

NAJNOWSZE OSIĄGNIĘCIA TECHNOLOGICZNE WYMIENNIKÓW POWIETRZNYCH NA R744

Czynnik R744 stosowany jest w coraz to większej ilości instalacji chłodniczych, byłoby inaczej gdyby nie jego właściwości termodynamiczne jak i fakt „ekologiczny”. 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 na temat specyficznych zjawisk towarzyszących procesom odparowania, skraplania oraz nadkrytycznemu chłodzeniu gazowego dwutlenku węgla. Z ogromną starannością 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.

W szczególności, możliwe stało się znalezienie sposobu na uwzględnienie specyficznego zachowania się czynnika R744 podczas chłodzenia nadkrytycznego oraz prawidłowa interpretacja wszystkich parametrów wpływających na rzeczywiste parametry wymiany ciepła.

Słowa kluczowe: CO₂, obliczenia wydajności, chłodzenie nadkrytyczne, współczynnik wymiany ciepła, wpływ filmu olejowego na wymianę ciepła.

WPROWADZENIE

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

- relatywnie 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 częściową 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



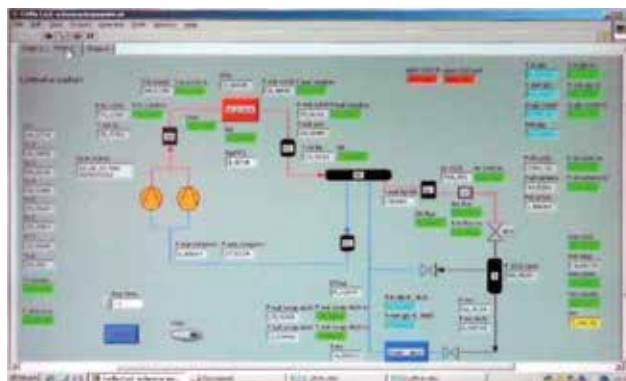
chłodniczego w komercyjnych układach chłodniczych i w supermarketach.

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 tzw. „gas coolerów”. Niniejsze opracowanie podsumowuje rezultaty analiz eksperymentalnych oraz kalibracji modelu matematycznego stosowanego do doboru i wymiarowania „gas coolerów”.

2 LABORATORIUM TESTOWE

Laboratorium testowe CO₂ zostało zaprojektowane w sposób pozwalający na wnikliwą analizę chłodziw powietrza oraz „gas coolerów”. Maksymalne ciśnienie robocze to 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 empirycznych. Wymagało to ogromnego nakładu czasu w celu kalibracji instrumentów pomiarowych, w szczególności w warunkach rozproszenia pomiarów w testowej komorze klimatycznej.



Rysunek 1 – System gromadzenia danych pomiarowych

2.1 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”.

W fazie końcowej dokonano porównania wartości teoretycznych z empirycznymi.

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 [mm]	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 [mm]	1215	1215	1215
Powierzchnia czołowa wymiennika [m ²]	1,215	1,215	1,215
Typ wentylatora/Obroty [obr/min]	8 biegunowy / 465	EC / 807	EC / 675
Strumień powietrza [m ³ /h]	3956	6650	6502

3 MODEL MATEMATYCZNY OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH LU-VE

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

Do obliczeń spadku ciśnienia, program stosuje zmodyfikowany wzór Lockharta-Martinellogo. Właściwości termodynamiczne i przepływowe dwutlenku węgla są wyznaczone 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 przeciwpądowych. 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 (i w szczególności DT_{mlg}), dla „gas coolerów” zastosowano alternatywne oprogramowanie 'X3FLOW' opracowane przez LU-VE. Umożliwiło ono 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 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_{mlg}.

Druga analiza dotyczyła efektu dużego gradientu temperaturowego pomiędzy sąsiednimi rurkami wymiennika,



