

90 JAN. 1974

Organische vloeistoffen als warmtetransportmedia*

D. J. v. d. Heeden **

Bij indirecte verwarmingssystemen vinden naast water en stoom in toenemende mate andere media toepassing.

In het gebied 150 - 400 °C is dit met name een aantal organische vloeistoffen, dat in dit artikel nader wordt besproken.

Behalve op de aan deze vloeistoffen te stellen eisen, wordt verder ingegaan op transporteigenschappen, warmteoverdrachtseigenschappen en vuurhaardbelasting. Een aantal veel toegepaste vloeistoffen wordt op enkele punten onderling vergeleken.

1. INLEIDING

Bij vele processen en werkzaamheden in industrie, huis-houding en transport, is toevoer van warmte noodzakelijk. Men kan deze warmte opwekken op de plaats waar zij nodig is, directe verwarming dus, maar dit stuit vaak op moeilijkheden. Eisen die door het proces gesteld worden, b.v. gelijkmatige verwarming, goede regelbaarheid en ook veiligheidseisen (brand- en explosiegevaar), kunnen het raadzaam maken een warmte-overdrachtsmiddel in te schakelen tussen warmtebron en warmteverbruiker; men spreekt dan van indirecte verwarming. Zodra op meerdere punten warmte nodig is, komt men dan tot toepassing van een warmtetransportsysteem. Een overbekend voorbeeld is de centrale verwarming, met water of stoom als transportmedium.

De voornaamste voordelen van indirecte verwarmingssystemen zijn:

1. Vanuit één centraal punt kan een vrijwel onbeperkt aantal punten van warmte worden voorzien.
2. Snelle aanpassing aan wijzigingen in de gevraagde warmtehoeveelheid is mogelijk.
3. Regeling is mogelijk zowel via de temperatuur van het medium als via de toegevoerde hoeveelheid. Bij temperatuurgevoelige producten kan schade eenvoudig voorkomen worden door de mediumtemperatuur te begrenzen.
4. Grotere veiligheid en verminderd brandgevaar, doordat de stookinstallatie op een daartoe geschikt punt kan worden geplaatst.

Een bepaalde vorm van directe verwarming, nl. elektrische verwarming, heeft een aantal voordelen gemeen met de indirecte systemen. Ten onrechte worden bij de keuze van het verwarmingssysteem de mogelijkheden die elektrische verwarming biedt, wel eens over het hoofd gezien.

2. WARMTETRANSPORTMEDIA

Als warmtetransportmedium kunnen alle mogelijke stoffen in aanmerking komen, maar wat de geschiktheid voor dit doel betreft lopen zij uiteraard sterk uiteen. Om voor de hand liggende redenen zijn vaste stoffen minder geschikt, de toepassing hiervan is tot speciale gevallen beperkt gebleven. Vanwege hun eenvoudige transporteerbaarheid komen vloeistoffen en gassen veel meer in aanmerking. Gassen zijn hierbij duidelijk in het nadeel daar ρ en c_p zeer laag zijn en dus veel getransporteerd moet worden en bovendien de warmte-overdracht over het algemeen slecht is. Het gebruik van gassen is echter soms noodzakelijk of onvermijdelijk, nl.

- a. bij verbrandingsprocessen, waar verbrandingsgassen automatisch als warmtetransportmiddel vrijkomen;
- b. bij hoge temperaturen, i.c. $> 1000^\circ$, waar gassen praktisch de enige mogelijkheid vormen.

In het gebied waar zij kunnen worden toegepast zijn vloeistoffen echter veel beter geschikt dan gassen. Een klein aantal vloeistoffen wordt ook in de dampfase gebruikt. Redenen hiervoor zijn de constante α en de constante temperatuur die bij condensatie kunnen worden bereikt en die voor sommige toepassingen van groot voordeel kunnen zijn. Dit artikel zal zich verder tot vloeistoffen, resp. dampen, beperken.

3. TE STELLEN EISEN AAN VLOEIBARE WARMTETRANSPORTMEDIA

Van de vele bestaande vloeistoffen is slechts een betrekkelijk gering aantal geschikt als warmtetransportmedium. Dit wordt duidelijk als men de eisen beziet die aan een dergelijke vloeistof zijn te stellen.

Deze zijn:

1. Goed „hanteerbaar”, waaronder te verstaan:
 - a. goede thermische en chemische bestendigheid
 - b. hoog kookpunt, resp. lage dampdruk
 - c. laag stolpunt, resp. pour point
 - d. niet corrosief
 - e. eenvoudig te vernietigen, resp. te regenereren.
2. Goede warmtetransporteigenschappen:
 - a. hoge c_p
 - b. hoge ρ
 - c. hoge verdampingswarmte (bij damptoepassing)
3. Goede warmteoverdrachtseigenschappen:
 - a. lage ν
 - b. hoge λ
4. Veilig:
 - a. niet giftig
 - b. niet brandgevaarlijk
5. Goedkoop.

Een aantal eisen vereist een nadere toelichting.
ad 1.a.: Dit is wel de belangrijkste eis. Hoe goed de overi-

* Lezing gehouden op de 33e Vakantieleergang voor Warmtetechniek op 24 augustus 1971 te Utrecht

** Centraal Technisch Instituut TNO, afd. Warmte- en Koudetechniek

ge eigenschappen ook mogen zijn, als een vloeistof bij verhitte snel ontleedt, is deze voor dit doel onbruikbaar.

ad 1.b.: Ook dit is een belangrijk criterium, daar een warmtetransportsysteem het goedkoopst en eenvoudigst is als het drukloos kan worden uitgevoerd.

ad 1.e.: Deze eis, voor zover reeds niet nu belangrijk, zal dit in de toekomst zeker worden.

ad 2. Hierop wordt in hoofdstuk 7 teruggekomen.

ad 3. Hierop wordt in hoofdstuk 8 teruggekomen. De eis hangt samen met de eis van een laag stolpunt (1.a.) en wijst tevens op de wenselijkheid van een hoge viscositeitsindex.

ad 4.b.: Daar deze vloeistoffen over het algemeen in gesloten systemen worden gebruikt, doet het er bij goed functionerende installaties weinig toe of de vloeistof brandbaar is of niet.

Evenals eis 4.a. is het echter van belang in geval van lekkage of een calamiteit. Stelt men als eis: niet brandbaar, dan sluit men echter een aantal, overigens goed geschikte, vloeistoffen uit. Voor deze brandbare vloeistoffen zou in elk geval gestreefd kunnen worden naar een hoge zelfontstekings temperatuur.

Het zal duidelijk zijn dat geen enkele vloeistof aan al deze eisen voldoet, zodat bij de keuze altijd op meerdere punten een compromis moet worden gesloten. Wat hierbij het zwaarst dient te wegen valt niet zonder meer te zeggen en is afhankelijk van het toepassingsdoel en de temperatuur die men wil bereiken. In de loop der jaren is echter een aantal vloeistoffen naar voren gekomen, die op meerdere van voorgenoemde punten zodanige eigenschappen bezitten dat zij zich een vaste plaats hebben weten te veroveren naast en ook ten koste van de reeds lang bekende toepassing van water, resp. stoom.

