

& Chłodziwo Klimatyzacja

CHŁODZENIE PROCESORÓW * RECYRKULACJA A ZUŻYCIE ENERGII * CHŁODNICE POWIETRZA
* FILTRACJA POWIETRZA W CENTRALACH WENT.-KLIM. * KONTROLA PARAMETRÓW CHŁODNI I MROŻNI

Czas to pieniądz!

SANHUA dostarcza ponad 1500 różnych produktów dla największych producentów i dystrybutorów w Europie z nowego magazynu centralnego zlokalizowanego w Polsce.


SANHUA


KLIMATYZACJA

CHŁODNICTWO

POMPY CIEPŁA

chilling ideas worldwide

**WYŁĄCZNY
DYSTRYBUTOR**



SANHUA INTERNATIONAL EUROPE
info@sanhuaeurope.com
www.sanhuaeurope.com

ALFACO Polska Sp. z o.o.
50-428 Wrocław
ul. Krakowska 141-155
tel. +48 71 340 05 75
fax +48 71 340 05 54
alfaco@alfaco.pl
www.alfaco.pl

ODDZIAŁ PODLASKI
15-124 Białystok
ul. Gen W. Andersa 7
tel. +48 85 664 84 28
fax +48 85 653 92 07
bialystok@alfaco.pl

ODDZIAŁ ŚLĄSKI
40-156 Katowice
Al. W. Korfantego 125A
tel. +48 32 608 46 92
fax +48 32 258 70 73
katowice@alfaco.pl

ODDZIAŁ LUBELSKI
20-468 Lublin
ul. Energetyków 7
tel. +48 81 444 11 89
fax +48 81 444 10 89
lublin@alfaco.pl

ODDZIAŁ POMORSKI
84-230 Rumia
ul. Sobieskiego 23
tel. +48 58 6292031
fax +48 58 6292033
gdynia@alfaco.pl

ODDZIAŁ MAZOWIECKI
03-231 Warszawa
ul. Odlewnicza 7
tel. +48 22 614 31 10
fax +48 22 614 31 10
warszawa@alfaco.pl



Najnowsze osiągnięcia technologiczne wymienników powietrznych na CO₂

– wyniki badań w laboratoriach LUVE

W wielu aplikacjach chłodniczych stosuje się CO₂, który jest ekologicznym czynnikiem chłodniczym o doskonałych parametrach. Dzięki wykorzystaniu bardzo nowoczesnego laboratorium badawczego, w którym przetestowano działanie lamelowych wymienników ciepła na CO₂ po stronie niskiego, jak i wysokiego ciśnienia, firma Lu-VE wypracowała wiele przełomowych i ważnych rozwiązań technologicznych.

W laboratorium wdrożono specjalny projekt poświęcony wymiennikom lamelowym na CO₂ mający jako główny cel poszerzenie wiedzy nt. specyficznych zjawisk towarzyszących procesom parowania, skraplania oraz transkrytycznemu chłodzeniu gazowego CO₂. Szeroko przebadano również wpływ obecności oleju występującego wewnątrz wymienników na wewnętrzny współczynnik przejmowania ciepła. Artykuł opisuje przeprowadzone czynności testowe, kalibrację oprogramowania służącego do modelowania procesów oraz potencjalne ulepszenia wymienników.

Dzięki badaniom możliwe stało się znalezienie sposobu na wzięcie pod uwagę specyficznego zachowania się płynu podczas chłodzenia transkrytycznego oraz prawidłowe uwzględnienie wszystkich parametrów wpływających na rzeczywiste parametry wymiany ciepła.

Z historii CO₂

Dwutlenek węgla (CO₂) jako czynnik chłodniczy był używany już od połowy XIX wieku. Stosowano go w stacjonarnych układach chłodniczych jak również w chłodniach statków. Oferował wiele korzyści:

- niski koszt;
- dobre właściwości wymiany ciepła;
- nietoksyczność w przypadku wycieków z maszynowni;
- dostępność czynnika chłodzącego skraplacz w przypadku aplikacji morskich, w których woda o niskiej temperaturze pozwalała na pracę cyklu chłodniczego w warunkach podkrytycznych.

