

System free-coolingu w klimatyzacji

Wzrost cen energii elektrycznej oraz rosnąca świadomość ekologiczna skłaniają użytkowników do poszukiwania efektywnych energetycznie i przyjaznych środowisku rozwiązań.

W odpowiedzi na te wyzwania w sektorach przemysłowych, handlowych oraz w systemach klimatyzacyjnych wprowadza się nowoczesne technologie mające na celu redukcję zużycia energii. Jednym z takich rozwiązań jest system free-coolingu, który wykorzystuje powietrze zewnętrzne do schładzania pomieszczeń w sposób bezpośredni lub pośredni.



dr inż. Sławomir Rabczak

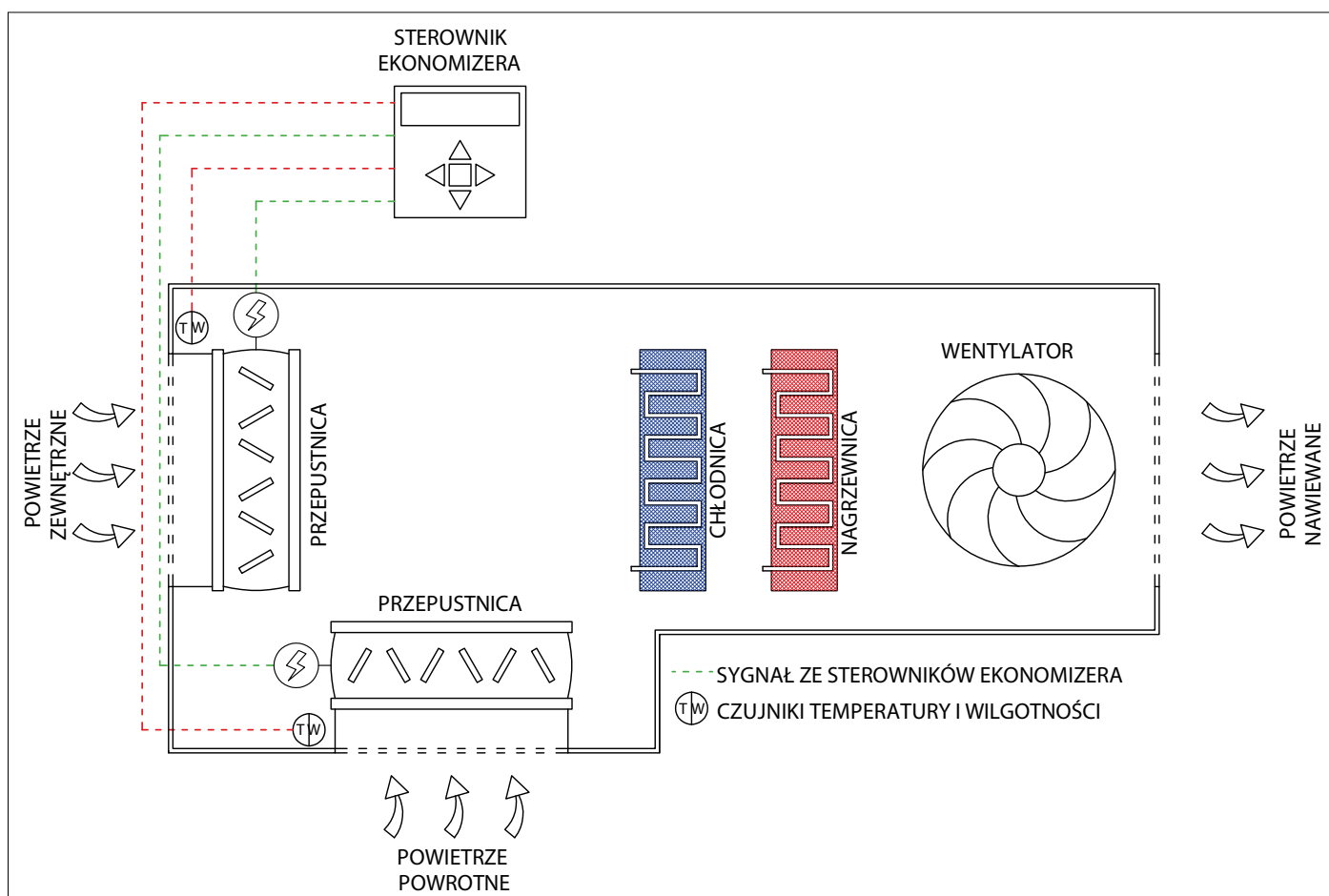


mgr inż. Justyna Darmochwał-Podoba

Free-cooling to technika wykorzystująca naturalne warunki środowiskowe, głównie niską temperaturę powietrza zewnętrznego, do schładzania pomieszczeń lub procesów technologicznych, bez koniecz-

ności stosowania energochłonnych urządzeń chłodniczych, takich jak sprężarki. Jest to rozwiązanie oparte na zasadzie wykorzystania różnicy temperatur między powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym, co pozwala na reduk-

cję zużycia energii elektrycznej oraz obniżenie kosztów eksploatacyjnych. System free-coolingu działa w oparciu o prostą zasadę fizyczną: wymiana ciepła między powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym. Gdy temperatura powietrza na zewnątrz jest niższa niż temperatura w pomieszczeniu, system wykorzystuje to powietrze do schłodzenia wnętrza. W zależności od konfiguracji free-cooling może działać w trybie bezpośrednim lub pośrednim.