4. WATER, RESP. STOOM ALS WARMTETRANSPORTMEDIUM

Toepassing van water en stoom is reeds oud en nog steeds vormt water het meest gebruikte warmtetransportmiddel. Dit is niet zonder reden. Vergelijking met de eisen uit hoofdstuk 3 toont dat water op de punten 1.a., 1.e. en 2. t/m 5. zeer goed is, c_p en λ zijn bij voorbeeld hoog en ν zeer laag. De condensatiewarmte is buitengewoon hoog en zoals bekend kan in de dampfase een exceptioneel hoge warmte-overdracht worden verkregen. De punten 1.c. en 1.d. zijn matig. Het grote bezwaar is echter punt 1.b., de hoge dampdruk, zie tabel 1.

Bij hogere temperaturen leidt dit tot zware en dure constructies, ook allerlei veiligheidsaspecten komen om de hoek kijken, keuring door Stoomwezen, etc. Bij deze hoge temperaturen en drukken zal men veelal ook tot waterbehandeling moeten overgaan. Ondanks de overige goede eigenschappen weegt dit nadeel voor water zo zwaar, dat een groot aantal hoogkokende vloeistoffen, deels reeds be-

staand, deels speciaal ontwikkeld, toepassing heeft gevonden. Water wordt hierdoor steeds meer teruggedrongen in het gebied beneden 150 °C. Tenzij een laag stolpunt vereist wordt is water beneden 100 °C echter moeilijk te overtreffen.

De toenemende toepassing van andere media dan water vindt niet alleen zijn oorzaak hierin dat deze media vroeger niet beschikbaar waren of de toepassing onbekend. In de procesindustrie bestaat een duidelijke tendens met steeds hogere temperaturen te gaan werken. Verder leidt de drang tot grotere produktie en meer compacte installaties tot het toepassen van grotere temperatuurverschillen in warmtewisselaars. Deze oorzaken hebben tot gevolg dat allerlei warmteoverdrachtsprocessen opschuiven naar een temperatuurgebied waarin verdere toepassing van water onaantrekkelijk wordt.

5. OVERIGE VLOEIBARE MEDIA

Gezien het voorgaande zal het duidelijk zijn dat andere als warmtetransportmedium geschikte vloeistoffen vooral gezocht moeten worden bij die vloeistoffen die bij temperaturen van 200 °C, 300 °C en nog hoger, een dampdruk hebben die nog beneden de atmosferische druk ligt. Als zodanig zijn tot toepassing gekomen:

organische vloeistoffen	
minerale oliën	- tot 320 à 350 °C
synthetische vloeistoffen	- tot 400 à 430 °C
anorganische vloeistoffen	
gesmolten zouten	- tot 600 °C
vloeibare metalen	- tot 900 °C

De bovengrenzen van het toepassingsgebied zijn uiteraard vaag en hangen voor wat de organische vloeistoffen betreft samen met de ketelinstallatie (wandtemperatuur!) en de levensduur. Bij de anorganische vloeistoffen spelen ook de gehele technologie van de installatie, toegepaste materialen etc. een grote rol en de hierboven genoemde grenzen liggen geenszins vast.

De genoemde anorganische vloeistoffen voldoen op meerdere punten (o.a. stolpunt, corrosie) in het geheel niet aan de eisen uit hoofdstuk 3. Het toepassingsgebied is tot nu toe zeer gespecialiseerd en beperkt zich tot de kernreactortechniek en de chemische industrie voor het gebied 400 - 900 °C, in welk gebied, afgezien van gassen, geen andere geschikte media bestaan.

Dit artikel zal zich verder beperken tot de organische warmtetransportmedia, soms samengevat onder de naam „hete oliën”, hoewel het in de strikte betekenis van het woord niet alle oliën zijn. Van de beide genoemde groepen is een groot aantal verkrijgbaar.

5.1. Minerale oliën

De minerale oliën zijn produkten van de aardolie-industrie en als zodanig sterk verwant aan de brandstof- en smeeroïlen. Zij zijn uiteraard geselecteerd op hun thermische en chemische stabiliteit en vaak voorzien van dopes om deze eigenschap verder te verbeteren. Het zijn mengsels van koolwaterstoffen, zij hebben dus een kooktraject en worden niet in de dampfase gebruikt. De toepassing van minerale olie voor dit doel is al oud en was in het begin van deze eeuw reeds bekend. De laatste jaren heeft de toepassing echter een grote vlucht genomen, mede omdat de oliën tot de goedkoopste media behoren. Onderling zijn de oliën in de eerste plaats te onderscheiden naar hun vis-

Tabel 1. Dampdruk water

Temperatuur °C	Dampdruk ata
100	1
150	5
200	15
250	40
300	85
350	163

cositeit, de lichtere soorten met lage viscositeit en laag stolpunt hebben tevens een laag beginkookpunt dat al bij 220 °C kan liggen en zijn daarom alleen voor het lage temperatuurgebied geschikt. De voor hoge temperatuur geschikte oliën hebben ook een hogere viscositeit bij kamertemperatuur.

Naast deze algemene onderscheiding kunnen de oliën van nature nog in alifatische en aromatische oliën verdeeld worden. De aromatische oliën worden geacht een wat hogere thermische stabiliteit te hebben. Met uitzondering van de viscositeit liggen de stoffeïenschappen (b.v. η , λ) van alle oliën in een betrekkelijk nauw gebied.

Vrijwel alle bekende oliemaatschappijen brengen een aantal warmteoverdrachtsoliën in de handel. Tabel 2 geeft een lijst, die echter zeker niet volledig is; het aantal verkrijgbare oliën is meer dan tweemaal zo groot.

Tabel 2. Enige minerale oliën

Naam	Stolpunt °C	ν (20°C) $\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^6$ resp. cSt	Toepassing tot °C
B.P. Transcal 40	- 45	18	220
B.P. Transcal 65	- 12	85	320
B.P. Transcal 200	- 18	400	300
Esso Nuto H 32	- 51	8,5	220
Esso Zerice 37	- 46	33	300
Esso Standard 40	- 43	50	300
Esso Teresso 43	- 9	75	350
Esso Teresso 56	- 9	240	350
Esso Teresso 140	- 7	1700	350
Mobiltherm Light	- 28	8	230
Mobiltherm 600	- 7	230	320
Shell Thermia 11	- 55	9	230
Shell Thermia 27	- 9	90	320
Shell Thermia 45	- 26	460	320
Shell Voluta 72	- 10	720	225
Shell Nassa 89	- 1	5300	320

De in deze tabel genoemde toepassingsgrenzen behoeven, daar ze van verschillende fabrikanten afkomstig zijn, niet volgens dezelfde norm te zijn vastgesteld en zijn daarom niet zonder meer vergelijkbaar. De genoemde waarden van 350 °C bij voorbeeld zijn bedoeld als maximale film(wand)temperatuur, voor vele andere oliën is de waarde op gemiddelde vloeistoftemperatuur gebaseerd.