Pojawienie się czynników syntetycznych (CFC, HCFC) i rozwój technologii sprężarkowej w pierwszej połowie XX wieku spowodowało rezygnację z CO₂ jako czynnika chłodniczego. Powtórne „odkrycie” dwutlenku węgla nastąpiło z powodu problemów związanych z ochroną środowiska, które wywołały presję na redukcję użycia czynników CFC i HCFC. W latach 90-tych popularność zyskały publikacje Gustava Lorentzena, który przedstawił liczne analizy zastosowania dwutlenku węgla jako czynnika chłodniczego w komercyjnych układach chłodniczych i w supermarketach.

Firma LU-VE rozpoczęła badania nad wymiennikami powietrznymi na CO₂ na początku nowego milenium i w 2012 roku stworzyła dedykowane, wyrafinowane laboratorium do testowania chłodziw oraz gas-coolerów. Niniejsze opracowanie podsumowuje rezultaty analiz eksperymentalnych oraz kalibracji modelu matematycznego stosowanego do doboru i wymiarowania gas-coolerów.

Laboratorium testowe

Laboratorium testowe CO₂ zostało zaprojektowane tak, aby mogło przeprowadzać eksperymenty na chłodziwach wewnętrznych oraz na gas-coolerach. Maksymalne ciśnienie robocze wynosi 120 bar natomiast maksymalna temperatura 120°C.

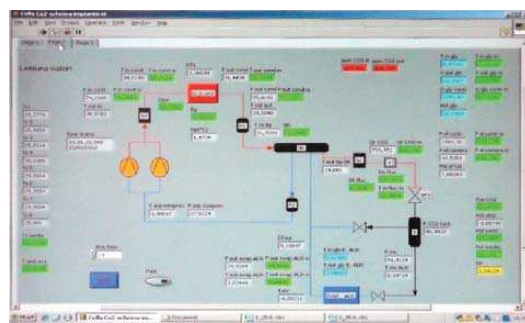
Przygotowano unikalne oprogramowanie na bazie LabView w celu monitorowania i gromadzenia danych. Testy przeprowadzano po uzyskaniu stanu równowagi termicznej pomiędzy testowanym urządzeniem i grupą porównawczą, w celu zagwarantowania rzetelności danych eksperymentalnych. Wymagało to ogromnego nakładu czasu w celu kalibracji instrumentów pomiarowych, w szczególności w warunkach rozproszenia pomiarów w testowej komorze klimatycznej.

Charakterystyka testowanych urządzeń

W laboratorium testowano trzy urządzenia o charakterystykach jak w tabeli 1. Stosowane rurki wykonane były ze stopu K65, zawierającego małą domieszkę żelaza, które w znaczący sposób podnosiło ich mechaniczną wytrzymałość. Obiegi chłodnicze zostały zaprojektowane identycznie, z uwzględnieniem transportu oleju i w taki sposób aby uniknąć miejsc gdzie olej mógłby gromadzić się. Jak okazało się później, olej w układzie chłodniczym był głównym powodem spadku wydajności gas-coolerów. Na końcu dokonano porównania wartości teoretycznych z eksperymentalnymi.

Model matematyczny obliczeń teoretycznych LU-VE

Oprogramowanie modelujące procesy termodynamiczne stosuje formuły Gnielinskiego i Colburna zmodyfikowane odpowiednio dla płynów jedno i dwufazowych.



Rys. 1. System gromadzenia danych pomiarowych



Rys. 2 – a) Laboratorium testowe; b) Klimatyczna komora testowa CO₂; c) Układy chłodnicze laboratorium testowego

Do obliczeń spadku ciśnienia, program stosuje zmodyfikowany wzór Lockharta-Martinellogo. Właściwości termodynamiczne i przepływowe dwutlenku węgla są wyznaczane z programu Refprop 8.0. Celem testów jest sprawdzenie poprawności modelu matematycznego bazującego na niniejszych formułach dla pracy układów z CO₂. Program oblicza przepływ ciepła gas-coolerów dla przepływów przeciwnych. Niemniej można również wprowadzić poprawki dla przepływu krzyżowego części wymiennika chłodzącej przegrzany gaz w skraplaczach. Współczynniki do formuł obliczających wymianę ciepła otrzymywane są na podstawie testów przeprowadzanych w laboratorium LU-VE w standardowych warunkach.

