

Tekst Ing. Stefano Filippini

Technisch Manager LU-VE S.p.A. Italië

Nieuwe ontwikkeling van luchtgekoelde gevinde warmtewisselaars voor CO₂-toepassingen

In de koudetechniek lijkt het gebruik van CO₂ dé oplossing om het broeikas-effect te elimineren van de gehalogeneerde koolwaterstoffen die behoren tot de categorie HFK's. Nu de haalbaarheid van deze techniek is bewezen, hebben technici steeds meer inzicht in het gedrag van dit koudemiddel en de mogelijkheid om energie-efficiëntere installaties te ontwerpen die economisch kunnen concurreren met traditionele HFK-installaties. De juiste keuze van de warmtewisselaartechnologie is een voorwaarde voor het verkrijgen van COP-waarden waarmee een daadwerkelijke vermindering van het broeikas-effect wordt bereikt.

Een eis om een hoge efficiëntie in een warmtewisselaar te bereiken is dat er speciale prestatietesten kunnen worden uitgevoerd. Dit onderzoek is nu mogelijk met behulp van de nieuwe testapparatuur, gebouwd in de laboratoria van de onderneming die het gedrag van gevinde warmtewisselaars voor CO₂ nauwkeurig meten voor zowel verdamper als gaskoelers voor trans- én subkritisch bedrijf.

Voordat we kijken naar de uitdagingen met betrekking tot warmtewisselaars, moeten de mogelijke methoden van CO₂-gebruik in koelapparatuur en de aspecten met betrekking tot de thermodynamische kringloop worden onderzocht. Er zijn drie mogelijke oplossingen (zie de afbeelding hiernaast):

- De eenvoudigste – met een normale koelkringloop werkend met CO₂ (links) – is de moeilijkste uit het oogpunt van de toepassing: de lage kritische temperatuur van het CO₂ reageert zodanig dat, om warmteoverdracht naar de omgevingslucht tot stand te brengen, de

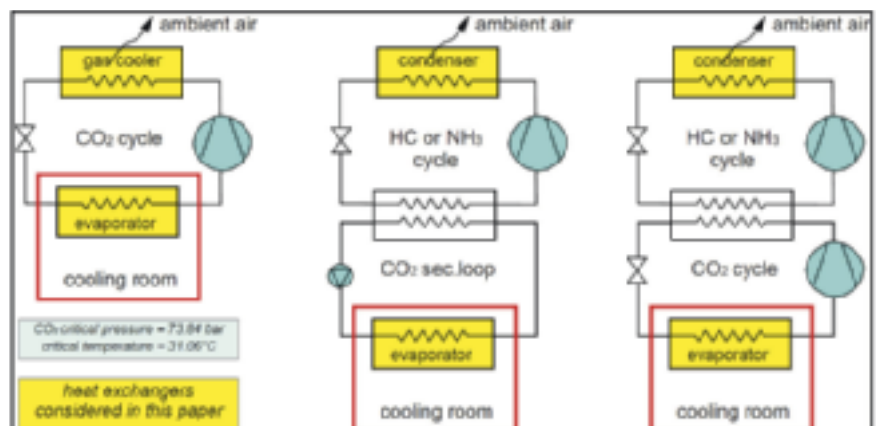
superkritische kringloop zou moeten worden gebruikt, met een hogere druk dan gebruikelijk. De warmtewisselaar die wordt gebruikt om de hogedruk-CO₂ af te koelen wordt gaskoeler genoemd.