5.2. Synthetische vloeistoffen

Naast de minerale oliën is een aantal synthetische vloeistoffen tot toepassing gekomen. Deze geven een gevarieerder beeld dan de minerale oliën, daar ze chemisch onderling veel meer verschillen.

Enkele van deze vloeistoffen zijn tot wat hogere temperaturen toepasbaar dan de minerale oliën; ook vindt men binnen deze groep stoffen met gedefinieerd kookpunt die toepassing hebben gevonden in de dampfase. Het aantal verkrijgbare vloeistoffen is vrij groot, de toepassing van sommige is echter zeer beperkt gebleven. Tabel 3 geeft een overzicht van de meest toegepaste vloeistoffen.

Tabel 3. Enige synthetische warmtetransportmedia

Soortnaam	Enige handelsnamen	Stolpunt °C	Toepassing tot °C	
vlst. damp				
diphenyl-diphenyloxyde	Diphyl, Dow-therm A, Thermex, Gilotherm DO	12	256	400
ortho-dichloorbenzeen	Diphyl O, Dowtherm E	- 18	180	260
gechloreerde polyphenylen	Santotherm FR 0 tot 3, Clophen, Gilotherm DP 4	- 26 tot 10	315	
benzylbenzolen	Marlotherm S	- 35	350	
terphenylen	Santowax, Diphyl HT	- 34 tot 88	350	420
arylsilicaten	o.a. Santotherm 190, T.A.S. 190	- 29	360	

Zoals uit de tabel blijkt, zijn enige stoffen weer in verschillende graden verkrijgbaar, met oplopend stolpunt. Het aantal handelsnamen is aanzienlijk groter dan hier genoemd, daar er nog andere fabrikanten van dezelfde stoffen zijn en ook omdat sommige fabrikanten in verschillende landen ook verschillende benamingen gebruiken.

Andere, niet in de tabel genoemde vloeistoffen zijn onder meer glycolen en siliconen. Voor temperaturen beneden 150 °C zijn nog een hele reeks andere vloeistoffen bruikbaar, bij voorbeeld glycerine (hoge λ en c_p). De meeste stoffen uit de tabel (silicaten uitgezonderd) zijn toch in zoverre aan elkaar verwant, dat zij zijn opgebouwd uit benzeenringen.

Gezien het voor sommigen onbekende karakter van deze vloeistoffen, volgt hier wat nadere toelichting. Het diphenyl-diphenyloxyde, een eutectisch mengsel dat in de praktijk als een enkelvoudige stof kan worden opgevat, is reeds sinds de dertiger jaren bekend en één van de meest gebruikte synthetische vloeistoffen. Het hoge stolpunt kan een bezwaar zijn. Het kookpunt ligt vrij laag, de stof heeft echter intensief toepassing gevonden in dampvorm. De geur is vrij penetrant. Regeneratie is mogelijk.

Ortho-dichloorbenzeen wordt meer speciaal toegepast in dampvorm bij lagere temperaturen.

De gechloreerde polyphenylen bestaan in vrij groot aantal en hebben de laatste tijd relatief grote toepassing gevonden. Het zijn mengsels, verschillende graden zijn dus verkrijgbaar met oplopende dichtheid, stolpunt en viscositeit. De toepassing is bevorderd doordat zij praktisch niet brandbaar zijn.

Benzylbenzol heeft in dit gezelschap het duidelijke voordeel van een laag stolpunt en kan ook bij 300 °C nog drukloos worden toegepast. Regeneratie is mogelijk.

De terphenylen zijn thermisch zeer stabiel en kunnen tot hogere temperaturen worden toegepast dan de andere stoffen. De relatief hoge prijs heeft de toepassing tot nu toe beperkt.

Bij de arylsilicaten is alleen Santotherm 190 genoemd, maar ook binnen deze groep bestaan vrij veel vloeistoffen. Ook deze stof is over een groot gebied bruikbaar en geldt verder als moeilijk brandbaar. Toepassing tot nu toe vooral in de Verenigde Staten.

De in de dampfase gebruikte vloeistoffen kunnen in het aangegeven temperatuurgebied vanzelfsprekend ook in de vloeistoffase gebruikt worden, mits de bijbehorende druk in het systeem gehandhaafd wordt.

6. BESPREKING VAN DE EIGENSCHAPPEN, VERGELIJKING MET DE EISEN

Gezien het grote aantal vloeistoffen is het in het kader van dit verslag onmogelijk een volledige opsomming te geven van alle van belang zijnde eigenschappen, te meer daar een aantal ook temperatuurafhankelijk is. Hiervoor zij verwezen naar de brochures die de fabrikanten over hun produkten uitgeven.

Het in tabel 4 gegeven overzicht van enige stofconstanten kan echter representatief geacht worden voor de meest toegepaste vloeistoffen. Met water als vergelijkingsbasis zijn drie verschillende oliën genomen, oplopend in viscositeit, alsmede drie van de meest toegepaste synthetische vloeistoffen, die tevens onderling nogal verschillen. Men ziet duidelijk hoe superieur water is voor wat betreft c_p , λ en ρ . De minerale oliën verschillen praktisch gezien alleen in viscositeit; deze verschillen nemen bij toenemende temperatuur af. Tussen de synthetische stoffen zijn de verschillen wat groter. Er zij echter op gewezen dat, ondanks de verschillen in ρ en c_p , het produkt ρc_p (= soortelijke warmte per volume-eenheid) voor de verschillende vloeistoffen slechts weinig varieert.

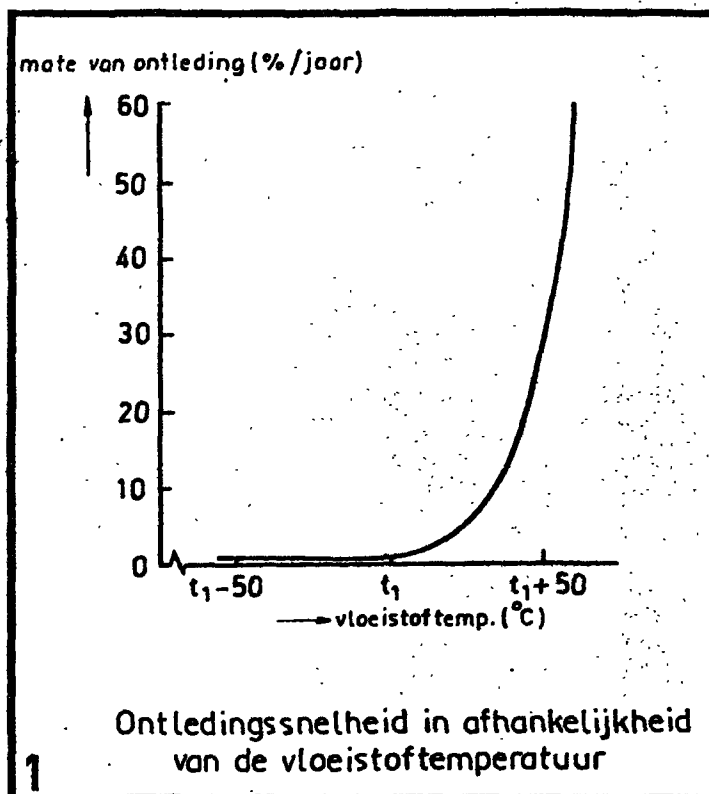
In de laatste kolom is dit weergegeven voor 20 °, bij hogere temperatuur worden de verschillen weer wat groter.