Mając na uwadze specyfikę pracy gas-coolerów w porównaniu do typowych warunków obliczeniowych, wymagana była weryfikacja poprawności i pewne adaptacje formuł. Pierwsze analizy dotyczyły weryfikacji poprawności zastosowania wzorów dla obliczeń przepływów krzyżowych. Aby ocenić wpływ średniej logarytmicznej transformacji danych dla gas-coolerów (w szczególności DT_{ml}), zastosowano alternatywne oprogramowanie X3FLOW opracowane w LU-VE. Umożliwiło to kalkulację w trzech wymiarach zgodnie z rzeczywistą strukturą obiegu; podział na skończone wielkości przepływów i obliczenie N-elementowych transferów ciepła dla przepływu krzyżowego z użyciem klasycznych równań metody ε-NTU. Pomimo bardzo złożonych i skomplikowanych obliczeń w programie X3FLOW, analizy porównujące ogólne parametry operacyjne otrzymane wg standardów LU-VE i oprogramowania X3FLOW nie wykazały żadnych szczególnych odchyleń. W konsekwencji zdecydowano nie dokonywać żadnych modyfikacji metody obliczania DT_{ml}.

Druga analiza dotyczyła efektu dużego gradientu temperaturowego pomiędzy sąsiednimi rurkami wymiennika, który mógł powodować transfery ciepła przez przewodzenie wzdłuż lamel między tymi rurkami. Aby ocenić wpływ przepływów ciepła pomiędzy dwoma rzędami rurek o istotnej różnicy temperatury płynu wewnątrz, zastosowano symulacje komputerowe CFD.

Jako bazę przyjęto gładką lamelę oraz dwie różnice temperatury pomiędzy płynem wewnątrz rurek:

- 70/70°C DELTA 0K
- 110/30°C DELTA 80K

Takie same gradienty przeanalizowano w konfiguracji lamel „LU-VE Hitec”. Na podstawie symulacji CFD zaobserwowano, że dla zerowej różnicy wartości temperatur przepływ ciepła poprzez przewodzenie w środkowej strefie pomiędzy rzędami jest również praktycznie zerowy (strefa adiabatyczna). Gdy zwiększana jest różnica temperatury płynu w rurkach, obserwowane są różne zjawiska dla różnych lamel:

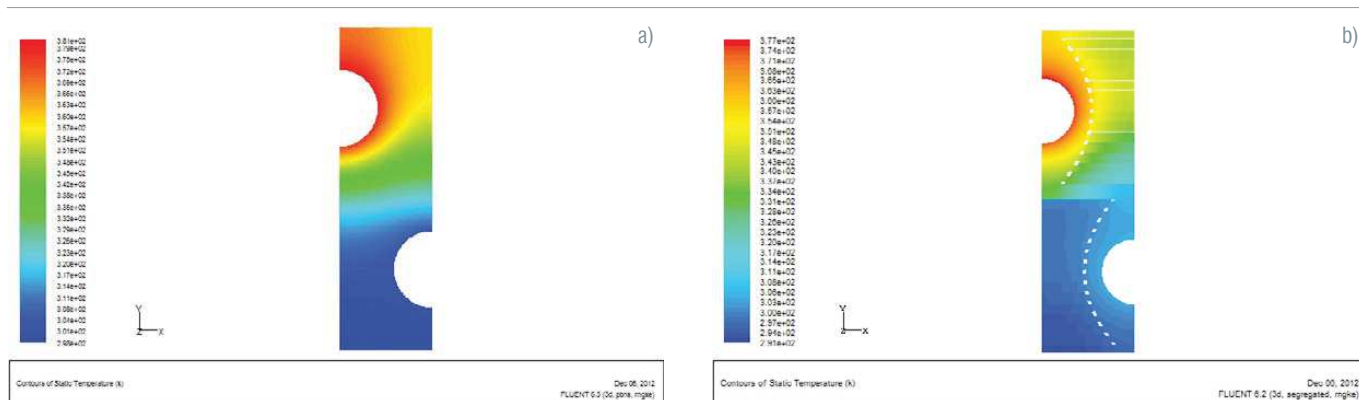
- a) dla lamel płaskich – przepływ ciepła przez przewodzenie (negatywny z punktu widzenia ogólnego przepływu ciepła lamel) wynosi aż 37%, co stanowi duży udział;
- b) dla lamel „LU-VE Hitec” – przepływ ciepła przez przewodzenie stanowi jedynie 4%, czyli wartość pomijalną.