- In de kringloop in het midden wordt vloeibare CO₂ geproduceerd door de verdamping van een ander koudemiddel in een aparte koelkringloop; dit systeem levert koude aan verdamper die de koellast moet afvoeren; de circulatie wordt in stand gehou-

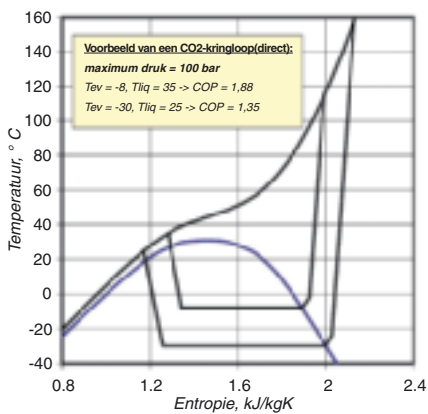
den door een eenvoudige pomp.

- De derde oplossing omvat een cascade-koelkringloop: er is een hogetemperatuurkringloop die als condensor fungeert voor de laagtemperatuurkringloop die met CO₂ werkt. In dit geval werkt de CO₂ niet met hoge druk omdat het de facto condenseert bij een temperatuur dicht bij de verdamping van de eerste kringloop.

Alle gevallen vereisen een CO₂-verdamper werkend bij matige druk. De CO₂-condensoren van de kringlopen 2 en 3 zijn niet van belang aangezien zij niet met lucht werken. Bij kringloop 1 vertegenwoordigt de gaskoeler een innovatief apparaat. Om de werking te begrijpen moet worden verwezen naar de thermodynamische kringloop van een CO₂-koelinstallatie zoals in het eerste schema van de afbeelding hiervoor. De vorm



Mogelijke toepassingen van CO₂ in koelinstallaties.



CO₂-koelkringloop.

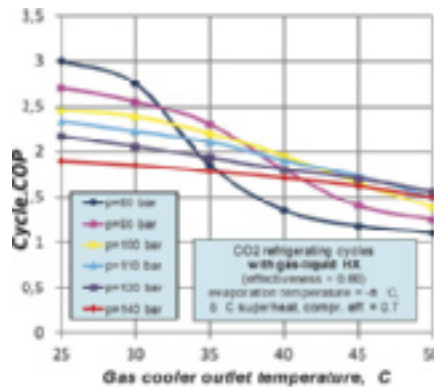
van de kringloop, getoond in de afbeelding hierboven, wijkt af van die van een conventionele kringloop die condenseert bij constante temperatuur. Om de warmte naar de omgevingslucht bij een voldoende hoge temperatuur over te dragen, is de maximale druk bovenkritisch: 73,84 bar en is sprake van zeer hoge eindcompressietemperaturen.

Uitgaand van de verdampingstemperatuur zoals aangegeven worden de prestaties van een koelkringloop bepaald door:

- maximale kringloopdruk bij de persdrukkuitrede van de compressor
- vloeistoftemperatuur aan de gaskoelertuitrede
- compressor-efficiëntie (altijd ingesteld op 70 procent)
- effectiviteit van de gas/vloeistof (GLHX-)wisselaar (ingesteld op 0,6 indien aanwezig)
- oververhitting van het gas bij de inlaat van de compressor (6 K)

De thermodynamische eigenschappen van CO₂ die worden gebruikt in dit onderzoek zijn afkomstig van Refprop. De invloed van de eerste twee parameters op de COP wordt getoond in middelste en rechterafbeelding bovenaan de pagina, voor een verdampingstemperatuur van -8 °C met of zonder GLHX.

De gaskoelertuitredetemperatuur is de fundamentele parameter die de COP en optimale druk beïnvloedt.



Prestaties van CO₂, kringloop zonder GLHX (verdampingstemperatuur = -8 °C).

