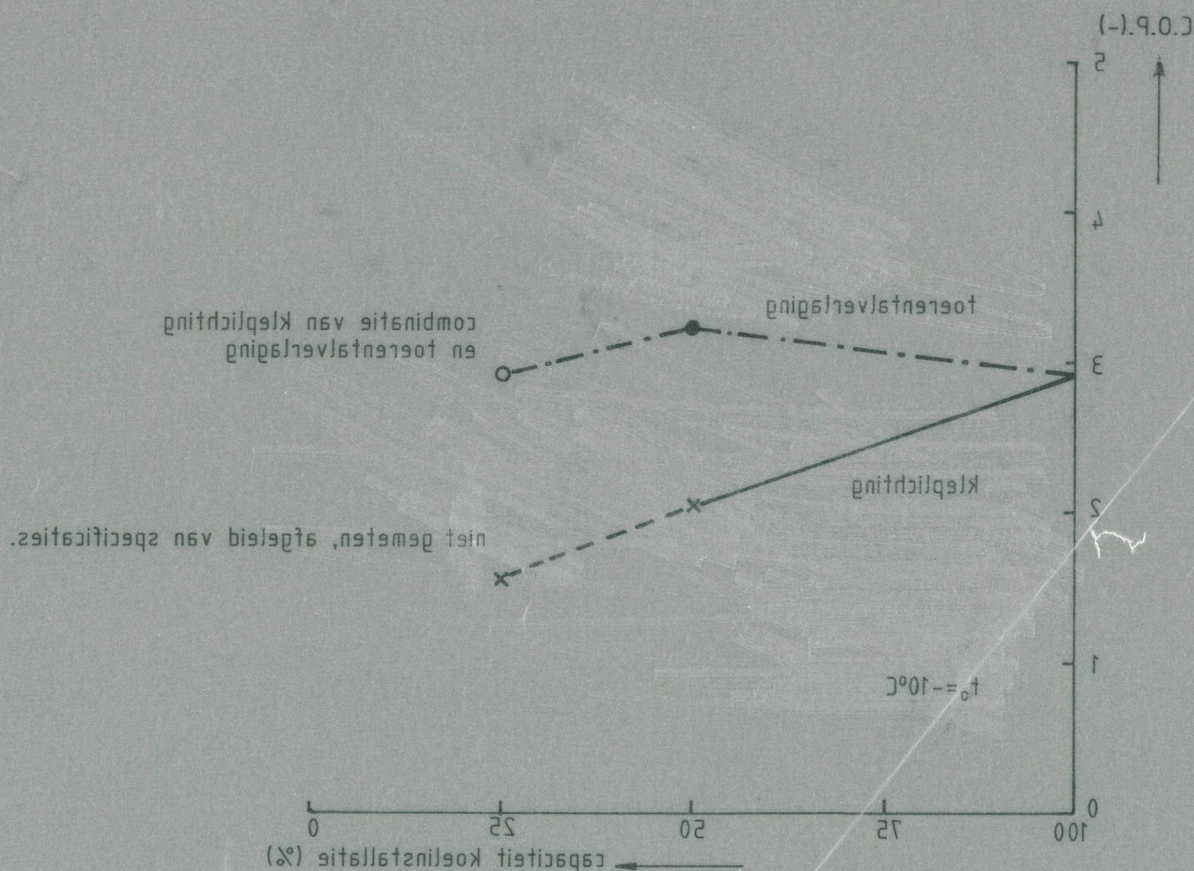
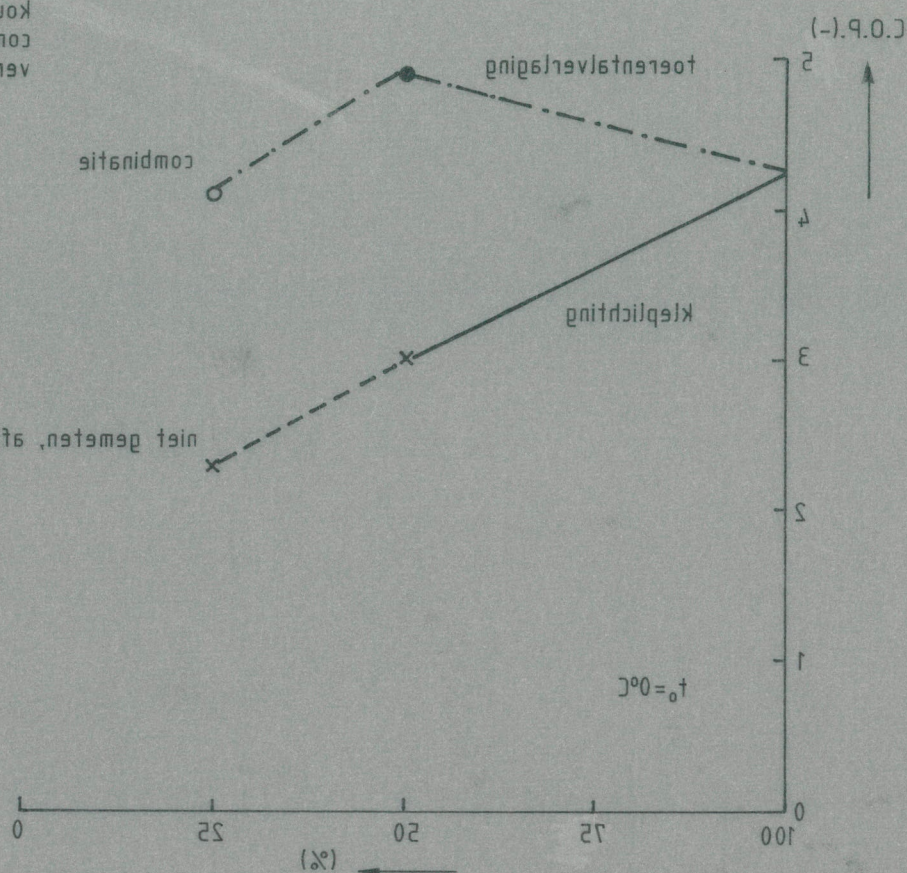


