
1. Trudne wybory - historia i współczesność chłodnictwa przemysłowego

Wśród licznych procesów decyzyjnych, kadra zarządzająca w branży spożywczej staje przed problemami związanymi z chłodnictwem. Dobra jakościowo żywność wymaga schładzania na wielu etapach przetwarzania i przechowywania. Od technologów wymaga się często doboru właściwych metod i sposobów obniżania temperatury produktów. Podjęcie trafnej decyzji w tym zakresie powinno opierać się na rzetelnej wiedzy i zdobytym doświadczeniu. Doświadczenie jest rezultatem czasu, wiedza zaś procesem wymagającym wysiłku i poszukiwań. Szeroko dostępne informacje są najczęściej jedynie materiałem reklamowym, tworzonym dla powiększenia sprzedaży.

Chcąc poszerzyć zasób informacji o charakterze praktycznym i prawdziwym warto poznać historię chłodnictwa. Niektóre trendy i rozwiązania szybko przemijały. Inne, dzięki ciągłemu ulepszaniu, doskonale funkcjonują na świecie. Te procesy weryfikacji mają najczęściej charakter obiektywny. Zwyciężają rozwiązania optymalne technicznie i ekonomicznie.

W pierwszej części tekstu ukażemy wybrane doświadczenie zdobyte w ciągu prawie dwustu lat istnienia chłodnictwa przemysłowego. W drugiej podejmiemy próbę wskazania innowacji technicznych oraz rozwiązań nowatorskich, obecnych na współczesnym rynku chłodniczym. Celem niniejszego artykułu jest określenie przestrzeni w której poruszają się osoby związane ze schładzaniem żywności oraz podjęcie próby oceny niektórych rozwiązań technicznych. Ucząc się na błędach popełnionych przez innych, oszczędzamy sobie licznych przyszłych kłopotów. Co więcej, trafne innowacje przynoszą często największe korzyści pionierom. Sztuką jest prawidłowo ocenić proponowane rozwiązania.

Przeszłość i terażniejszość chłodnictwa

Pomimo, iż wykorzystanie chłodnictwa jako obniżania temperatury produktów sięga czasów starożytnych, technika chłodnicza ma swoje początki w XIX wieku¹. W 1850 roku Ferdynand Carre skonstruował pierwszą maszynę chłodniczą napełnioną wodą i kwasem siarkowym. Uznawany za twórcę chłodnictwa absorpcyjnego, opatentował następnie urządzenie wykorzystujące wodę i amoniak. Rozwiązanie to pozwalało przy niskich ciśnieniach osiągnąć efekt chłodniczy. Co więcej, nie wymagało szczególnej precyzji podczas produkcji.

Systemy absorpcyjne są stosowane do dziś. Ich niewątpliwą zaletą jest brak elementów ruchomych, podatnych na zużywanie się. Wadą jest niska sprawność a co się z tym wiąże - wyższe zużycie energii. Pomimo wysokiego kosztu początkowego, warto rozważyć zastosowanie urządzenia absorpcyjnego w przypadku znacznych nadwyżek energii cieplnej². Innym zastosowaniem urządzeń absorpcyjnych są pompy ciepła oraz chłodziarki campingowe, gdzie źródłem ciepła jest energia elektryczna z akumulatora.

Równoległe z F. Carre, Jacob Perkins opatentował sprężarkowy system chłodniczy. Jego system obejmował wszystkie elementy stosowane współcześnie: sprężarkę, skraplacz, parownik i element rozprężny. Czynnikiem chłodniczym powszechnie stosowanym był eter etylowy³. Pierwszą sprężarkę amoniakalną wyprodukował Dawid Boyle w 1872, a więc 4 lata przed Lindem (uważanym powszechnie za twórcę pierwszej sprężarki amoniakalnej). W ciągu najbliższych 12 lat wyprodukowano ponad 200 sprężarek, głównie stosowanych w transporcie morskim wołowiny.

Dalsza historia chłodnictwa to poszukiwania idealnych czynników chłodniczych oraz chłodziw. Choć już w czasach Perkinsa dostępne były czynniki naturalne: amoniak, powietrze, woda dwutlenek siarki, dwutlenek węgla czy też inne, upowszechnienie chłodziarek domowych wymagało znalezienia lepszego czynnika chłodniczego. Przedsiębiorstwo General Motor powierzyło to zadanie Thomasowi Midgeley. W rezultacie wyselekcjonowano R-12, a następnie zdecydowanie bardziej wydajny R-22⁴. Przełomowym momentem w historii chłod-

¹ Już w starożytnych Chinach używano lodów domowych, a Grecy i Rzymianie używali śniegu i lodu do schładzania napojów.