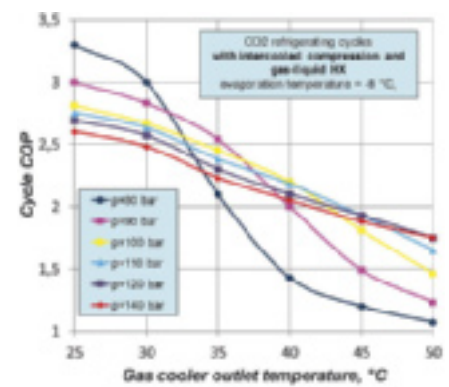
In de grafieken is duidelijk te zien dat bij een dergelijke gaskoelertuitredetemperatuur een bepaalde druk bestaat die de COP maximaliseert. Dit verschijnsel komt niet voor bij een kringloop die werkt met conventionele koudemiddelen. Daarvoor geldt: hoe lager de condensatiedruk des te hoger de COP. Het blijkt ook dat de aanwezigheid van de GLHX de COP duidelijk verbetert. Soortgelijke resultaten worden gevonden voor verschillende verdampingstemperaturen. Dus de uittredetemperatuur van de gaskoeler is een fundamentele parameter van de kringloop en vormt de belangrijkste specificatie voor het warmtewisselaarontwerp.

Testapparatuur

De testapparatuur bestaat uit een klimaatkamer met een constante temperatuur. De te testen warmtewisselaar (verdamp(er) of gaskoeler) wordt in de kamer geplaatst. Ook is er een extra warmtewisselaar (tegeneffect) aanwezig die de warmte afvoert (gaskoeler) toevoert



Klimaatkamer.



Prestaties van CO₂, kringloop met GLHX (verdampingstemperatuur = -8 °C).

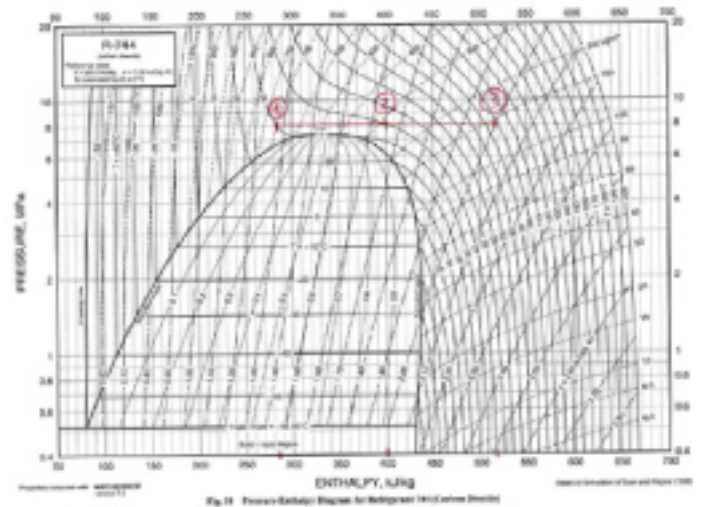
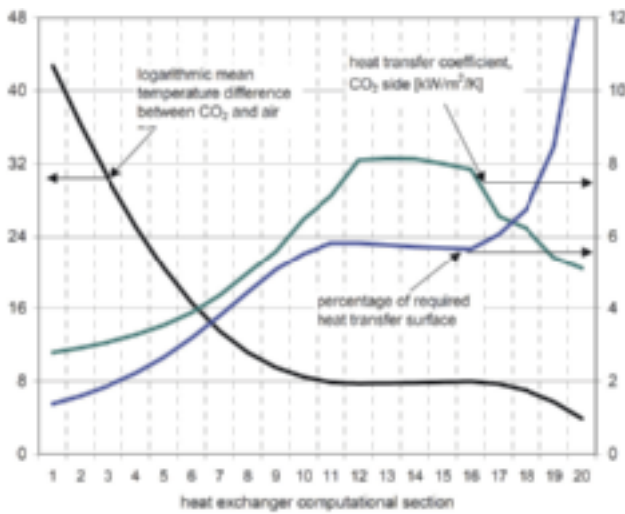
(verdamp(er)). De capaciteitsmeting wordt op twee manieren uitgevoerd: meten van de capaciteit aan de CO₂-zijde en aan de tegenoverliggende zijde. Voor een geldige test moeten de maxima van de capaciteiten standaard circa 4 procent verschillen. Het compressorrack is voorzien van twee alternatieve compressoren van verschillende grootte, voorzien van inverterregeling zodat de capaciteit met betrekking tot de te testen warmtewisselaar nauwkeurig kan worden aangepast.