Een aantal andere van belang zijnde eigenschappen zal hierna besproken worden aan de hand van de eisen uit hoofdstuk 3.

6.1. Stabiliteit

De temperatuurbestendigheid is een van de belangrijkste punten bij de keuze van het warmtetransportmiddel. De fabrikanten geven vaak een maximale toepassingstemperatuur op, zie de tabellen 2 en 3. Sommige gebruikers hebben de neiging deze temperatuur als een grens te zien, waarbeneden de vloeistof onveranderd zou blijven en waarboven snelle ontleding plaatsvindt. Dit is niet juist daar deze organische stoffen ook bij lagere temperaturen reeds veranderingen ondergaan.

Zet men de mate van ontleding van een vloeistof in procenten per jaar uit ten opzichte van de vloeistoftemperatuur, zoals in *afb. 1*, dan krijgt men een lijn die aanvanke-



lijk nauwelijks, later zeer snel stijgt. De vuistregel dat 10 °C temperatuurverhoging de reactiesnelheid ongeveer verdubbelt, gaat namelijk ook hier op. Is t_1 de temperatuur waarbij 1 %/jaar ontleeft, wat vrijwel te verwaarlozen is, dan zal dit bij $t_1 + 50$ reeds ca. 30 % zijn en bij $t_1 + 53$ ca. 50 %, wat wel als een uiterste grens beschouwd moet worden. De temperatuur genoemd in de tabellen 1 en 2 is echter zeker niet t_1 . Wat dan wel, is niet met zekerheid te zeggen, daar een algemeen aanvaarde definitie van de temperatuurbestendigheid ontbreekt, maar aangenomen mag worden dat de genoemde temperaturen veel meer in de buurt van $t_1 + 50$ zullen liggen. Vooral nog is het dan ook beter te spreken van temperatuurgebieden. Voor de meeste vloeistoffen (oliën met laag beginkookpunt en enkele synthetische stoffen uitgezonderd), kan men zeggen dat tussen 250 en 300 °C het punt bereikt wordt waarop de ontleding werkelijk van belang gaat worden en dat ca. 50 °C hoger, dus tussen 300 en 350 °C de grens van economische toepassing wordt bereikt.

Tabel 4. Stofconstanten van enige warmtetransportmedia

	μ m ² s.10 ⁻⁶ of cSt			λ W/mK			ρ kg/m ³			c_p J/kgK			ρc_p J/m ³ K. 10 ⁻⁶
	20 °	200 °	300 °	20 °	200 °	300 °	20 °	200 °	300 °	20 °	200 °	300 °	20 °
Water	1,00	0,158	0,130	0,595	0,652	0,540	998	865	712	4180	4500	5850	4,18
Minerale olie A	10	0,58	—	0,130	0,117	—	880	770	—	1880	2580	—	1,66
Minerale olie B	130	1,4	0,60	0,131	0,117	0,110	870	755	685	1900	2590	2990	1,65
Minerale olie C	520	1,6	0,65	0,126	0,114	0,107	900	795	730	1860	2550	2955	1,67
Dowtherm A	4,1	0,44	0,27	0,120	0,113	0,097	1060	911	823	1550	2400	2760	1,64
Marlotherm S	34	0,98	0,50	0,131	0,119	0,112	1030	903	827	1590	2220	2500	1,64
Santotherm FR 2*)	1000	0,85	0,40	0,101	0,097	0,093	1455	1272	1170	1090	1320	1440	1,58

*) Inmiddels is Santotherm om milieuhygiënische redenen uit de handel genomen. Vergelijkbare produkten van andere fabrikanten zijn echter nog verkrijgbaar.

Voor toepassingen in de buurt van deze bovengrens zou men, om tot een verantwoorde keuze tussen de diverse stoffen te komen, dienen te beschikken over exacte gegevens waaruit de mate van ontleding ten opzichte van de temperatuur blijkt. Het zijn deze gegevens die in de, overigens vrij volledige, brochures van de fabrikanten veelal ontbreken, zodat een vergelijking op dit punt momenteel nog niet mogelijk is.

De in de vloeistoffen met de tijd optredende veranderingen maken zich onder andere kenbaar door stijging van viscositeit, dampspanning en soms zuurgraad en kunnen dus gemeten worden. Vaak nemen de leveranciers het op zich monsters te onderzoeken om te kunnen beoordelen of vernieuwing nodig is. Is dit het geval, dan rijst soms de vraag hoe van de onbruikbare vloeistof af te komen als de fabrikant deze niet terugneemt. Voor olie zijn er meestal wel wegen via bedrijven die afgewerkte olie verzamelen; is men daarop ingericht, dan kan de olie ook verbrand worden.

Voor synthetische vloeistoffen wordt verbranden al moeilijker en vereist meer deskundigheid, daarentegen kunnen sommige van deze stoffen geregenereerd worden. De vrijwel onbrandbare gechloreerde polyphenylen zijn recentelijk in het nieuws gekomen door hun funeste invloed op een aantal levende organismen, zodat deze in elk geval buiten het milieu gehouden dienen te worden.

6.2. Overige hanteerbaarheidseisen

De dampdruk verschilt sterk per stof en hangt voor de in verschillende graden verkrijgbare vloeistoffen mede af van de viscositeit. Tot 350 °C is er echter nog keuze uit diverse vloeistoffen die drukloos kunnen worden toegepast. Daarboven komen diphenyl-diphenyloxyde en terphenylen onder druk in aanmerking. Bij 400 °C bedraagt bij voorbeeld de dampdruk voor Dowtherm A ca. 10 ata.

Het stolpunt varieert eveneens nogal en is reeds in de tabellen 2 en 3 vermeld. De meerderheid van de vloeistoffen is bij kamertemperatuur nog bruikbaar. Voor de praktijk is naast het stolpunt de temperatuur waarbij de vloeistof nog goed verpompbaar is van belang. Dit is bij ca. 400 - 2000 cSt het geval, enigszins afhankelijk van het pompsysteem.

Over het algemeen ligt deze verpompings temperatuur enige tientallen graden boven het stolpunt, uitgezonderd bij diphenyl-diphenyloxyde, waar beide temperaturen praktisch samenvallen.

Wat de corrosiviteit betreft, kunnen de minerale oliën als niet corrosief worden beschouwd. Dit heeft de toepassing zelfs ten zeerste bevorderd. Zoals bekend moet koper echter worden vermeden vanwege zijn katalytische werking.