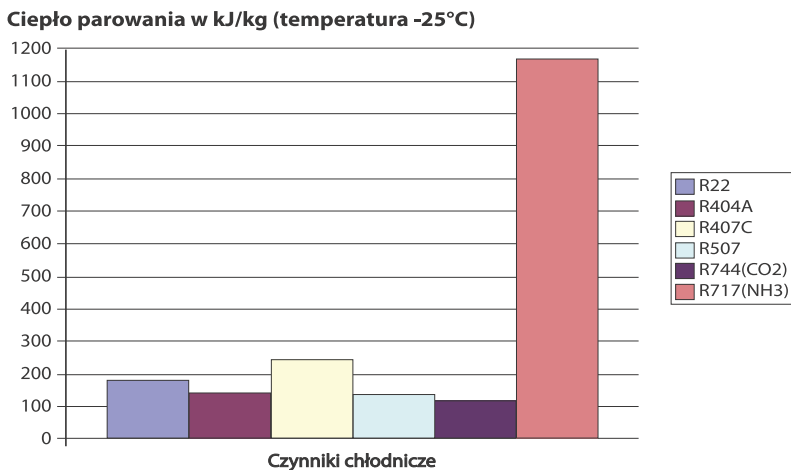
² Obieg absorpcyjny napędzany jest tzw. "sprężarką termiczną". W wanniku - desorberze do mieszaniny roboczej. Pod jego wpływem z roztworu wydzielają się pary czynnika chłodniczego (np amoniak, lub woda). Z kolei skroplony czynnik odparowuje np. w atmosferze wodoru w temperaturze -18C. Następnie pary amoniaku są absorbowane przez roztwór tzw. ubogi.

³ W 1863 Ch. Tellier zdobył patent na użycie eteru metylowego, pracującego przy wyższych ciśnieniu, a więc zmniejszający ryzyko zassania powietrza i wytworzenia mieszanki wybuchowej.

⁴ Świetna publikacja dotycząca historii czynników chłodniczych: S. Forbes Pearson, "Refrigerants Past Present and Futura" w biuletynie de l'Institut International du Froid nr 2004/03. Tłumaczenie tekstu w "Chłodnictwie" 2004, nr 7.

nictwa był rok 1974, kiedy to naukowcy Roland i Molina przedstawili hipotezę, iż chlorowcopochodne uszkadzają powłokę ozonową atmosfery. Gdy w 1985 r. stwierdzono znaczne ubytki warstwy ozonowej, podjęto natychmiastowe kroki, mające na celu zmniejszenie użycia chlorowcopochodnych. Dotychczas nie znaleziono substancji spełniającej kryteria idealnego czynnika chłodniczego. Miałby on nie tylko zerowy wpływ na warstwę ozonową, ale także był na tyle wydajny by poprzez nadmierne zużycie energii elektrycznej nie powodować globalnego ocieplenia.

W ciągu ostatnich dziesięcioleci radykalnie zmienił się sposób budowania nowych instalacji chłodniczych - zarówno przemysłowych jak i niewielkich urządzeń komercyjnych. Znacznie większy nacisk kładzie się na szczelność układu oraz wystarczającą wytrzymałość materiałów. Przykładem mogą być nowoczesne instalacje amoniakalne, w pełni bezpieczne dla obsługi. Poprzez wzrost kultury technicznej i rozwój wiedzy inżynierskiej, czynnik chłodniczy powinien spełniać inne kryteria niż przed kilkudziesięciu laty. Dzięki temu możliwe i uzasadnione ekonomicznie stało się zastosowanie dwutlenku węgla w układach chłodniczych pracujących do -54°C . Wydaje się również, iż należałoby dopuścić stosowanie R-22 w ściśle określonych warunkach. Niemniej jednak, obecne regulacje prawne pozostawiają zakładom niewielki wybór pomiędzy czynnikami syntetycznymi, często o niekorzystnych właściwościach termodynamicznych a czynnikami naturalnymi jak amoniak, powietrze czy dwutlenek węgla⁵.



rys.1. Ciepło parowania wybranych czynników chłodniczych. (Opracowanie J.P.)

⁵ Przykładowo entalpia właściwa amoniaku w temp. -10°C wynosi około 1300kJ/kg , podczas gdy R 404A jedynie 176kJ/kg . Patrz rys. 1.