Wynik tej analizy potwierdził, że technologia LU-VE pozwala na najlepsze wykorzystanie potencjału tkwiącego w CO₂.

Rysunek 3. pokazuje rozkład temperatury lameli w strefie centralnej pomiędzy rzędami rurek dla czterech analizowanych kon-

Tabela 1. Charakterystyka testowanych urządzeń

Urządzenie	Gas-cooler nr 1	Gas-cooler nr 2	Gas-cooler nr 3
Materiał lamel	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Typ rurek	Gładkie ścianki	Gładkie ścianki	Gładkie ścianki
Materiał rurek	Cu K65	Cu K65	Cu K65
Podziałka lamel	2,1	2,1	2,1
Liczba rurek wymiennika	40	40	40
Liczba rzędów wymiennika	4	4	3
Liczba obiegów wymiennika	5	5	4
Średnica rurek	5/16"	5/16"	5/16"
Szerokość wymiennika	1215	1215	1215
Powierzchnia czołowa wymiennika	1,215	1,215	1,215
Typ wentylatora/Obroty	8 biegunowy / 465	EC / 807	EC / 675
Strumień powietrza	3956	6650	6502



Rys. 3. Symulacja CFD – rozkład temperatury lameli dla: a) lameli płaskich; b) lameli LU-VE Hitec

figuracji: 0,1 mm przed linią środkową i 0,1 mm za (te powierzchnie są używane do kalkulacji przepływu ciepła przez przewodzenie). Mapy kolorów pokazują temperaturę lameli. Jak można zauważyć, specyficzna konfiguracja nacięć pozwala na doskonały radialny transfer ciepła (wysoka efektywność termiczna lameli) oraz bardzo ograniczone przewodzenie ciepła stref pomiędzy rurkami sąsiednich rzędów („przebicia” ciepłne).

Wyniki eksperymentów i porównanie z oprogramowaniem LU-VE w warunkach transkrytycznych

W toku badań wykonano ogromną ilość testów w zakresie wartości ciśnienia 80÷110 bar. Przebadano wiele parametrów analizując również wpływ obecności oleju w obiegu. Analogicznie jak opisano w literaturze [Dang, Wang], formowanie się filmu olejowego wewnątrz rurek obiegu chłodniczego może powodować znaczący ubytek współczynnika wewnętrznego przejmowania ciepła – nawet ponad 70% [Dang].

Podczas analizy danych eksperymentalnych, wyznaczono mnożnik RHTC opisujący redukcję współczynnika wewnętrznego przejmowania ciepła i wzrost spadku ciśnienia. Odnaleziono również wzmianki w literaturze opisujące sposób wyznaczania HTC w strefach hiperkrytycznych w związku z obecnością oleju w obiegu. Zmienne, które były badane, powiązane z redukcją HTC są następujące:

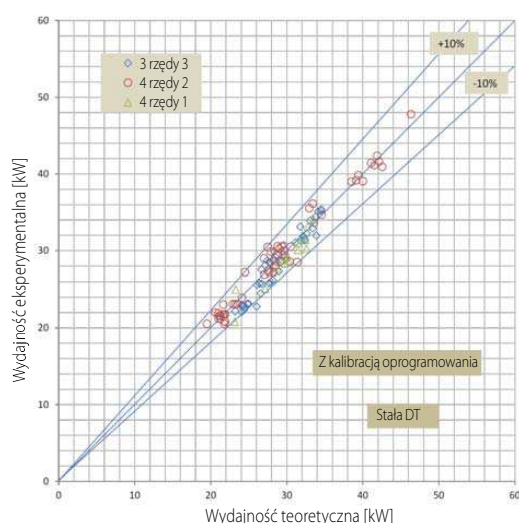
$$RHTC = f(ID, p_v, \text{flux}, \text{Press.}, x_{oil}, TCO_2, \text{typ oleju})$$

Analiza danych wykazała doskonałą zgodność pomiędzy wnioskami z badań i modelami teoretycznymi, w szczególności w zakresie udziału masowego oleju w granicach 3÷5%. Dalsze badania danych bibliograficznych w kwestii analizowanych korelacji potwierdziły największą zgodność wzorów Gnielinskiego (dla $2300 < Re < 5000000$).