Gaskoelers

Het ontwerpen van een gaskoeler is complex door onder meer de hoge werkdruk (tot 150 bar). Het fundamentele aspect van het thermodynamische ontwerp is dat als gevolg



CO₂-compressorrack.



Variaties van een aantal parameters in de doorgerekende delen van een CO₂-gaskoeler.

van de hoge gemiddelde temperatuur in de bovenste isobar CO₂ in transkritisch bedrijf wordt afgekoeld van een hoge temperatuur tot waarden dicht bij omgevingstemperatuur.

Er is een berekeningsmethode ontwikkeld die de exacte verdeling van de ΔT s tussen CO₂ en lucht kan weergeven, op voorwaarde dat de stromingen tegengesteld zijn gericht. De warmtewisselaar is verdeeld in bijvoorbeeld twintig berekeningssecties: voor elke sectie wordt een onafhankelijke evaluatie gedaan van de gemiddelde logaritmische ΔT en van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in de buis met de Gnielinski-correlatie voor eenfasestroming. De afbeelding linksboven geeft een voorbeeld van hoe enkele belangrijke parameters verschillen

in de berekeningssecties. Er kan worden opgemerkt dat:

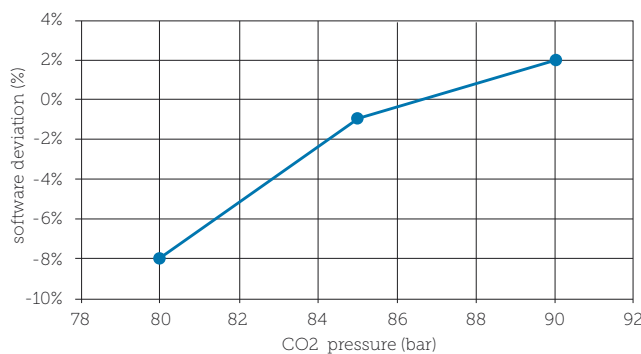
- in het eerste deel van de koeling van de CO₂, wordt de aandrijfkraft van het warmtewisselingsproces gebonden aan het grote temperatuurverschil tussen CO₂ en lucht (zwarte kromme), zodat de invloed van de coëfficiënt van de interne overdracht (groene curve) klein en van relatief geringe waarde en niet van groot belang is. De grafiek toont hoe klein het percentage benodigd oppervlak is voor dit begindeel van de overdracht (blauwe curve).
- er is dan een centrale zone in het proces waarbij het temperatuurverschil tussen de twee vloeistoffen vermindert, maar waar tegelijkertijd de overdrachtscoë-

Thermodynamische eigenschappen van CO₂.

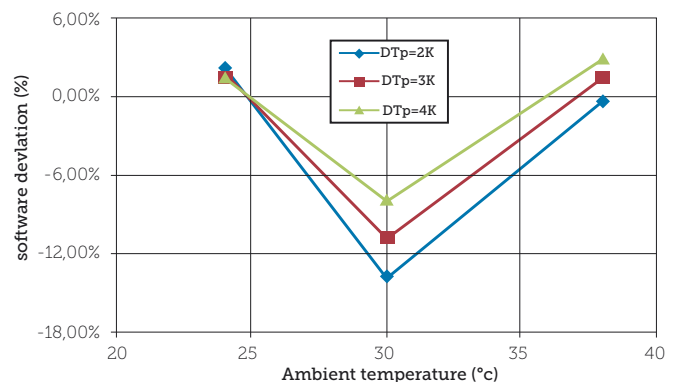
ficiënt aan de binnenzijde toeneemt, resulterend in bijna een vereffening van de twee verschijnselen.