Kolejne etapy rozwoju chłodnictwa to konstruowanie coraz lepszych sprężarek, początkowo tłokowych, a od momentu stosowania uszczelnienia olejowego, także sprężarki śrubowej. Ponieważ są to urządzenia o ruchu obrotowym, nie zaś posuwisto - zwrotnym, możliwym stało się na tyle dobre wyważenie, by zapewnić pracę na bardzo wysokich obrotach. W ten sposób zagwarantowano przyszłość amoniaku jako najlepszego czynnika w rozwiązaniach do -33°C przy bardzo dużych wydajnościach chłodniczych. Ciągłemu doskonaleniu podlegały także wymienniki ciepła. Od momentu szerokiego zastosowania wymienników płytowych, znacznie poprawiła się efektywność energetyczna układów chłodzenia. Pozwalają one osiągnąć dużą wydajność przy niewielkiej masie oraz minimalnej ilości czynnika chłodniczego w układzie⁶.

Rozwiązania nowatorskie

Spśród względnie nowych trendów w chłodnictwie przemysłowym, warto wspomnieć o układach kaskadowych, opartych na dwutlenku węgla, oraz tzw lodzie zawieszinowym - binarnym. Chociaż oba systemy stosowane są od wielu lat (lód binarny lata 70-te a szczególnie 90-te XX, dwutlenek węgla znacznie dłużej: pierwszy system oparty na CO₂ zbudował Thadeus Lowe 1862 roku), obecnie mają szansę zdominować wybrane rynki chłodnictwa. Dwutlenek węgla jest optymalną propozycją dla głębokiego mrożenia, lód binarny stanowi doskonałą alternatywę chłodziw dla temperatur powyżej 0°C .

Racjonalnym obszarem zastosowania instalacji CO₂ jest przedział temperatur -33°C do -54°C . W przypadku wyższych temperatur, korzystniejsze jest zastosowanie instalacji amoniakalnej. Dla porównania, sprężarka pracująca na dwutlenku węgla może mieć nawet 10 - krotnie mniejszą wydajność objętościową niż na przykład R22 dla osiągnięcia tego samego efektu chłodniczego. Oznacza to oszczędność nie tylko energii elektrycznej, ale także zużycia poszczególnych elementów urządzeń.

Kolejną możliwością zastosowania CO₂ w instalacji chłodniczej jest układ pośredni. Dwutlenek węgla doskonale zastępuje glikol lub solankę schładzaną w instalacji amoniakalnej. Skroplony czynnik jest następnie rozprężany w parowniku, gdzie odparowując pobiera 289,75 kJ/kg (entalpia parowania dla -20°C). Jest to taka ilość ciepła która podniosłaby temperaturę jednego kilograma glikolu propylenowego o ponad 90 K. W rezultacie zamiast rurociągów o średnicy 150 mm dla tej samej wydajności chłodniczej wystarczy zastosować przewody o średnicy 23

⁶ Przyjmuje się nawet około 80-100g na każdy 1kW wydajności chłodniczej.

mm. Zastosowanie CO₂ pozwala osiągnąć temperatury, przy których lepkość soli czy glikolu uniemożliwia normalną pracę układu.

Instalacje kaskadowe NH₃/CO₂ lub też oparte na dwutlenku węgla jako substancji pośredniczącej pozwalają osiągnąć zdecydowanie korzystniejsze efekty pracy instalacji o temperaturach poniżej -35°C niż inne czynniki. Podstawowym wyzwaniem są tu wysokie ciśnienia oraz nisko usytuowany punkt krytyczny dwutlenku węgla⁷.

W przypadku konieczności uzyskania temperatur powyżej 0°C, doskonałym rozwiązaniem wydaje się być tzw. "lód zawieszony". Jest to dwufazowa mieszanina drobin lodu oraz wody, lub też innej substancji. Często stosuje się tu 7% glikol. Lód jest jednym z najlepszych nośników "chłodu". Do stopienia jednego kilograma potrzeba dostarczyć 335kJ ciepła. Jest to ilość ciepła pozwalająca schłodzić kilogram mleka o około 80K. Zastosowanie lodu dwufazowego pozwala więc znacznie ograniczyć średnice rurociągów oraz znacznie ograniczyć zużycie energii elektrycznej. Od wielu lat ZC FROST buduje układy oparte na akumulacji lodu. Powszechnie stosowane oziębiacze akumulacyjne (typu ZZR, AOW czy inne) korzystają jednak z tzw. lodu twardego, namrażanego na węzownikach chłodzonych bezpośrednio lub pośrednio⁸. Zaletą lodu binarnego jest łatwość jego mieszania z podgrzaną wodą powrotną⁹. O ile w przypadku oziębiaczy akumulacyjnych w wymianie ciepła pośredniczy woda schładzana w zbiorniku z lodem, o tyle tutaj nośnikiem i magazynem jest zawieszona loda w wodzie¹⁰.