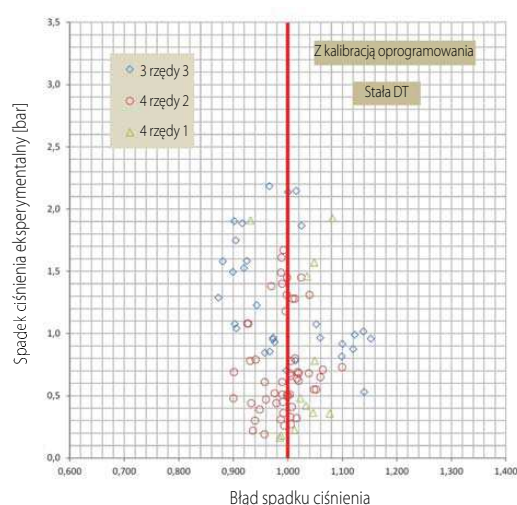
Zidentyfikowane współczynniki korekcyjne zależą w pewnym stopniu od warunków operacyjnych. Wykres na rysunku 4. pokazuje trend wydajności teoretycznej/skalkulowanej porównanej z danymi eksperymentalnymi po zastosowaniu współczynnika korekcyjnego. Wykres pokazuje dwie linie graniczne odchylenia procentowego $\pm 10\%$. Z kolei rysunek 5. pokazuje trend zmiany spadku ciśnienia, którego wartości są wyrażone w barach. Rozrzut danych mieści się w bardzo racjonalnych granicach $\pm 15\%$.

Wyniki eksperymentów i porównanie z oprogramowaniem LU-VE w warunkach podkrytycznych

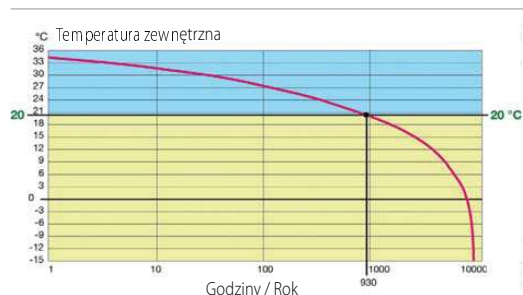
Parametry operacyjne w warunkach podkrytycznych są bardzo ważne. Jak pokazano na rysunku 6., instalacja chłodnicza musi pracować przez większość czasu w ciągu roku w takich właśnie warunkach – najlepszych pod względem efektywności całego cy-



Rys. 4. Trend obliczeniowej wydajności



Rys. 5. Rozrzut spadku ciśnienia



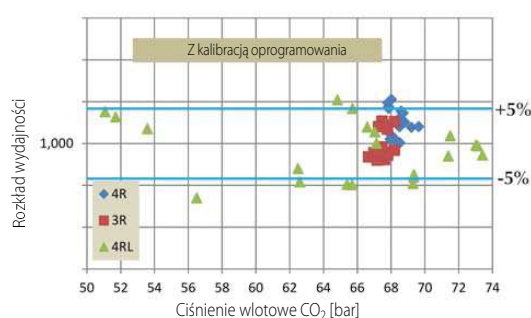
Rys. 6. Schemat skumulowanego rozkładu temperatur w typowej lokalizacji w Europie centralnej

klu CO₂. Gas-cooler jest elementem systemu, w którym najbardziej zmieniają się warunki pracy pomiędzy transkrytycznymi i podkrytycznymi musząc jednocześnie zagwarantować wysoką efektywność wymiany ciepła w obu trybach pracy. Z tego względu jego konstrukcja musi uwzględniać optymalną równowagę pomiędzy tymi zróżnicowanymi warunkami pracy.

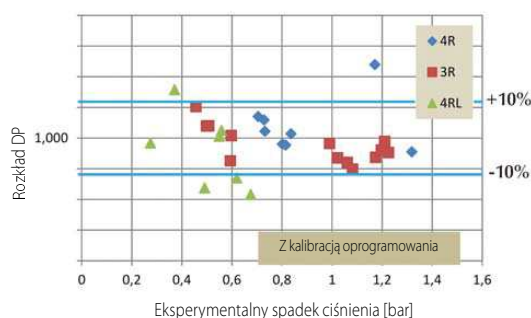
Sposób i zakres przeprowadzanych testów został ukierunkowany na takie gromadzenie danych aby kolejne eksperymenty wprowadzały największy możliwy progres w badaniach i jednocześnie służyły kalibracji oprogramowania dla zagwarantowania precyzji obliczeń modelujących badane procesy.