Bij de synthetische stoffen kunnen de gebruikelijke staalsoorten zonder bezwaar worden toegepast, naast koper zijn bij diverse stoffen echter ook zink, aluminium, magnesium en titanium ongewenst. Over het algemeen is bij deze synthetische stoffen bij toepassing van non-ferro metalen voorzichtigheid geboden en dient zo nodig advies gevraagd te worden van de fabrikant.

Bij eventuele ontleding kunnen soms wel stoffen ontstaan die corrosief zijn, bij gechloreerde koolwaterstoffen bij voorbeeld zoutzuur en hiermee werkende systemen moeten absoluut vrij van water worden gehouden.

6.3. Veiligheid

De genoemde warmtetransportvloeistoffen zijn geen van alle vergiften, maar voorzichtigheid blijft toch geboden,

zeker als contact met voedingsmiddelen mogelijk is. Het meest onverdacht in dit opzicht zijn de minerale oliën.

De gechloreerde polyphenylen, hiervoor reeds ter sprake gekomen, zijn licht toxisch. Bij vrijwel alle synthetische vloeistoffen is langdurig huidcontact ongewenst. De penetrante geur van een aantal van deze media is welbekend, soms zijn ze in concentraties van enkele ppm's al goed te ruiken, wat op zichzelf ongevaarlijk is maar wel aanleiding kan geven tot klachten.

Met uitzondering van de wel ontvlambare maar vrijwel niet brandbare gechloreerde polyphenylen en de moeilijk brandbare silicaten zijn alle hier genoemde media brandbaar. In de brochures van de fabrikanten zijn meestal vlampunt en zelfontstekings temperatuur opgenomen, deze liggen voor de synthetische media over het algemeen hoger dan voor de minerale oliën. De waarde van het vlampunt is voor de praktijk echter betrekkelijk, aangezien, indien eenmaal een ontstekingsbron aanwezig is, de temperatuur daarvan meestal ver boven het vlampunt zal liggen. De meeste stoffen worden dan ook boven hun vlampunt gebruikt. Belangrijker voor de praktijk is de zelfontstekings temperatuur die in het geding komt bij het plotseling ontstaan van lekken. Deze is globaal:

voor minerale oliën: 300 - 400 °

voor synthetische vloeistoffen: > 500 °C

De zelfontstekings temperatuur kan sterk verlaagd worden indien de vloeistof in intensief contact is met lucht, bij voorbeeld bij absorptie in isolatie of poetskatoen. Hierdoor zijn wel brandjes ontstaan.

Ook bij toepassing van niet-brandbare vloeistof is toch een latent gevaar aanwezig. Een met vloeistof van hoge temperatuur gevuld systeem vertegenwoordigt, nu eenmaal een aanzienlijke hoeveelheid potentiële energie, die bij calamiteiten wel degelijk schade kan aanrichten.

7. TRANSPORTEIGENSCHAPPEN

De vergelijking voor de door het systeem getransporteerde hoeveelheid warmte is:

$$Q = G c_p \Delta t$$

en daar $V = \frac{G}{\rho}$ volgt:
$$V = \frac{Q}{\rho c_p \Delta t}$$

Wil men de diverse vloeistoffen op dit punt onderling vergelijken, dan dienen Q en Δt constant gehouden te worden, zodat geldt:

$$V = \frac{C}{\rho c_p}$$

Hiermee kan de verhouding van de te transporteren volumina (V) en, bij gelijke pijpdiameter, ook van de snelheden (v), worden bepaald. Nu is, zoals reeds eerder bleek, de variatie in ρc_p niet bijzonder groot (zie tabel 4).

Tabel 5 geeft een indruk van de verhoudingen tussen de volumina, resp. snelheden, waarbij water bij 200 °C als

Tabel 5. Verhouding V, resp. v, bij constante Q en Δt

Vloeistof	t = 200 °C	t = 300 °C
Water	100	94
Olie A	195	—
Olie B	198	191
Olie C	193	182
Dowtherm A	179	172
Marlotherm S	194	189
Santotherm FR 2	233	230

vergelijkingsbasis op 100 is gesteld. Dezelfde vloeistoffen als in tabel 4 zijn gekozen en de vergelijking werd opgesteld voor 200 °C en 300 °C, aangezien hiertussen wel het belangrijkste toepassingsgebied ligt.

Gemiddeld moet tweemaal zoveel getransporteerd worden vergeleken met water. De grootste onderlinge verschillen vindt men bij de synthetische vloeistoffen.

Belangrijker dan deze verhouding is die van het voor transport op te brengen vermogen.

Uit:

$$\Delta p = f \frac{\rho v^2}{2} \frac{l}{d}$$

kan, bij gelijkblijvende geometrie, berekend worden:

$$\Delta p = \frac{C f}{\rho c_p^2}$$

Voor Re-getallen groter dan 10^5 , die bij de hogere temperaturen vaak zullen voorkomen, kan voor handelspijp f als constant worden beschouwd en gaat bovenstaande betrekking over in:

$$\Delta p = \frac{C}{\rho c_p^2}$$

Voor lagere Re-getallen kan men afleiden:

$$\Delta p = \frac{C v^{0.2}}{\rho^{1.8} c_p^{1.8}}$$

en heeft de viscositeit een zekere invloed, die echter pas duidelijk merkbaar wordt in het lage temperatuurgebied.

Daar: $N = V \Delta p$

volgt voor een constante f :

$$N = \frac{C}{\rho^2 c_p^3}$$

en voor $Re < 10^5$: $N = \frac{C v^{0.2}}{\rho^{1.8} c_p^{2.8}}$

Daar ρc_p weinig uiteenloopt, ziet men dat vooral een hoge c_p van belang is. De wel gehoorde bewering dat een lage ρ belangrijk is voor een laag transportvermogen gaat alleen op als men kubieke meters wil verplaatsen; de bedoeling van een warmtetransportsysteem is echter het verplaatsen van Joules. De verhouding van de voor de diverse vloeistoffen op te brengen vermogens is weergegeven in tabel 6; ditmaal ook voor $t = 20$ °C, in verband met het starten van een installatie vanuit koude toestand. Voor 200 °C en 300 °C is uitgegaan van constante f , voor 20 °C is ook de viscositeitsinvloed in rekening gebracht, daar juist hier de verschillen in ν groot zijn en Re laag. Water van 200 °C is weer als vergelijkingsbasis op 100 gesteld.

Tabel 6. Verhouding N , bij constante Q , Δt , l en d

Vloeistof	$t =$ 20 °C	$t =$ 200 °C	$t =$ 300 °C
Water	140	100	70
Olie A	3500	660	—
Olie B	6400	680	550
Olie C	—	660	505
Dowtherm A	3600	600	480
Marlotherm S	5600	770	645
Santotherm FR 2	—	1830	1650

Het toe te passen vermogen is aanmerkelijk groter dan voor water. Bij de hogere temperaturen ontlopen de oliën elkaar niet veel, tussen de synthetische media komen echter grote verschillen voor.