- het kritische gedeelte van de warmtewisselaar wordt weergegeven in het laatste deel (het koude einde) waar het temperatuurverschil heel klein is, de overdrachtscoëfficiënt wegvalt en het vereiste warmteoverdrachtsoppervlak is zeer groot.

Het eerste deel dat nauwkeurig is onderzocht betrof de transkritische situatie met een druk van 80 bar (zie grafiek rechts boven). Zoals gemakkelijk kan worden gezien, is het een van de meest complexe bedrijfsomstandigheden. In feite worden de isothermen rond het kritische punt sterk verbogen en de



Softwareafwijking als functie van de CO₂-druk.



Softwareafwijking als functie van de omgevingstemperatuur voor verschillende DT knelpunten.

enthalpie, nodig om de vloeistof te koelen van 40 naar 30°C, is zeer hoog, gelijk aan het traject van 96 naar 40°C.

De experimentele tests waren cruciaal voor het begrijpen en onderkennen van het thermo-dynamisch-vloeistofgedrag van CO₂ met als gevolg aanpassing van het selectiemodel, het wijzigen van de correlaties van de software en conclusies van de berekening zelf en het nog nauwkeuriger evalueren van de thermodynamische en overdrachtseigenschappen. In de afbeeldingen onderaan de vorige pagina tonen de resultaten van bepaalde tests, uitgevoerd op een warmtewisselaar met geometrie van 25 × 21,65 mm en met een buisdoorsnede van 7,94 mm en 4 rijen dik.

De grafiek links wijst op de afwijking van de gemeten en voorspelde waarden als functie van de inlaatdruk van CO₂, het blijkt duidelijk dat de afwijking niet verwaarloosbaar is bij 80 bar terwijl deze minimaal wordt bij 84 bar.

De grafiek rechts toont dezelfde afwijking als functie van de omgevingstemperatuur voor drie verschillende knelpunten DTs (het verschil tussen de inlaattemperatuur bij de warmtewisselaar en uitlaat van CO₂). Het is duidelijk hoe, dichter bij de kritische temperatuur (30,978°C), de afwijking overheersend is en hoe deze nog toeneemt naarmate de eerdergenoemde DTp afneemt.

Anderzijds zouden de prestatieafwijkingen als functie van de luchtsnelheid beschouwd moeten

Temperatuur		-8 °C		-30 °C	
		CO ₂	R404A	CO ₂	R404A
Dichtheid verzadigde vloeistof	[kg/m ³]	972,1	1182,8	1073,5	1258,3
Verzadigde dampdichtheid	[kg/m ³]	76,30	23,76	37,10	10,65
Soortelijke warmte verzadigde vloeistof	[J / (kg · K)]	2239,2	1347,1	1990,8	1273,8
Thermische geleidbaarheid l.s. Verzadigde vloeistof	[W / (m · K)]	124,2	81,5	155,1	91,3
Viscositeit verzadigde vloeistof	[μPa · s]	123,7	198,0	181,6	264,1
Verdampingswarmte	[kJ / kg]	253,6	172,8	302,8	189,6

Enkele thermofysische eigenschappen van CO₂ en R404A (bron: NIST Refprop).

worden als zijnde binnen de orde van experimentele fouten. Duidelijk is dat het doel van het experiment was om de moeilijkste gebieden te onderzoeken, zoals in het bijzonder die in de nabijheid van het kritische punt met een CO₂-uittredetempe-
ratuur van de gaskoeler die zeer dicht bij de omgevingstemperatuur ligt. De resultaten van deze poefneming heeft het verkrijgen van berekeningen met een hoge mate van betrouwbaarheid en nauwkeurigheid mogelijk gemaakt.