Rys. 1. Schemat układu z wykorzystaniem free-coolingu bezpośredniego

Rys. autorów

W trybie bezpośrednim chłodniejsze powietrze zewnętrzne jest wprowadzane bezpośrednio do pomieszczenia, zastępując cieplejsze powietrze wewnętrzne. Proces ten wymaga jednak wstępnej obróbki powietrza (np. filtracji, nawilżania lub osuszania), aby zapewnić odpowiednie parametry komfortu (rys. 1).

Zastosowanie: głównie w okresach przejściowych (wiosna, jesień) oraz zimą, gdy temperatura zewnętrzna jest znacznie niższa niż wewnętrzna.

Ograniczenia: nie nadaje się do stosowania w klimacie gorącym lub wilgotnym, gdzie temperatura zewnętrzna rzadko spada poniżej wewnętrznej.

W trybie pośrednim powietrze wewnętrzne nie jest wprowadzane bezpośrednio do pomieszczenia, ale służy do schłodzenia medium pośredniczącego (np. wody lub glikolu), które następnie oddaje chłód do systemu klimatyzacyjnego (rys. 2).

Zastosowanie: system ten jest bardziej uniwersalny, ponieważ może działać nawet przy wyższych temperaturach zewnętrznych, o ile są one niższe niż temperatura powrotu medium chłodzącego.

Konfiguracja: w systemach pośrednich często montuje się dodatkowe chłodnice free-cooling oraz zawory trójdrogowe, które umożliwiają przełączanie między tradycyjnym chłodzeniem sprężarkowym a free-coolingiem.

System free-cooling znajduje zastosowanie przede wszystkim w obiektach charakteryzujących się znacznymi zyskami ciepła przez cały rok. Do takich obiektów należą m.in.: serwerownie, centra handlowe oraz zakłady przemysłowe. Wdrożenie tego systemu wiąże się jednak ze zwiększonymi nakładami inwestycyjnymi, związanymi głównie z koniecznością zakupu agregatów wody lodowej wyposażonych w układ free-cooling. Ponadto koszty generuje konieczność instalacji dodatkowych chłodnic free-coolingowych lub układów obejściowych w systemie chillerów [1].

Stosowalność systemu free-cooling jest silnie uzależniona od dwóch klu-

zowych czynników: wielkości zysków ciepła w pomieszczeniu oraz temperatury powietrza zewnętrznego. Rozwiązanie to działa efektywnie tylko wtedy, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest na tyle niska, aby umożliwić schłodzenie wody chłodniczej lub powietrza w pomieszczeniu. Jednocześnie w samym pomieszczeniu muszą występować odpowiednie zyski ciepła, które wymagają usunięcia nawet przy niskich temperaturach zewnętrznych. Ta specyfika działania systemu znacznie ogranicza czas jego stosowania – zazwyczaj do 1–2 miesięcy w roku, przy założeniu pracy urządzeń klimatyzacyjnych przez kilka godzin dziennie [2].

JAK DZIAŁA SYSTEM FREE-COOLING

Jednym z najprostszych systemów wykorzystujących zjawisko naturalnego chłodzenia powietrzem jest system free-cooling bezpośredniego (rys. 1). Jego działanie polega na bezpośrednim wykorzystaniu powietrza zewnętrznego do chłodzenia pomieszczeń klimatyzowanych. Rozwiązanie to jest często stosowane w modułowych lub monoblokowych centralach klimatyzacyjnych, które przygotowują powietrze pierwotne w systemach o dwuetapowym uzdatnianiu powietrza.

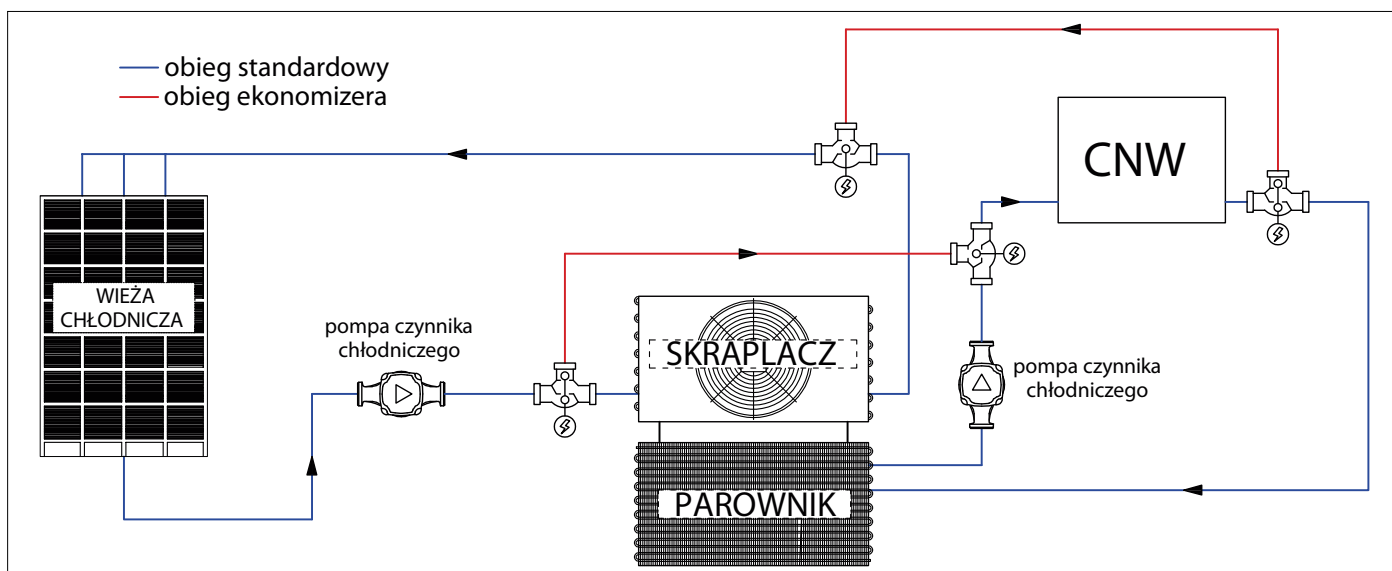
W centralach modułowych funkcja free-cooling jest realizowana za pośrednictwem komory mieszania, w której poprzez odpowiednie sterowanie przepustnicami powietrza świeżego i recyrkulacyjnego zwiększa się udział powietrza zewnętrznego aż do 100% w powietrzu nawiewanym. Celem jest maksymalne wykorzystanie chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym [3]. Zwiększona ilość świeżego powietrza zewnętrznego jest utrzymywana na maksymalnym poziomie tylko przez określony czas, gdy warunki zewnętrzne sprzyjają realizacji procesu free-cooling. W pozostałym czasie przepustnice są ustawiane na minimalny udział powietrza świeżego, zgodnie z wymaganiami wentylacyjnymi.