Podstawowym problemem, z którym wielu producentów urządzeń chłodniczych nie potrafi sobie poradzić jest sposób produkcji lodu dwufazowego. W ciągu ostatnich kilkunastu lat budowano generatory lodu, oparte na mechanicznym sposobie usuwania namrożonego lodu z chłodzonej powierzchni. Rozwiązanie to okazuje się jednak nieefektywne (budowane instalacje rzadko przekraczają 100kW wydajności) oraz zawodne i kosztowne z powodu zużywania się elementów ruchomych. Innym rozwiązaniem jest usuwanie lodu z chłodzonej płyty, poprzez czasowe podniesienie jej temperatury gorącymi parami czynnika chłodniczego. W tym przypadku powstają znaczne straty energii i system ten przestaje przynosić oczekiwane rezultaty ekonomiczne.

⁷ Warto wspomnieć publikację IIR będącą zbiorem dwustu artykułów i prac badawczych poświęconych zastosowaniu CO₂ w chłodnictwie: Bibliography on CO₂: 2004-2006 references and abstracts patrz: www.iifir.org.

⁸ System rur o długości kilku lub kilkunastu kilometrów pozwala zgromadzić nawet kilkaset ton lodu w czasie nocnej taryfy, przy niższych kosztach energii elektrycznej. Taki zapas pozwala łagodzić zapotrzebowanie szczytowe w ciągu dnia. W rezultacie wystarczą sprężarki chłodnicze o mniejszej wydajności, by osiągnąć lepszy efekt chłodniczy.

⁹ W oziębiaczach akumulacyjnych mieszadła wraz z systemem kierownic odpowiadają za prawidłowe omywanie oblodzonych węzownic.

¹⁰ Liczne badania eksperymentalne poświęcono wymianie ciepła między cząstkami skryształizowanego lodu a schładzaną cieczą. Por. Kawanami T., Yamada M., Itoh K., Experiments on melting of slush ice in a horizontal cylinder capsule, "Heat and Mass Transfer", 42, ss. 2981-2990, 1999. A także inne prace autorów.

Doskonałe rezultaty osiągają w tym zakresie producenci japońscy. Poprzez właściwe dobranie stężeń roztworu glikolowo - wodnego uzyskują w sposób efektywny mieszaninę dwufazową. Takie generatory pozwalają w pełni wykorzystać potencjał lodu zawieszinowego.

Stosowanie dwufazowego chłodziwa zapewnia wysoką gęstość strumienia ciepła, poprzez wykorzystanie ciepła utajonego przemiany fazowej. Problemem jest jednak racjonalne technicznie i ekonomicznie wytworzenie mieszaniny. Zdarza się, iż straty na etapie wytwarzania lodu binarnego przekraczają korzyści. Konsekwencją jest powolny rozwój "rewolucyjnej" technologii, jaką miał być i jest lód zawieszinowy¹¹.

Ogólny i powierzchniowy opis nowości chłodniczych, jakimi niewątpliwie jest stosowanie dwutlenku węgla czy lodu binarnego, nasuwa następujące wnioski:

- Należy spodziewać się dalszego doskonalenia technologii opartych o czynniki ekologiczne jakimi jest zarówno dwutlenek węgla jak i lód zawieszinowy (a także amoniak, powietrze czy woda).
- Kapitalne znaczenie praktyczne ma sposób wykorzystania innowacji, zgodny z najlepszą wiedzą inżynierską. Nie wystarczy sprzedać nowości, trzeba zapewnić przyszłemu inwestorowi wymierne korzyści z jej stosowania.
- Potrzeba wielu lat, aby wdrożyć innowacyjne systemy chłodzenia.

Kilkudziesięcioletnie doświadczenie naszego przedsiębiorstwa uprawnia nas do sformułowania hipotezy, iż w przypadku chłodnictwa przemysłowego optymalne rozwiązania są często kombinacją różnych układów. Częste problemy zakładów wynikają z niewłaściwego doboru systemu schładzania. Historia doskonale zweryfikowała poszczególne systemy i sposoby chłodzenia. Warto stosować te, które są optymalne nie tylko technologicznie, ale również opłacalne ekonomicznie.

¹¹ Dość dobre opracowania dotyczące mechanicznych metod produkcji lodu zawieszinowego znajdują się w raportach i notatkach technicznych Międzynarodowego Instytutu Chłodnictwa. Por. www.iifir.org. W języku polskim pojawiło się kilka ciekawych artykułów na łamach miesięcznika "Chłodnictwo" Organu Naczelnej Organizacji Technicznej. (między innymi artykuł Paula Rivet'a w numerze 4/2007, będący podsumowaniem kilkunastu lat doświadczeń w stosowaniu lodu zawieszinowego).