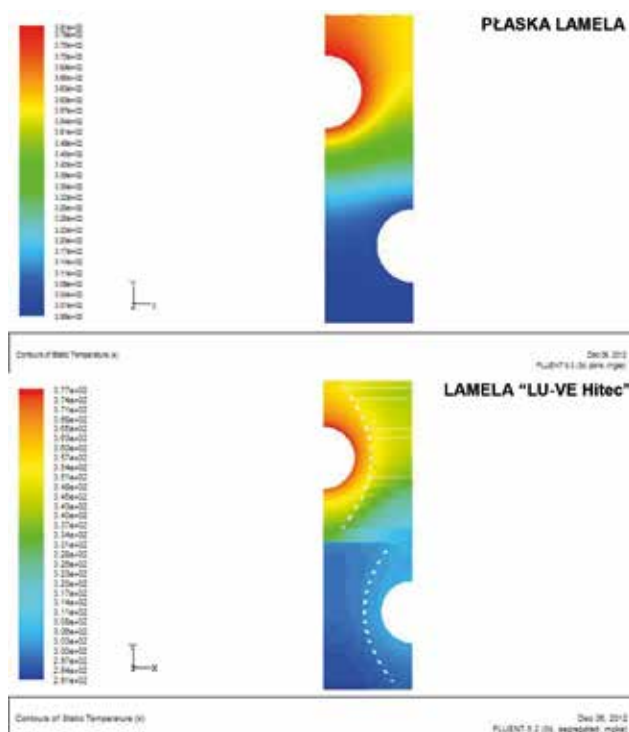
Rysunek 2: a – laboratorium testowe, b – Klimatyczna komora testowa CO₂, c – Układy chłodnicze laboratorium testowego

który mógł powodować transfery ciepła przez przewodzenie wzdłuż lamel między tymi rurkami. Aby ocenić wpływ przepływów ciepła pomiędzy dwoma rzędami rurek o istotnej różnicy temperatur płynu wewnątrz, zastosowano symulacje komputerowe CFD.

Jako bazę przyjęto gładką lamelę oraz dwie różnice temperatur pomiędzy płynem wewnątrz rurek.

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

Gradienty zostały również wykorzystane przy analizie konfiguracji lamel „LU-VE Hitec”. Na podstawie symulacji CFD zaobserwowano, że dla zerowej różnicy temperatur, przepływ ciepła poprzez przewodzenie w środkowej strefie



Rysunek 3 Symulacje CFD

między rzędami jest również praktycznie zerowy (strefa adiabatyczna). Gdy zwiększana jest różnica temperatur płynu w rurkach, obserwowane są różne zjawiska dla różnych lamel:

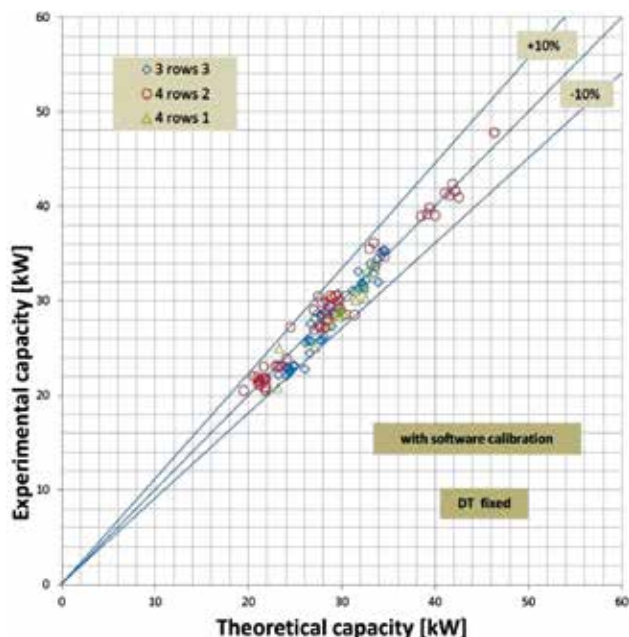
- dla lamel płaskich, przepływ ciepła przez przewodzenie (negatywny z punktu widzenia ogólnego przepływu ciepła lamel) wynosi aż 37%, co stanowi jego znaczący udział.
- dla lamel „LU-VE Hitec” przepływ ciepła przez przewodzenie stanowi jedynie 4% czyli wartość pomijalną.

Wynik tej analizy potwierdził, że technologia LU-VE pozwala na najlepsze wykorzystanie potencjału tkwiącego w CO_2 .