Za optymalne sterowanie udziałem poszczególnych strumieni powietrza odpowiada sterownik mikroprocesorowy, który w oparciu o czujniki temperatury oraz specjalny algorytm sterowania (tzw. ekonomizer) dokonuje precyzyjnego ustawienia kąta przepustnic [4]. W przypadku monoblokowych central klimatyzacyjnych, które pracują ze 100% udziałem świeżego powietrza, funkcja free-cooling jest realizowana poprzez dezaktywację sprężarkowego układu chłodniczego. Dzieje się tak wówczas, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest na tyle niska, że pozwala na osiągnięcie żądanej temperatury nawiewu bez konieczności pracy układu chłodniczego.

Drugim rodzajem wykorzystania chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym jest free-cooling pośredni. System ten umożliwia schłodzenie powietrza wewnętrznego z wykorzystaniem medium pośredniczącego, które pełni rolę nośnika ciepła między powietrzem ochładzanym a zewnętrznym. W tym procesie ciecz pośrednicząca (np. woda lub roztwór glikolu) odbiera ciepło od powietrza wewnętrznego, a następnie oddaje je do świeżego powietrza zewnętrznego. W ten sposób powietrze zewnętrzne pośrednio schładza powietrze w pomieszczeniu (rys. 2).

System free-cooling pośredniego jest szczególnie korzystny w sytuacjach, gdy bezpośrednie wprowadzenie powietrza zewnętrznego do pomieszczenia jest niemożliwe lub niepożądane, np. ze względu na wysoką wilgotność lub zanieczyszczenia w powietrzu zewnętrznym. Dodatkowo system ten może być zintegrowany z tradycyjnymi układami chłodniczymi, co pozwala na elastyczne dostosowanie do zmiennych warunków klimatycznych [5].

Możliwe jest również zastosowanie ekonomizera w układzie free-cooling, który pełni funkcję wymienika chłodu, dodatkowo dochładzając płyn w obiegu. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Schemat układu do produkcji wody lodowej z wykorzystaniem free-coolingu pośredniego

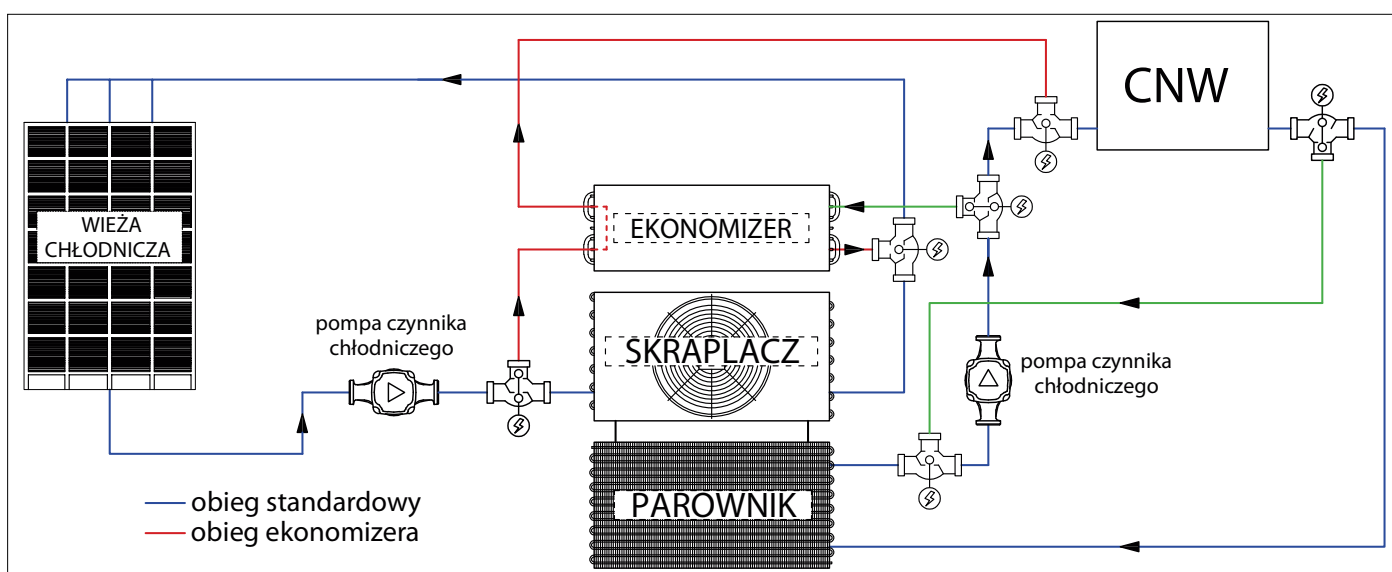
Systemy klimatyzacyjne, które wymagają przygotowania wody o określonej temperaturze, zazwyczaj wykorzystują sprężarkowe agregaty do jej schłodzenia. Jednakże zastosowanie powietrza o niskiej temperaturze do schłodzenia cieczy pośredniczącej bez konieczności uruchamiania sprężarkowego układu chłodniczego przynosi wymierne korzyści finansowe. Są one związane z niższymi kosztami eksploatacji, a także przyczyniają się do zwiększenia wartości dzięki wyższej efektywności energetycznej działających w nim systemów [6].