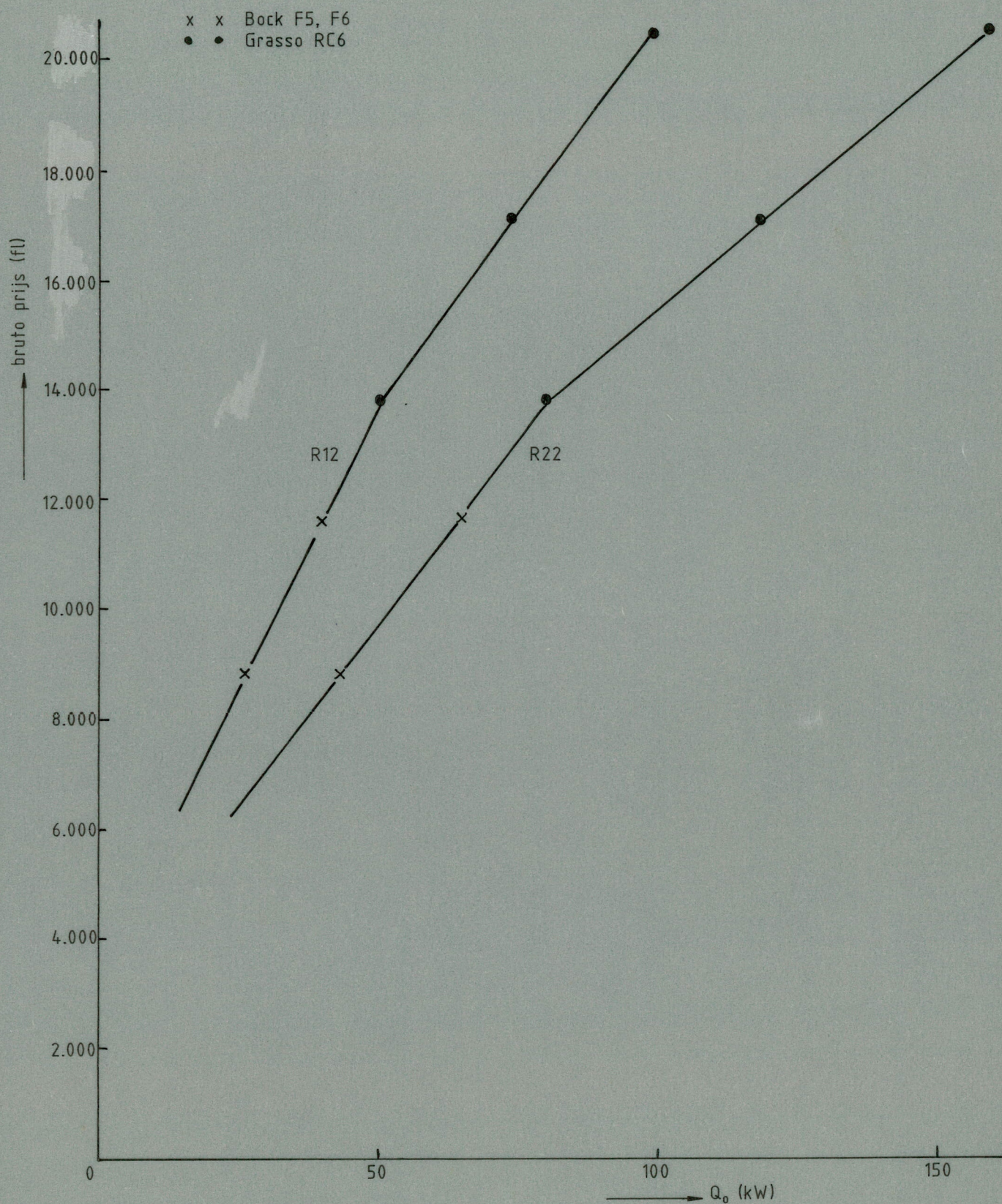


Koudemiddel R12
 condensatietemperatuur 30°C
 verdampings temperatuur t₀ resp. 0°C en
 -10°C

● toerentalverlaging
 x Kleplichting
 o combinatie van beide

niet gemeten, afgeleid van specificaties.





Bruto prijs Bock compressor (F5, F6) en Grasso RC6
(zonder capaciteitsregeling)

MT-TNO
89-381
Fig.7

Винто бриз блок компрессор (Е2, Е9) су класно БСЕ

82-381

ONT-TM