Bij kamertemperatuur zijn de verschillen met water zeer groot; een vergelijking voor constante Q heeft dan overigens niet veel zin en dit betekent dan ook niet dat dit vermogen geïnstalleerd zou moeten worden, maar men zal met een lagere snelheid genoegen moeten nemen of een deel van het circuit moeten kortsluiten. Het vermogen kan uiteraard verminderd worden door ten opzichte van water een grotere pijpdiameter toe te passen. In het voorgaande is uitgegaan van gelijkblijvende l . Dit gaat op voor het eigenlijke transportgedeelte, maar in het warmteoverdragend deel kunnen uiteraard verschillen in l ontstaan in verband met verschillen in warmteoverdracht tussen de diverse stoffen.

Tenslotte dient men zich te realiseren dat voor veel kleine installaties het transportvermogen een relatief klein deel van de bedrijfskosten uitmaakt.

8. WARMTEOVERDRACHTSEIGENSCHAPPEN

8.1 Vloeistoftoeëpassing

De warmteoverdracht kan berekend worden met de bekende formules van het type $Nu = C Re^m Pr^n$, eventueel aangevuld met correctiefactoren. Er bestaan verschillende formules voor verschillende typen van warmteoverdracht, maar daar gedwongen convectorie in pijpen bij deze systemen vaak voorkomt, is een hiervoor geldende formule als basis voor de vergelijking genomen.

Uit de formule $Nu = C Re^{0.8} Pr^{1/3}$

volgt:

$$\alpha = C \frac{v^{0.8}}{d^{0.2}} \frac{\lambda^{2/3} (\rho c_p)^{1/3}}{\nu^{0.47}} \quad (1)$$

Bij gelijke d en v volgt dan:

$$\alpha = \frac{C \lambda^{2/3} (\rho c_p)^{1/3}}{\nu^{0.47}} \quad (2)$$

Hiermee kunnen de verschillende vloeistoffen onderling vergeleken worden. Dergelijke berekeningen kunnen ook worden opgezet voor constante Δp of constante N , maar voor de praktijk belangrijker lijkt een vergelijking voor constante Q , zoals hiervoor uitgevoerd voor de verhouding van N .

De verschillen in transportvermogen komen op deze wijze ook in de warmteoverdracht tot uiting. Vloeistoffen met minder goed transportvermogen, waarvan dus meer getransporteerd moet worden, zullen immers bij gelijke d een hogere v hebben, wat α ten goede komt. Substitueren wij in formule (1) v (zie hoofdstuk 7), dan volgt:

$$\alpha = \frac{C \lambda^{2/3}}{\nu^{0.47} (\rho c_p)^{0.47}} \quad (3)$$

De factor ρc_p heeft nu dus een omgekeerde invloed als bij formule (2), maar daar de verschillen, evenals die in λ ,

niet groot zijn, hangt α toch in hoofdzaak van v af.

Tabel 7 geeft de verhouding van de warmteoverdrachtscoëfficiënten bij 200 °C en 300 °C, berekend zowel voor gelijke v als voor gelijke Q (respectievelijk de formules (2) en (3)). Voor dit laatste geval geldt dus tevens de verhouding van N , gegeven in tabel 6.

Tabel 7. Verhouding α bij constante d

Vloeistof	Bij gelijke v		Bij gelijke Q	
	200 °C	300 °C	200 °C	300 °C
Water	100	99	100	93
Olie A	13,3	—	23,0	—
Olie B	8,5	12,8	15,0	21,4
Olie C	7,9	12,3	13,5	19,8
Dowtherm A	15,4	17,3	24,8	30,5
Marlotherm S	10,3	14,2	17,9	23,7
Santotherm FR 2	9,2	12,9	18,0	25,8

Zonder meer is duidelijk dat water niet alleen als warmte-transportmiddel maar ook als warmteoverdrachtsmiddel onovertroffen is, vooral bij wat lagere temperaturen. Ook diphenyl-diphenyloxyde blijkt een naar verhouding goed middel. Voor de warmteoverdracht maakt het inderdaad wel uit welke vloeistof men kiest. Gemiddeld zijn bij wat hogere temperaturen de synthetische media licht in het voordeel ten opzichte van oliën. Bij 300 °C is de warmteoverdracht verder ca. 40 % hoger dan bij 200 °C, dit in tegenstelling met water.

Om de orde van grootte te kunnen bepalen; de warmteoverdrachtscoëfficiënt van water beweegt zich bij de gebruikelijke snelheden (1 — 2,5 m/s) en temperaturen van 200 °C à 300 °C tussen 5.000 en 10.000 W/m² K. Met deze thermische vloeistoffen kan hiervan worden bereikt;

bij 200 °C : 15 à 20 %

bij 300 °C : 20 à 30 %

Ogenschijnlijk staan de diverse warmtetransportmedia

aanzienlijk achter bij water en moet men het grote voordeel van het drukloze systeem bekopen met niet alleen een aanzienlijk groter pompvermogen maar ook met een groter V.O. In de praktijk valt dit laatste om diverse redenen vaak wel mee.

In de eerste plaats bestaat soms de mogelijkheid aan de mediumzijde de lagere α te compenseren door een hogere Δt . Dit is het geval als het warmteoverdrachtsproces zich bij relatief lage temperaturen afspeelt.

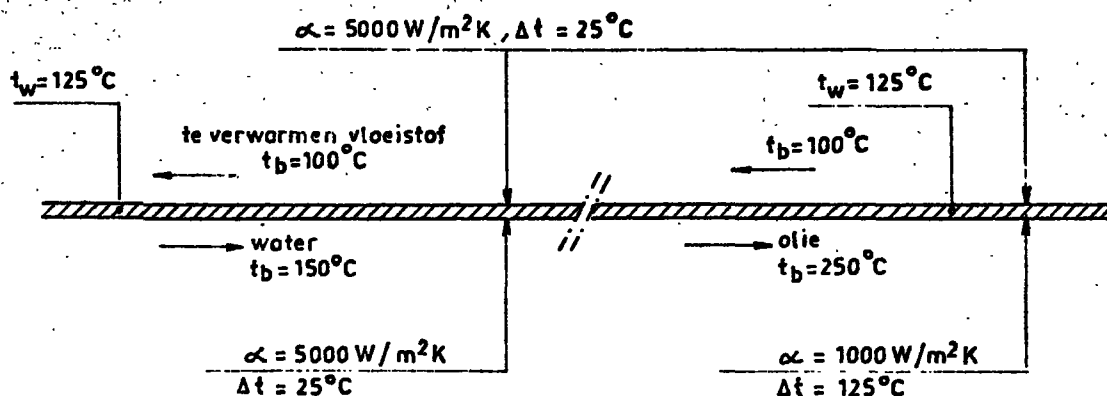
In *afb. 2* is α aan beide zijden gelijk. Verwarming geschiedt door water onder druk (5 ata). De wandtemperatuur is in dit geval 125 °C. Gaat men over op een drukloos systeem met olie, dan kan α aan de mediumzijde tot 20 % van die van water dalen, dus tot 100 W/m² K. Dit kan in dit geval echter eenvoudig gecompenseerd worden door de olietemperatuur op 250 °C te brengen. De wandtemperatuur blijft dan 125 °C, zodat er aan de zijde van de te verwarmen vloeistof niets verandert, aan de mediumzijde is α vijfmaal zo hoog geworden. Daar 250 °C niet bijzonder hoog is, valt eenvoudig in te zien dat door verdere verhoging van de olietemperatuur zelfs een hogere warmteoverdracht bereikt kan worden dan voorheen met water, mits het te verwarmen produkt de dan hogere wandtemperatuur kan verdragen. Indien voor de overgang op olie de toegepaste temperaturen reeds hoog waren, gaat dit uiteraard niet op.