Eksperymenty zostały przeprowadzone w szczególnie szerokim zakresie ciśnień, nawet aż do minimalnej temperatury skraplania 10°C. Dodatkowo wprowadzono znaczące zróżnicowanie w wartości przegrzania gazu na wlocie skraplacza oraz przechłodzenia cieczy. Możliwe stało się precyzyjne skalibrowanie oprogramowania w trzech strefach:

- wstępnej redukcji przegrzania;
- strefy zmiany fazowej;
- przechłodzenia.



Rys. 7. Trend odchyleń wydajności w funkcji ciśnienia wlotowego CO₂



Rys. 8. Trend odchyleń spadku ciśnienia



Rys. 9. CO₂ gas-cooler z systemem zraszania

Strefą wymagającą największej ilości korekt była strefa wstępnej redukcji przegrzania. Było to spowodowane olejem tworzącym izolacyjny film pomiędzy czynnikiem CO₂ i ściankami wymiennika.

Wykres na rysunku 7. obrazuje rozkład teoretycznej/skalkulowanej wydajności zestawionej z wydajnością uzyskaną w eksperymentach po zastosowaniu współczynników korekcyjnych w funkcji ciśnienia wlotowego do urządzenia. Kalibracja umożliwiła uporządkowanie danych eksperymentalnych w racjonalnym zakresie. Odchylenia są niezależne od ciśnienia, również w strefie w pobliżu punktu krytycznego.

Trend wyznaczony przez punkty dla trzech testowanych konfiguracji ma racjonalne odchylenia od wartości obliczeniowej. To oznacza, że modyfikacja tylko współczynnika korekcyjnego wymiany ciepła i spadku ciśnienia nie prowadzi do dalszego polepszenia dokładności obliczeń.

Rysunek 8. pokazuje rozkład spadku ciśnienia po stronie czynnika CO₂ (skalkulowany/eksperymentalny), jako funkcję pomierzonych wartości w bar. Rozrzut mieści się w akceptowalnych granicach. Odchylenia wzrastają, gdy maleje wartość mierzona ze względu na zawsze obecną nieustaloność warunków pomiaru.

Wnioski

Rozbudowany program eksperymentów w laboratorium LU-VE pozwolił na znaczne rozszerzenie wiedzy nt zachowania CO₂ w układach chłodniczych, dostarczając solidną bazę do precyzyjnych obliczeń gas-coolerów zarówno dla transkrytycznych jak i podkrytycznych warunków pracy. Dokładna kalibracja oprogramowania pozwoliła na znaczną redukcję różnic pomiędzy skalkulowanymi i pomierzonymi wartościami operacyjnymi.

Materiał opracowany przez firmę LUVE

Tłumaczenie: Sławomir KALBARCZYK

– Przedstawiciel Techniczno-Handlowy, LU-VE – Tecnair

Firma LU-VE stała się międzynarodową marką referencyjną dla wszystkich najlepszych projektów: technologii stosowanej w urządzeniach, procesów produkcyjnych oraz sprzedaży wymienników ciepła i innych komponentów stosowanych w chłodnictwie komercyjnym, przemysłowym, klimatyzacji komfortu i precyzyjnej oraz aplikacjach przemysłowych. Grupa LU-VE, z główną siedzibą w Uboldo (Varese) we Włoszech, kontynuuje proces wprowadzania produkcyjnych i technologicznych innowacji zapoczątkowany w 1928 roku. Siła Grupy tkwi w 10 ośrodkach produkcyjnych i 13 oddziałach na całym świecie.

Ważne liczby:

- ponad 1 450 wysoko wyszkolonych pracowników;
- 340 000 m² całkowitej powierzchni produkcyjnej (140.000 m² zadaszanej);
- 2 350 m² laboratoriów badawczo-rozwojowych;
- ponad 70% produktów eksportowanych do 90 krajów;
- € 240 milionów skumulowanych przychodów.