Cieczą pośredniczącą w systemach free-coolingu może być woda zasilająca odbiorniki chłodu, takie jak klimakonwektory czy belki chłodnicze, lub inne medium, np. czynnik chłodniczy. Proces free-coolingu jest jednak realizowany tylko wtedy, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od temperatury wody na powrocie z instalacji. Z tego powodu w wielu przypadkach system free-coolingu działa w kombinacji ze sprężarkowymi agregatami chłodniczymi, które przejmują obciążenie chłodnicze, gdy warunki zewnętrzne uniemożliwiają efektywne wykorzystanie chłodu z powietrza zewnętrznego [7].

Mechaniczne rozwiązanie free-coolingu pośredniego jest w pewnym stopniu powiązane z pracą agregatu chłodniczego. W związku z tym można wyróżnić cztery główne warianty realizacji tego systemu:

1. Dodatkowy wymiennik free-coolingu z zaworem trójdrogowym

W tym wariantie system free-coolingu jest realizowany poprzez dodatkowy wymiennik ciepła oraz trójdrogowy zawór regulacyjny, które stanowią opcjonalne wyposażenie dla monoblokowego agregatu chłodniczego. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest przełączanie



Rys. 3. Schemat układu do produkcji wody lodowej z wykorzystaniem ekonomizera na obiegu free-coolingu pośredniego

Rys. autorów

między trybem tradycyjnego chłodzenia a free-cooling w zależności od warunków zewnętrznych.

2. Wymiennik pośredni, pompa glikolowa oraz dodatkowy wymiennik free-cooling

W tym przypadku system składa się z wymiennika pośredniego, pompy glikolowej oraz dodatkowego wymiennika free-cooling, który współpracuje ze sprężarkowym agregatem wody ziemniczej. Rozwiązanie to pozwala na efektywne wykorzystanie chłodu z powietrza zewnętrznego, nawet przy wyższych temperaturach.

3. Rozwiązanie bez dodatkowego wymiennika free-cooling

W tym wariantcie system free-cooling wykorzystuje typowy układ chłodniczy agregatu chłodniczego oraz pompę czynnika chłodniczego, która pracuje w okresie postoju sprężarki. Proces schładzania cieczy odbywa się za pośrednictwem powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze, co pozwala na oszczędność energii.

4. Inne rozwiązania, np. wykorzystanie free-coolera

W tym wariantcie stosuje się dry-cooler (tzw. free-cooler), którego zadaniem jest schłodzenie cieczy w instalacji za pośrednictwem powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze. Rozwiązanie to jest szczególnie efektywne w klimatach umiarkowanych, gdzie temperatura powietrza zewnętrznego często spada poniżej wymaganej temperatury schłodzenia.

Dry-cooler, realizujący proces free-cooling, może być wykorzystywany zarówno w systemach z monoblokowymi agregatami chłodniczymi ze skraplaczem chłodzonym cieczą, jak i w systemach z monoblokowymi agregatami ze skraplaczem chłodzonym powietrzem. W obu przypadkach dry-cooler pełni kluczową rolę w optymalizacji procesu chłodzenia, dostosowując swoją funkcję do warunków zewnętrznych.

W przypadku agregatów ze skraplaczem chłodzonym cieczą dry-cooler działa w dwóch trybach:

1. w okresach wysokich temperatur powietrza zewnętrznego odprowadza cie-

pło ze skraplaczy podczas produkcji mocy chłodniczej, wspomagając pracę agregatu;

2. w okresach niskich temperatur powietrza zewnętrznego pełni funkcję free-coolera, czyli urządzenia, które – przy minimalnym poborze mocy (tylko przez silniki wentylatorów) – schładza ciecz do żądanej temperatury, eliminując konieczność pracy sprężarki.

W przypadku monoblokowych agregatów chłodniczych ze skraplaczem chłodzonym powietrzem dry-cooler może pełnić funkcję urządzenia wstępnie schładzającego wodę do wymaganej temperatury. W razie potrzeby dalsze chłodzenie jest realizowane na parowniku agregatu chłodniczego, co pozwala na elastyczne dostosowanie systemu do zmiennych warunków eksploatacyjnych [9].

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA FREE-COOLINGU

Zapotrzebowanie na energię chłodniczą obliczono dla analizowanego obiektu, którym jest budynek centrum handlowego typu „galeria”. Przyjęto parametry powietrza wewnętrznego i zewnętrznego zgodnie z obowiązującymi polskimi normami w tym zakresie:

- temperatura wewnętrzna w okresie letnim na poziomie 21°C;
- temperatura zewnętrzna zmienna w zależności od godziny, jednak za godzinę obliczeniową przyjęto 15:00 w miesiącu lipcu, co odpowiada typowemu szczytowemu obciążeniu chłodniczemu.