Verdampers

In tegenstelling tot een gaskoeler die in alle opzichten een nieuw product is en anders dan een HFK-condensor, kan een verdamper met CO₂ als koudemiddel worden beschouwd als een warmtewisselaar die vergelijkbaar is met die voor gehalogeneerde koudemiddelen, waarvan hij vooral verschilt in de weerstand vanwege de hogere druk waarmee hij werkt. Het product behoeft geen bijzonder

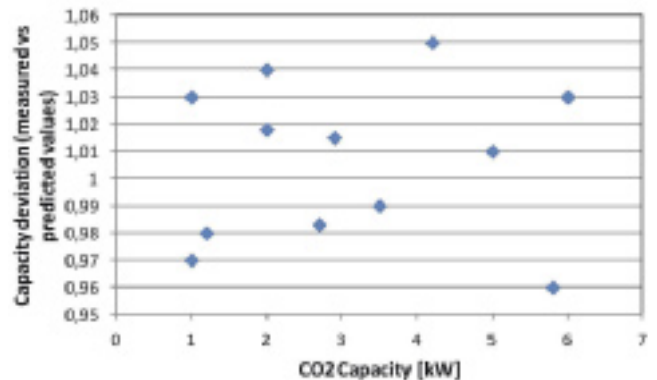
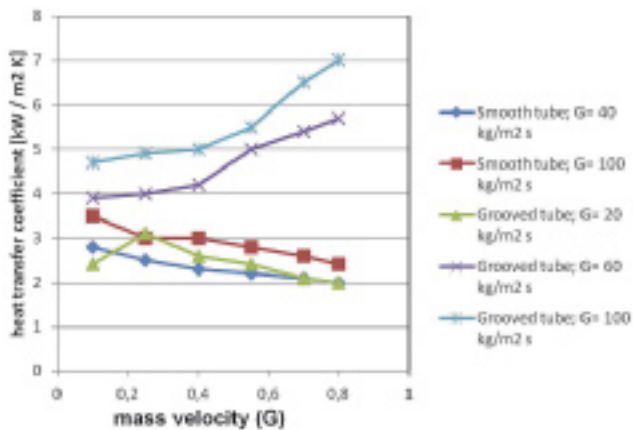
hoge werkdrukken te ondergaan.

Het is echter noodzakelijk om overdruk te voorkomen, veroorzaakt door langdurige stilstand van de installatie of tijdens het ontdoeien, waarbij de temperatuur kan stijgen tot boven die van de te koelen ruimte. Normaal zijn maximale werkdrukken van 45-60 bar nodig. Dergelijke waarden vereisen geen speciaal ontwerp, maar enkel een aanpassing van de dikte van de buis- en de kopwand van de verzamelherder.

Een belangrijk aspect waar goed aandacht aan moet worden besteed betreft de thermofysische eigenschappen van CO₂, die significant verschillen met die van die van HFK-achtige koudemiddelen. Van te voren kan al gesteld worden dat de thermofysische eigenschappen van CO₂ gunstig zijn voor het verkrijgen van verhoogde warmteoverdrachtsprestaties. De tabel bovenaan de pagina toont dat vergeleken met R404A aan. CO₂ heeft een hogere soortelijke

	koudemiddel		R404A	R404A	CO ₂	CO ₂
	buistype		micro fin	glad	micro fin	glad
	no. van parallelle inlaten		N	N	N/2	N/2
T _{Ev} = -15°C, ΔT ₁ = 7K	gradatie (rel. naar R404A)	[%]	100.0	82.7	117.4	111.4
	Massadebiet	[kg/(m ² ·s)]	105,4	85,3	215,0	204,0
	Drukverlies	[K]	0,84	0,47	0,67	0,50
	Interne warmteoverdrachtscoëfficiëntie	[%]	100.0	46.0	435.5	199.5

Vergelijkende prestatie van F35HC 94 E 7 unitkoelers voor R404A en CO₂



Experimentele test van CO₂ tijdens de verdamping met gladde en gegroefde buizen bij verschillende massaverplaatsingssnelheden (G); T_{evap} = -15 °C; q = 5kW/m²