Een tweede vaak voorkomende situatie is dat aan de produktzijde α veel lager is, bijv. doordat verwarming daar door vrije convectie geschiedt. In een dergelijke situatie is de laagste α bepalend voor de totale warmtedoorgangscoefficiënt k . In *afb. 3* ziet men dat aan de produktzijde α een factor 10 lager is, een situatie die bij dit soort verwarming vaak voorkomt, de k -waarde is in dit geval dan ook slechts

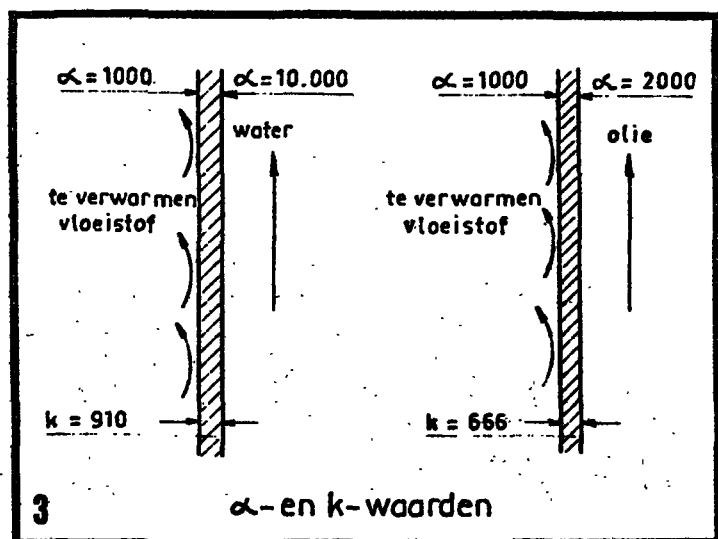
$$\frac{1}{\frac{1}{10.000} + \frac{1}{1.000}} = 910 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Gaat men hier over op olie, waardoor α aan de medium-

2



Compensatie lagere α door hogere Δt



zijde van 10.000 op bijv. 2000 W/m² K komt, dan daalt de k-waarde slechts tot 666 W/m² K. Toch zal het V.O. nu ca. 37 % groter moeten worden, maar vaak kan door een betrekkelijk kleine verhoging van de olietemperatuur deze schade verder worden beperkt.

Tenslotte zij erop gewezen, dat de lagere warmteoverdracht ten opzichte van water, soms in een voordeel kan verkeren als namelijk een zeer goede regelbaarheid wordt vereist.

8.2. Damptoepassing

Slechts enkele synthetische vloeistoffen zijn geschikt voor toepassing in dampvorm. Verreweg de meeste toepassing heeft het diphenyl-diphenyloxyde gevonden. Voordelen van dampsystemen zijn:

1. Warmteoverdracht bij vrijwel constante temperatuur over groot oppervlak.
2. Vrijwel constante α , ook bij gecompliceerd gevormde oppervlakken (mits condensaat goed wordt afgevoerd).
3. Groter warmtetransport per kg medium.

Nadelen zijn:

1. Systeem is niet meer drukloos.
2. Systeem is gecompliceerder. Voorzieningen voor scheiding damp — condensaat zijn nodig, regeling en veiligheid stellen hogere eisen.

De drukken in thermische vloeistofsystemen werkend met damp zijn vrij laag. Voor diphenyl-diphenyloxyde is de dampdruk bijvoorbeeld 3,5 ata bij 320 °C en 10 ata bij 400 °C. In dit opzicht is een dergelijk systeem dus aanzienlijk eenvoudiger en goedkoper dan een hogedruk-stoomsysteem. In het toepassingsgebied 250 — 400 °C is de verdampingswarmte gemiddeld 1/5 van die van water, de warmteoverdrachtscoëfficiënt bij condensatie is dan ook veel lager. Deze ligt in dezelfde orde van grootte en is vaak zelfs lager dan bij gedwongen convectie in de vloeistoffase. In stoomsystemen kunnen α -waarden van 10.000 — 30.000 W/m² K voorkomen, maar bij diphenyl-diphenyloxyde zal α over het algemeen niet hoger dan 1000 — 2000 W/m² K zijn.

9. VUURHAARDBELASTING EN MAXIMALE WANDTEMPERATUUR

De verhitter of ketel vormt het hart van de installatie en de daarin optredende omstandigheden zijn bepalend voor de levensduur van de vloeistof. Hoewel het niet onmogelijk is (en in Nederland zelfs toegepast!) om de vloeistof in een

centrale-verwarmingsketel te verhitten, worden meestal speciaal voor dit doel gebouwde ketels gebruikt. Deze zijn vrijwel alle geconstrueerd als doorstroomverhitters en hiervan mag verwacht worden dat het verschil tussen wand- en vloeistoftemperatuur ($t_w - t_b$) niet al te groot is. Het is namelijk t_w die bepalend is voor de levensduur van de vloeistof, daar in de grenslaag langs de wand een deel van de vloeistof tot deze temperatuur wordt verhit.

De opgegeven warmtebelasting voor deze toestellen ligt meestal tussen 15 en 30 kW/m². Voor een pijp met $d = 5$ cm, $v = 3,5$ m/s en $t_b = 300$ °C, zal met een gemiddelde olie α ca. 2000 W/m² K bedragen, zodat berekend kan worden: $t_w - t_b = \frac{30.000}{2.000} = 15$ °C.

Is de maximum toelaatbare olietemperatuur 320 °C, dan kan t_b maximaal dus 320 — 15 = 305 °C zijn. Het valt echter te vrezen dat de opgegeven belastingen slechts gemiddelden zijn, hetzij voor het gehele V.O., hetzij voor het vuurhaardgedeelte. Voor de berekening van de werkelijke maximale t_w zou men ook de maximale belasting in het vuurhaardgedeelte dienen te weten, maar bij gebrek aan nauwkeurige, hierop gerichte metingen, zullen de fabrikanten veelal niet in staat zijn dit gegeven te verschaffen.

Men hoeft echter niet geheel in het duister te tasten, daar de belastingverschillen in het vuurhaardgedeelte hoofdzakelijk te wijten zijn aan het verloop van gasstraling en gastemperatuur. Men kan dus bij benadering gebruik maken van de beschikbare meetgegevens van overeenkomstige waterketels. Daaruit kan geconcludeerd worden dat bij een gemiddelde belasting van 30 kW/m² en bij het stoken met lichte olie een maximale belasting, van ca. 60 kW/m² niet denkbeeldig is, waarbij dan $t_w - t_b$ dus $\frac{60.000}{2.000} = 30$ °C

zou worden en de maximale t_b : 320 — 30 = 290 °C. Voor aardgas komt dit wat gunstiger te liggen.