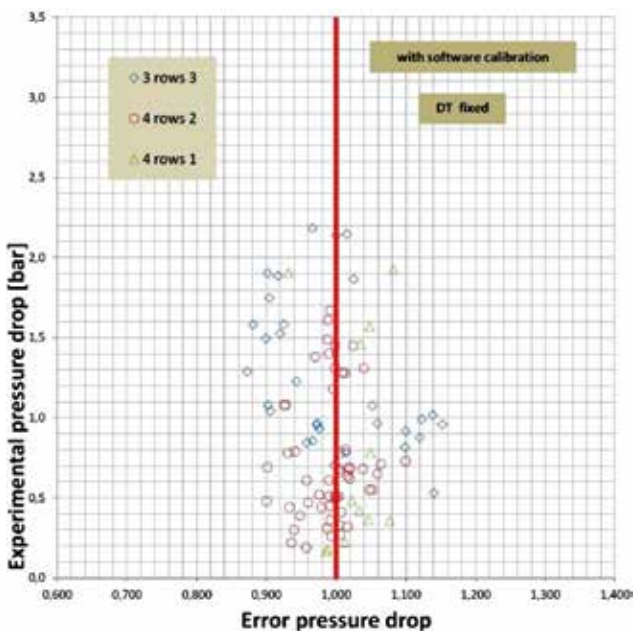
Rysunek 3 pokazuje rozkład temperatury dla lameli w strefie centralnej pomiędzy rzędami rurek dla czterech analizowanych konfiguracji, 0,1 mm przed linią środkową i 0,1 mm za (te powierzchnie są używane do kalkulacji przepływu ciepła przez przewodzenie). Mapy kolorów pokazują temperaturę lameli. Jak można zauważyć specyficzna konfiguracja nacięć pozwala na doskonały promieniowy transfer ciepła (wysoka efektywność termiczna lameli) oraz bardzo ograniczone przewodzenie ciepła stref pomiędzy rurkami sąsiednich rzędów.

4 WYNIKI EKSPERYMENTÓW I PORÓWNANIE Z OPROGRAMOWANIEM LU-VE W WARUNKACH NADKRYTYCZNYCH

Wykonano ogromną ilość testów w zakresie ciśnień 80 do 110 bar. Przebadano wiele parametrów również analizując 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 przejmowa-



Rysunek 4 – Trend obliczeniowej wydajności



Rysunek 5 – Rozrzut spadku ciśnienia

nia ciepła, nawet ponad 70% [Dang].

Podczas analizy danych eksperymentalnych, wyznaczono mnożnik 'RHTC' opisujący redukcję współczynnika wewnętrznego przejmowania ciepła i wzrost spadku ciśnienia. Odnaleziono również wzmiarki 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:

$$\text{RHTC} = f(\text{ID}, \text{pv}, \text{flux}, \text{Press.}, \text{xoil}, \text{TCO}^2, \text{typ oleju})$$

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 $2300 < \text{Re} < 5000000$).

Zidentyfikowane współczynniki korekcyjne zależą w pewnym stopniu od warunków pracy. Wykres na Rysunku 4 pokazuje trend wydajności teoretycznej/obliczeniowej, porównanej z danymi empirycznymi po zastosowaniu współczynnika korekcyjnego. Wykres pokazuje dwie linie graniczne odchylenia procentowego $\pm 10\%$. Rysunek 5 pokazuje trend zmiany spadku ciśnienia, którego wartości są wyrażone w jednostce bar. Rozrzut danych mieści się w bardzo racjonalnych granicach $\pm 15\%$.

5 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 cyklu CO_2 . Gas cooler jest elementem systemu, w którym najbardziej zmieniają się warunki pracy pomiędzy nadkrytycznymi i podkrytycznymi, dlatego musi zagwarantować wysoką efektywność wymiany ciepła w obu trybach pracy. Z tego względu jego konstrukcja musi uwzględniać optymalną równowagę pomiędzy tymi różnicowanymi warunkami pracy.

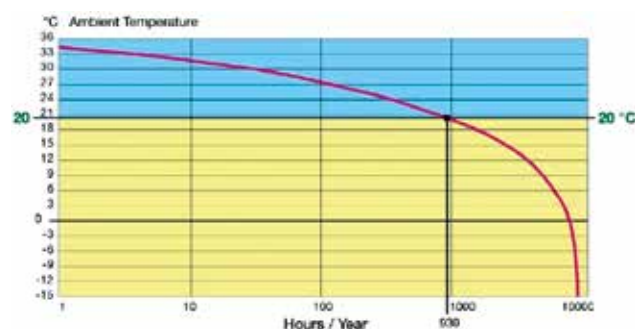
Sposób i zakres przeprowadzanych testów został ukie-
runkowany na takie gromadzenie danych aby kolejne eks-
perymenty wprowadzały największy możliwy progres w ba-
daniach i jednocześnie służyły kalibracji oprogramowania
dla zagwarantowania precyzji obliczeń modelujących bada-
ne procesy.

Eksperymenty zostały przeprowadzone w szczególnie
szerokim zakresie ciśnień, nawet aż do minimalnej tempe-
ratury skraplania 10°C .