Na podstawie analizy zysków ciepła w obiekcie określono ilość powietrza wentylacyjnego na poziomie 950 000 m³/h. W analizowanym przypadku w centralach klimatyzacyjnych zastosowano systemy odzysku ciepła, które w okresie letnim pełnią funkcję odzysku chłodu z powietrza wywiewanego. Sprawność odzysku chłodu wynosi ok. 75%, co pozwala na obniżenie temperatury powietrza nawiewanego z 29,5 do 26,5°C.

Pomimo zastosowania systemu odzysku chłodu moc chłodnicza wymaga-

do zapewnienia komfortu termicznego w obiekcie osiągnęła wartość 3100 kW. Wynik ten uwzględnia zarówno zyski ciepła od ludzi, oświetlenia oraz urządzeń, jak i przepływ powietrza wentylacyjnego.

Dla przyjętych założeń obliczono zapotrzebowanie na chłód dla każdego miesiąca, przyjmując w uproszczeniu, że jest ono zależne od różnicy entalpii między powietrzem w pomieszczeniu (h_p) a powietrzem zewnętrznym (h_z).

Dla miesiąca lipca obliczona wartość zapotrzebowania na chłód wynosi

$$Q_{ch}^{lipiec} = 3100 \text{ kW.}$$

Dla pozostałych miesięcy wartość ta zależy w przybliżeniu od parametrów powietrza zewnętrznego, zgodnie z następującą zależnością:

$$Q_{ch}^{miesiac} = Q_{ch}^{lipiec} \cdot \frac{\Delta h_{miesiac}}{\Delta h_{lipiec}} \text{ [kW]} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{miesiac}$ – zapotrzebowanie na chłód dla danego miesiąca [kW];

Q_{ch}^{lipiec} – zapotrzebowanie na chłód dla lipca [kW];

Δh_{lipiec} – różnica entalpii dla chłodzenia dla miesiąca lipca, odczytana z wykresu i-x, -15 kJ/kg;

$\Delta h_{miesiac}$ – różnica entalpii dla chłodnicy dla danego miesiąca [kJ/kg], liczona jako:

$$\Delta h_{miesiac} = h_{ch} - h_z^{miesiac} \text{ [kJ/kg]} \quad (2)$$

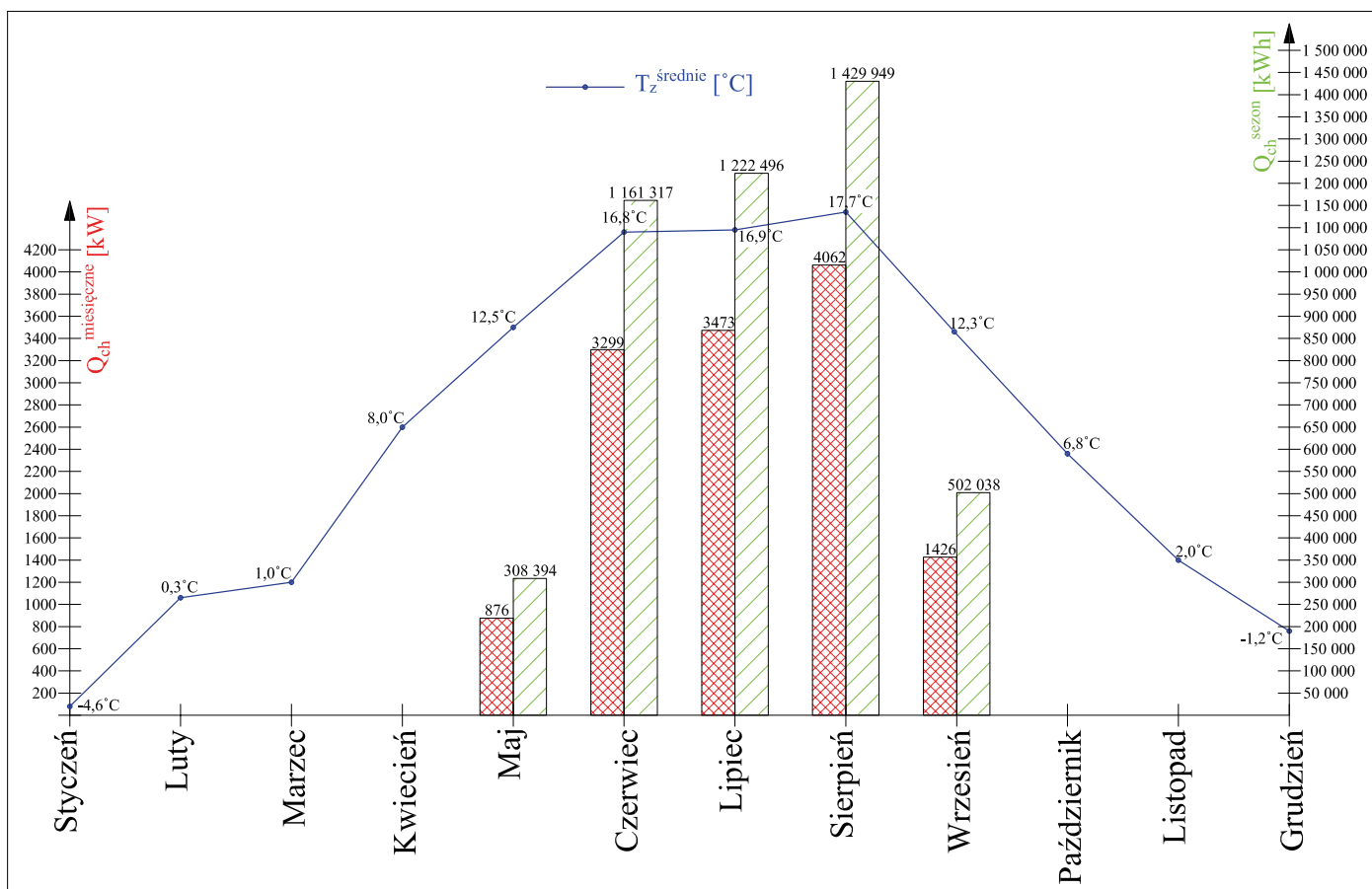
h_z – średnia wartość entalpii powietrza dla każdego miesiąca według danych stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka [kJ/kg],

h_{ch} – entalpia powietrza po ochłodzeniu [kJ/kg].