Het is mogelijk tot veel hogere belastingen te komen; bij directe straling van een zware-olievlam op een pijpenscherm zijn wel belastingen van 200 kW/m² gemeten, zodat $t_w - t_b = 100$ °C zou zijn. In een dergelijk geval zal afscherming moeten worden toegepast. Een andere mogelijkheid om de consequenties van hoge belastingen te beperken is bijvoorbeeld verhoging van de snelheid. Daar $a \propto v^{0,8}$, zal verdubbeling van de snelheid uit het voorbeeld tot 7 m/s dan α op 3500 W/m² K brengen en $t_w - t_b$ wordt bij een belasting van 60 kW/m² dan 17 °C. Verder kan ook de koudere reroutolie in het hoogst belaste gedeelte toegevoerd worden, wat dan meestal neerkomt op gelijkstroom van olie en gassen in het vuurhaardgedeelte. Het zal duidelijk zijn dat voor toepassingen tegen de grens van de maximale vloeistoftemperatuur er een grote behoefte bestaat aan betrouwbare, door metingen bevestigde cijfers, over de maximaal in thermische vloeistofverhitters optredende belastingen.

Een geheel andere situatie waarin soms ook de maximale wandtemperatuur van belang kan zijn, is de „koude start” van een installatie met een vloeistof van hoge viscositeit. Door de lage Re-getallen die dan optreden, zal α vaak niet hoger zijn dan 50 à 100 W/m² K. Voor een ongunstig geval, met $\alpha = 50$ W/m² K, $t_b = 20$ °C en maximale olietemperatuur = $t_w = 320$ °C wordt dan de maximale belasting die bij het starten mag optreden 50 (320-20) = 15 kW/m², zodat in elk geval op laag vermogen moet worden gestart.

10. SLOTBESCHOUWING

Uit het voorgaande moge duidelijk zijn geworden dat de diverse organische media die op de markt zijn, bij een verantwoorde keuze, het betrekkelijk eenvoudig maken tot temperaturen van maximaal 300 ° à 350 °C een ongecompliceerd en drukloos warmtetransportsysteem te bedrijven dat uitstekende regelmogelijkheden bezit. Dit zijn niet te onderschatten voordelen. Men dient zich echter bewust te zijn van zekere beperkingen op het gebied van de warmteoverdracht, vergeleken met de meer vertrouwde toepassing van water. Hoewel over het algemeen van de zijde van de vloeistofleveranciers redelijk voldoende informatie over dit punt wordt verstrekt, zijn toch teleurstellingen op dit gebied niet uitgebleven.

Een aantal argeloze gebruikers is buiten hun medeweten gered door het feit dat aan hun produktzijde α zo laag was, dat de k-waarde, na overgang op thermische vloeistof, nauwelijks gewijzigd was. De fabrikant echter, die een stoomsysteem in gebruik had voor het verdampen van vloeistof en zonder wijziging van het V.O. overging op thermische olie, werd zich van de beperkingen van deze vloeistof pijnlijk bewust.

Een wel voorkomende fout is dat men, uit een wat overdreven angst voor ontleding van de vloeistof, een zware, voor hoge temperaturen geschikt zijnde kwaliteit thermische vloeistof kiest voor gebruik in een systeem dat bij vrij lage temperaturen werkt. Aldus verspilt men onnodig pompver-

mogen en doet zich op het gebied van de warmteoverdracht tekort. Bovendien is juist bij deze vloeistoffen ontleding bij „koude start” (zie hoofdstuk 9) niet denkbeeldig.

Een argument dat van verschillende zijde gehanteerd wordt ter bevordering van de toepassing van deze media, is dat geen controle door het Stoomwezen meer vereist is. Dit argument kan correct zijn als bedoeld wordt dat niet op ongelegen momenten het systeem voor controle moet worden stilgelegd, vooral bij toepassing op schepen is dit van groot voordeel. Indien echter op de achtergrond de gedachte meespeelt dat, nu niet aan zekere voorschriften behoeft te worden voldaan, de uitvoering van het systeem er ook niet zo op aan komt, dan is dit argument te veroordelen en kan dit op langere termijn de toepassing van deze media slechts schaden. Ook al is de installatie drukloos, de temperaturen zijn toch zodanig dat een latent gevaar altijd aanwezig is en deugdelijke constructieve en veiligheidseisen in acht genomen dienen te worden.

Voor die toepassingen tenslotte, die bij de bovengrens van het toepassingsgebied liggen, en die in de toekomst steeds belangrijker zullen worden, zou het van groot belang zijn als van de zijde van de vloeistofleveranciers meer feitelijke en in onduidelijke cijfers uitgedrukte informatie werd verstrekt over het verband tussen vloeistoftemperatuur en mate van ontleding en van de zijde van de ketelfabrikanten over de in hun toestellen werkelijk optredende maximale wandbelastingen.

LITERATUUR

Bouwman, H. B.

„Aspecten en warmteoverdracht met hete oliën ten opzichte van enkele andere media”

De Ingenieur, 80, 6 september 1968

Claus, J.

„In de praktijk optredende wandbelastingen en vuurhaard-eindtemperaturen in vuurgangvlampijpketels”

3te Vakantie-Leergang voor Warmtetechniek. 1969.

Geiringer, P. L.

Handbook of Heat Transfer Media

New York, 1962

Rottenburg, P. A.

„Heat transfer media for use at elevated temperatures”

Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 35, 1957

Szymkowick, J. R.

„Polyphenyle als Wärmeträger”

De Ingenieur, 6 sept. 1968

Winkoop, G. van

„Het verwarmen met behulp van thermische vloeistoffen”

Verwarming en Ventilatie, aug. 1968

V.D.I.

Wärmeübertragungsanlagen

V.D.I.-Berichte Nr. 153, Düsseldorf 1970

Diverse brochures van fabrikanten van warmtetransportmedia en thermische-vloeistof-verhitters.

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

d	- diameter	m
l	- (pijp)lengte	m
v	- snelheid	m/s
t	- temperatuur	K, °C
Δt	- temperatuurverschil	K, °C
t_w	- wandtemperatuur	K, °C
t_b	- bulktemperatuur	K, °C
Δp	- drukverlies	N/m ²
ρ	- dichtheid	kg/m ³
c_p	- soortelijke warmte	J/kg K
λ	- warmtegeleidingscoëfficiënt	W/m K
ν	- kinematische viscositeit	m ² /s, cSt
G	- massastroom	kg/s
V	- volumestroom	m ³ /s
Q	- capaciteit, warmtehoeveelheid	W
N	- vermogen	W
α	- warmteoverdrachtscoëfficiënt	W/m ² K
k	- warmtedoorgangscóëfficiënt	W/m ² K
f	- wrijvingscoëfficiënt	
C	- constante	
Re	- kengetal van Reynolds	
Pr	- kengetal van Prandtl	
Nu	- kengetal van Nusselt	