Dodatkowo wprowadzono znaczące zróżnicowanie
w wartości przegrzania gazu na wlocie skraplacza oraz
przechłodzenia ciekłego czynnika.

Możliwe stało się precyzyjne skalibrowanie oprogra-
mowania w trzech strefach: wstępnej redukcji przegrzania,
strefy zmiany fazowej i przechłodzenia.

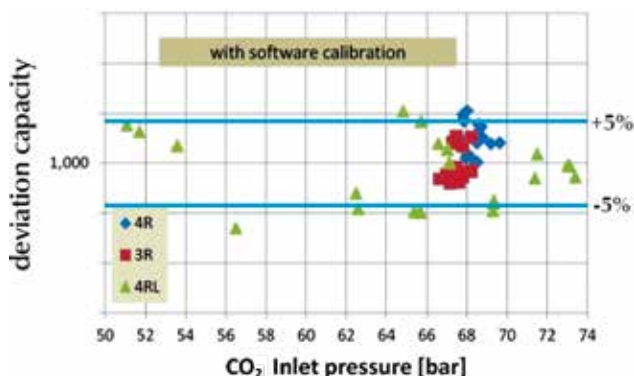
Strefą wymagającą największej ilości korekt była strefa
wstępnej redukcji przegrzania. Było to spowodowane ole-
jem tworzącym izolacyjny film pomiędzy czynnikiem i ścian-
kami wymiennika.



Rysunek 6 – Schemat skumulowanego rozkładu temperatur w typowej lokalizacji w Europie centralnej

Wykres na Rysunku 7 pokazuje rozkład teoretycznej/ob-
liczeniowej wydajności zestawionej z wydajnością uzyska-
ną w eksperymentach po zastosowaniu współczynników

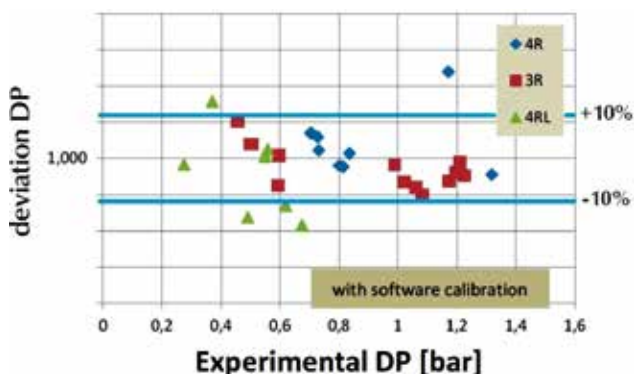
korekcyjnych w funkcji ciśnienia wlotowego do urządze-
nia. Kalibracja umożliwiła uporządkowanie danych em-
pirycznych w racjonalnym zakresie. Odchylenia są nie-
zależne od ciśnienia, również w strefie bliskiej punktu
krytycznego.



Rysunek 7 – Trend odchylenia wydajności w funkcji ciśnienia wlotowego CO_2

Trend wyznaczony przez punkty dla trzech testowanych
konfiguracji ma racjonalne odchylenia od wartości oblicze-
niowej. Oznacza to, że modyfikacja tylko współczynnika ko-
rekcyjnego wymiany ciepła i spadku ciśnienia nie prowadzi
do dalszego polepszenia dokładności obliczeń.

Rysunek 8 pokazuje rozkład spadku ciśnienia po stro-
nie czynnika CO_2 (obliczeniowy/empiryczny), jako funkcję
pomierzonych wartości w jednostce bar. Rozrzut mieści się
w akceptowalnych granicach. Odchylenia wzrastają gdy
maleje wartość mierzona ze względu na zawsze obecną
nieustaloność warunków pomiaru.



Rysunek 8 – Trend odchylenia spadku ciśnienia

6 WNIOSKI

Rozbudowany program eksperymentów w laboratorium
Lu-Ve pozwolił na znaczne rozszerzenie wiedzy na temat
zachowania CO_2 w układach chłodniczych, dostarczając
solidną bazę do precyzyjnych obliczeń „gas coolerów” za-
równo dla nadkrytycznych jak i podkrytycznych warunków
pracy. Dokładna kalibracja oprogramowania pozwoliła na
znaczną redukcję różnic pomiędzy obliczeniowymi i pomie-
rzonymi wartościami operacyjnymi.

Firma LU-VE stała się międzynarodową marką refe-
rencyjną 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 zadaszonej**)
- **2.350 m²** laboratoriów badawczo-rozwojowych
- ponad 70% produktów eksportowanych do **90 krajów**
- **€ 240 milionów łącznych** przychodów