Chłodzenie jest wymagane jedynie w sytuacji, gdy entropia powietrza w pomieszczeniu (h_p) jest mniejsza od entropii powietrza zewnętrznego (h_z), czyli gdy spełniony jest warunek: $h_p < h_z$.

Obliczenie sezonowego zapotrzebowania na energię chłodniczą

Na podstawie średniego godzinowego zapotrzebowania na chłód w poszczególnych miesiącach wyznaczono sezonowe miesięczne zapotrzebowanie na energię chłodniczą. Wartość ta jest obliczana



Rys. 4. Zestawienie mocy chłodniczej w poszczególnych miesiącach

jako iloczyn średniego zapotrzebowania godzinowego na chłód oraz liczby godzin pracy systemu chłodzenia w danym miesiącu.

$$Q_{ch}^{\text{sezonowe}} = Q_{ch}^{\text{miesiąc}} \cdot t \text{ [kWh]} \quad (3)$$

gdzie:

t – czas pracy urządzenia chłodniczego (wentylacji) w ciągu miesiąca [h].

Założenia dotyczące czasu pracy układu chłodniczego

Dla statystycznego miesiąca przyjęto, że układ chłodniczy działa średnio:

- 12 h dziennie w dni powszednie (26 dni),
- 10 h dziennie w niedziele (4 dni).

Łączny czas pracy układu chłodniczego w miesiącu wynosi zatem:

$$t = 26 \times 12 + 4 \times 10 = 352 \text{ h/miesiąc.}$$

Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń zestawiono na rys. 4. Jak wynika z analizy, zapotrzebowanie na chłód występuje jedynie w miesiącach letnich, tj. od maja do września włącznie.

Określenie ram czasowych dla systemu free-cooling

W celu określenia ram czasowych, w których możliwe będzie wykorzystanie systemu free-cooling, należy najpierw ustalić:

- granice stosowania instalacji chłodniczej, czyli okresy, w których temperatura zewnętrzna umożliwia efektywne chłodzenie;
- konieczność chłodzenia w pomieszczeniu związaną z występowaniem zysków ciepła wymagających usunięcia.

Sytuacja, w której możliwe jest wykorzystanie systemu free-cooling, występuje, gdy temperatura nawiewu zrówna się z temperaturą po odzysku ciepła na wymienniku krzyżowym. Proces ten trwa do momentu, gdy temperatura nawiewu zrówna się z temperaturą zewnętrzną. Zmianę omawianych temperatur przedstawiono na rys. 5.

Założenia dotyczące temperatury wody lodowej

W analizowanym systemie przyjęto następujące założenia dotyczące temperatury wody lodowej:

- w okresie letnim woda lodowa jest schładzana od 12 do 7°C,

- w okresie przejściowym woda lodowa jest schładzana od 15 do 9°C.

Warunki pracy systemu free-cooling

Punktem wyjścia dla działania systemu free-cooling jest sytuacja, w której temperatura powietrza zewnętrznego (T_z) zrówna się z temperaturą powrotu z instalacji wody chłodniczej w okresie przejściowym, tj. gdy $T_z < 15^{\circ}\text{C}$.

W okresie zimowym założono współpracę systemu klimatyzacji z instalacją centralnego ogrzewania, przyjmując różnicę temperatur między powietrzem w pomieszczeniu a powietrzem nawiewanym na poziomie Δt_z w zimie = 1 K.

Możliwość pozyskania chłodu w okresie przejściowym

Możliwość pozyskania chłodu z powietrza zewnętrznego w celu przygotowania wody chłodzącej w centrali klimatyzacyjnej występuje jedynie w okresie przejściowym,

tj. w miesiącach kwiecień, maj oraz wrzesień (rys. 6).

Sprawność wykorzystania systemu free-cooling

Obliczone wartości sprawności wykorzystania systemu free-cooling zestawiono w tab. 1. Sprawność ta jest stosunkowo niska i osiąga maksimum przy temperaturze zewnętrznej 9°C oraz maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{fc} .

Sezonowa moc pozyskiwana z systemu free-cooling

Wielkość sezonowej mocy możliwej do pozyskania z systemu free-cooling (Q_{fc}) określa zależność:

$$Q_{fc} = Q_{ch}^{sezonowe} \cdot \eta_{fc} \text{ [kWh]} \quad (4)$$

gdzie:

$Q_{ch}^{sezonowe}$ – sezonowe zużycie energii chłodniczej dla miesięcy o średniej temperaturze powietrza 9–15°C [kWh],

η_{fc} – sprawność systemu free-cooling w %.

Orientacyjne wielkości mocy układu chłodniczego z systemu free-cooling

Na podstawie przeprowadzonych analiz określono orientacyjne wielkości mocy układu chłodniczego, które mogą być pozyskane z systemu free-cooling. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tab. 2.