Experimentele resultaten van de test-campagne op de CO₂-verdampers: het verschil tussen experimentele en theoretische gegevens.

warmte, hogere thermische geleidbaarheid en lagere viscositeit. Dit laatste feit, samen met de grotere dampdichtheid, laat minder drukval toe (in termen van temperatuurvariatie door drukvariatie) bij dezelfde massaverplaatsingssnelheid. Overwegende dat (bij gelijke capaciteit) de grotere verdampingswarmte een lagere doorstroming veroorzaakt, dan blijkt de vermindering van de drukval bij hetzelfde vermogen inderdaad significant te zijn.

Gladde buizen

De eerste ontwikkeling van de CO₂-verdampers betrof de productie van koelers met gladde buizen met verhoogde wanddikte. Dit leek in eerste instantie de enige weg vooruit te zijn maar thans is de richting – terecht – een zoektocht naar superieure prestaties met efficiëntere configuraties met een nieuw concept gegroefde buizen. Deze verschillen aanzienlijk van de gegroefde buizen in HFK-verdampers. Zij moeten inderdaad dikker gemaakt worden vanwege de toegenomen druk, maar ook andere aspecten dienen te worden geanalyseerd. In feite suggereren de thermofysische eigenschappen van CO₂ om dieper gegroefde profielen toe te passen ontworpen voor hogere warmteoverdrachtscoëfficiënten, terwijl dit ook kan leiden tot lagere drukverliezen.

Derhalve verschilt de balans van een goed compromis tussen toename van de drukval en het verhogen van de overdrachtscoëfficiënt met die welke gewoonlijk verkregen wordt met HFK-achtige koudemiddelen.

De afbeelding linksboven toont een experimentele studie (uitgevoerd door de buizenfabrikant) die de interne warmteoverdrachtscoëfficiënt van CO₂ vergelijkt ten opzichte van gladde en gevonde buizen bij verschillende massaverplaatsingssnelheden G. Zoals blijkt is de toename van de overdrachtscoëfficiënt opmerkelijk.

De afbeelding rechtsboven toont de resultaten van een theoretische voorspelling van een luchtkoeler type F35HC 94 E 7 met CO₂ (in verhouding tot R404A). De gegevens zijn berekend met zelf ontwikkelde software met behulp van voornamelijk zelf ontwikkelde correlaties en gekalibreerd naar aanleiding van een aantal laboratoriumtesten (Wang, 2000) en (Lozza ea 2001).

Lagere stroomsnelheden

De tabel geeft aanleiding tot de volgende uitspraken:

- Zoals hierboven beschreven, heeft CO₂ lagere stroomsnelheden (bij gelijke capaciteit) en lagere drukverliezen, bijgevolg is het aantal circuits minder in vergelijking met een verdampers

voor R404A.

- De uitstekende thermofysische eigenschappen van CO₂ laten een grote prestatietoename toe in vergelijking met een verdampers werkend met R404A, met gladde of gegroefde buizen.
- De interne warmteoverdrachtscoëfficiënt van CO₂ is veel groter dan die van R404A en, terwijl de toename van de prestaties van R404A verandert bij toepassing van gladde tot gegroefde buizen met 17,3 procent, bedraagt deze daarom slechts 5 procent voor CO₂.

De afbeelding hierboven belicht de resultaten van de experimentele testcampagne met verdampers, die een afwijking van circa 5 procent tussen de theoretische gegevens (berekend met bedrijfssoftware) en de intern gemeten data tonen. Dit is een zeer goed resultaat en getuigt van het hoge betrouwbaarheidsniveau van het rekenmodel.

Meer informatie:

LU-VE S.p.A.
Via Caduti della Liberazione 53
21040 Uboldo, Varese, Italië
T: +39 02 96716.1
F: +39 02 96780560
E: sales@luve.it
I: www.luve.it