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli skrajne wartości sprawności systemu free-cooling mieszczą się w zakresie od 15 do 17%. Wartości te odnoszą się do dwóch miesięcy, w których system ten jest w stanie działać przy założonych parametrach wody lodowej, tj. schładzaniu wody od 15 do 9°C w okresie przejściowym.

Porównanie z całkowitym zapotrzebowaniem na energię chłodniczą

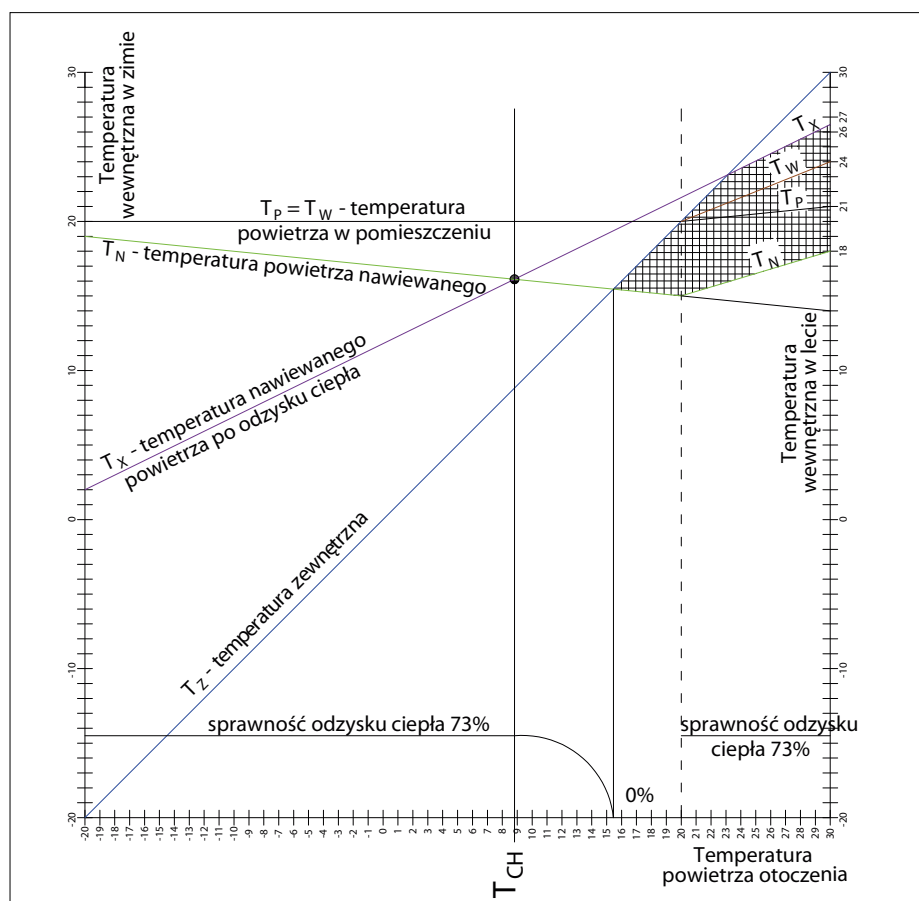
W porównaniu z całkowitym zapotrzebowaniem na energię chłodniczą w sezonie chłodniczym, które wynosi 4,6 MWh, działający układ free-cooling pozwala na zmniejszenie tej wartości jedynie o ok. 3%. Oznacza to, że system free-cooling ma ograniczony wpływ na redukcję całkowitego zużycia energii, jednak w określonych warunkach może stanowić wartościowe uzupełnienie tradycyjnych systemów chłodzenia.

PODSUMOWANIE

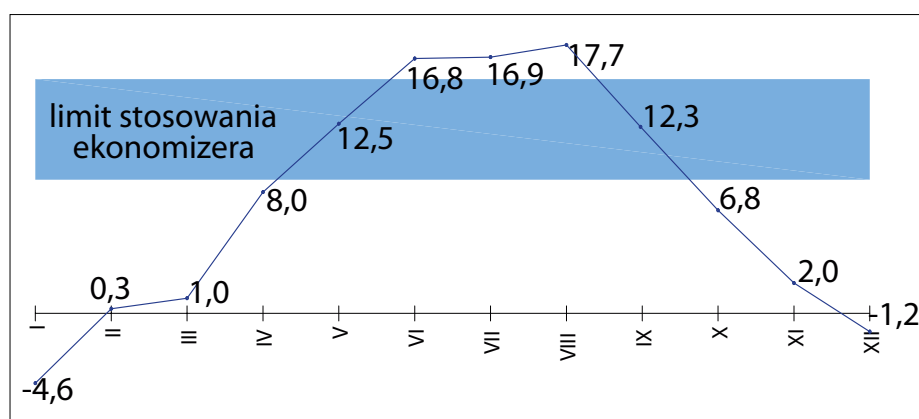
Systemy free-cooling są szczególnie zalecane do stosowania w obiektach o dużych zyskach ciepła wewnętrznego, takich jak centra handlowe, serwerownie czy zakłady przemysłowe. W okresie przejściowym, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od wymaganej temperatury wewnętrznej, ale

zyski ciepła generowane w obiekcie powodują wzrost temperatury wewnętrznej, systemy te mogą stanowić efektywne źródło chłodu.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, systemy free-cooling mogą pokryć ok. 3% całkowitego zapotrzebowania na energię chłodniczą w sezonie chłodniczym. Choć wartość ta nie jest znacząca z perspektywy



Rys. 5. Wykres T_z-T_p dla analizowanego przypadku obciążenia chłodniczego budynku; oznaczenia na rys.: T_z – temperatura zewnętrzna, T_p – temperatura w pomieszczeniu, T_n – temperatura nawiewu, T_w – temperatura wywiewu, T_{ch} – temperatura chłodzenia, T_x – temperatura po odzysku ciepła



Rys. 6. Wykres zmienności temperatury powietrza zewnętrznego w zależności od miesiąca

Tab. 1. Wydajność systemu free-cooling w zależności od temperatury zewnętrznej

Temperatura otoczenia T_z [°C]	Różnica temperatur ΔT_{fc} [°C]	Sprawność systemu free-cooling η_{fc}
15	0	0%
14	1	0%
13	2	10%
12	3	20%
11	4	30%
10	5	40%
9	6	50%

Tab. 2. Wielkość mocy chłodniczej pozyskanej z systemu free-cooling

Miesiąc	Temperatura otoczenia T_z [°C]	Sprawność systemu free-cooling η_{fc}	Zapotrzebowanie na chłód Q_{ch} [kWh]	Sezonowa moc Q_{fc} [kWh]
V	12,5	15%	308 394	46 259
IX	12,3	17%	502 038	85 346
$\Sigma =$				131 606

inwestycyjnej, to w okresach, gdy system może działać (głównie w miesiącach przejściowych), pokrywa on ok. 16% zapotrzebowania na chłód. Warto zauważyć, że systemy te charakteryzują się bardzo niskimi kosztami eksploatacyjnymi w porównaniu z tradycyjnymi sprężarkowymi układami chłodniczymi, co czyni je atrakcyjną alternatywą w określonych warunkach.

W zależności od sezonowego współczynnika wydajności energetycznej (ESEER) układu chłodniczego oraz mocy pomp obiegowych w systemie free-cooling oszczędności energii elektrycznej mogą sięgać od 15 do 30%. Przyjmując, że zużycie energii w tym systemie jest ok. 10 razy mniejsze niż w systemie ze sprężarką elektryczną o współczynniku ESEER na poziomie 3,0–3,5, można uznać, że stosowanie tego rozwiązania staje się uzasadnione ekonomicznie. W okresach, gdy system free-cooling może działać, oszczędności w bilansie miesięcznym są na tyle znaczące, że warto rozważyć jego wdrożenie.

Nasuważące się wnioski:

1. Systemy free-cooling są najbardziej efektywne w obiektach o dużych zyskach

ciepła, szczególnie w okresach przejściowych, gdy temperatura zewnętrzna umożliwia ich pracę.

2. Mimo że udział systemu free-cooling w całkowitym zapotrzebowaniu na energię chłodniczą w sezonie jest stosunkowo niewielki, w okresach jego działania może on pokryć ok. 16% zapotrzebowania na chłód, co stanowi wartościowe uzupełnienie tradycyjnych systemów chłodzenia.

3. Niskie koszty eksploatacji oraz znaczne oszczędności energii elektrycznej (15–30%) sprawiają, że systemy free-cooling są atrakcyjnym rozwiązaniem w określonych warunkach.

W przyszłości warto by rozważyć działanie tego typu systemu w kilku wariantach:

- integracja tego rozwiązania z odnawialnymi źródłami energii (np. panelami fotowoltaicznymi), aby zwiększyć jego efektywność;
- zastosowanie zaawansowanych systemów sterowania, które pozwolą na optymalizację pracy układu w zależności od warunków zewnętrznych i wewnętrznych;

- rozszerzenie analizy na inne typy obiektów (np. biurowce, hotele) w celu określenia uniwersalnych zasad stosowania systemów free-cooling. ■

Literatura

1. N.B. Lamptey, S.K. Anka, K. Ho Lee, Y. Cho, J.W. Choi, J.M. Choi, *Comprehensive Energy analysis of cooling Energy performance between conventional and hybrid air source internet data center cooling system*, „Energy and Buildings”, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113759>.
2. H.A. Moghaddam, S. Tkachenko, G.H. Yeoh, V. Timchenko, *A newly designed BIPV system with enhanced passive cooling and ventilation*, „Building Simulation”, t. 16, 2023, s. 2093–2107, <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1051-z>.
3. J. Wang, X. Cao, Y. Yuan, N. Yu, X. Zhou, J. Li, L. Wu, *Experimental study on free cooling performance of an integrated cooling system based on loop thermosyphon for data centers*, „Energy” 2025, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135706>.
4. C. Zhao, Y. Jing, X. Xie, Y. Jiang, *Application and simulation of IEC water chillers for summer free cooling in data center*, „Applied Thermal Engineering”, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124915>.
5. X. Su, Y. Luo, L. Zhang, *The synthetical effects of passive radiative cooling buildings on building daylighting and Energy performance: A case study in Miami*, „Sustainable Cities and Society”, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106190>.
6. M. Iten, S. Liu, A. Shukla, *A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.007>.
7. Y. Ho-Chun, I. Seon-Dong, *A study on the Effect of Free Cooling by Natural Ventilation in Department Store*, „Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design”, 2012, https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2012.28.5.267.
8. Z. Lin, C.K. Lee, S. Fong, T.T. Chow, T. Yao, A.L.S. Chan, *Comparison of annual Energy performances with different ventilation methods for cooling*, „Energy and Buildings”, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.033>.
9. A. Chuanxian, C. Yinghu, Z. Liang, *Energy Efficiency Analysis of Data Center Based on All-Inverter Coupled Air-Side Free Cooling Technology*, 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium, 2023, s. 61–69, doi.10.1109/AEEES56888.2023.10114148.