

Sławomir RABCZAK¹
Danuta PROSZAK-MIĄSIK²
Krzysztof NOWAK³

WYKORZYSTANIE SYSTEMU FREE-COOLINGU W KLIMATYZACJI

Ciągle rosnące ceny energii elektrycznej, często zmuszają użytkowników do poszukiwania oszczędności, oraz nowych, tanich i ekologicznych źródeł energii. W wielu gałęziach przemysłu, handlu są wprowadzane nowoczesne urządzenia mające na celu zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Również w systemach klimatyzacji coraz częściej stosuje się różnego rodzaju urządzenia zmniejszające koszty eksploatacyjne. Do takich rozwiązań należy system free-cooling'u. Polega on na wykorzystaniu powietrza zewnętrznego do procesu schładzania powietrza wewnętrznego w sposób pośredni lub bezpośredni. Stosowanie rozwiązania bezpośredniego jest możliwe jedynie, gdy temperatura powietrza zewnętrznego spadnie poniżej temperatury powietrza w pomieszczeniu, czyli w okresie przejściowym i zimowym, gdy wymagane jest jeszcze chłodzenie na skutek dużych zysków ciepła. Polega on na bezpośrednim nawiewaniu chłodniejszego powietrza zewnętrznego, po wcześniejszej jego obróbce w celu nadania mu odpowiednich parametrów. Free-cooling pośredni, najczęściej jest realizowany poprzez zamontowanie dodatkowej chłodnicy free-cooling i zaworu trójdrogowego w sprężarkowym agregacie chłodniczym. Gdy temperatura na zewnątrz spadnie poniżej temperatury powrotu medium pośredniczącego, free-cooling rozpoczyna pracę częściowego lub przy niższych temperaturach całkowitego schładzania czynnika pośredniczącego. W artykule przedstawiono analizę zapotrzebowania w chłód dla wybranego obiektu oraz możliwość pokrycia częściowego z wykorzystaniem systemu free'cooling'u. Określone zostały granice czasowe stosowania tego typu systemu w oparciu o wykres tz-tp oraz określone wielkości mocy chłodniczej możliwe do pozyskania w tym systemie.

Słowa kluczowe: free-cooling, chłodzenie, chiller, moc chłodnicza.

¹ Autor do korespondencji: Sławomir Rabczak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, rabczak@prz.edu.pl

² Danuta Proszak-Miąsik, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, dproda@prz.edu.pl

³ Krzysztof Nowak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, krzynow@prz.edu.pl

1. Wstęp

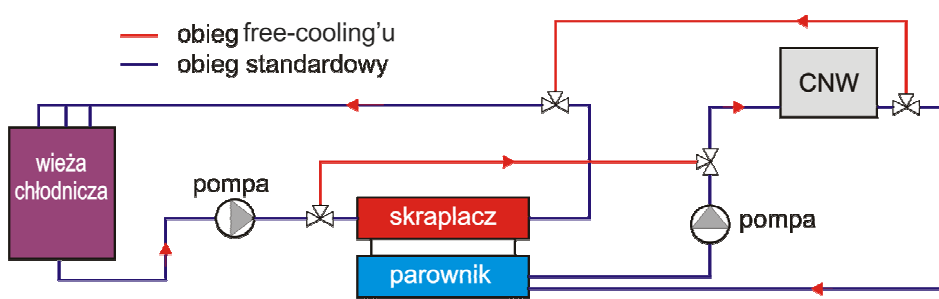
System free-cooling, jest stosowany głównie tam gdzie zyski ciepła w danym obiekcie są znaczne przez cały rok. Do takich obiektów zalicza się min.: serwerownie, centra handlowe, zakłady przemysłowe. Stosowanie tego systemu wiąże się również ze znacznym zwiększeniem nakładów inwestycyjnych, poniesionych na zakup agregatów wody lodowej wyposażonych w układ free-cooling'u, głównie z uwagi na konieczność wyposażenia układu w dodatkowe chłodnice free-cooling'u lub układu instalacji obejściowej systemu chillera. [1] Stosowalność free-cooling'u jest silnie uzależniona od wielkości zysków ciepła w pomieszczeniu oraz od temperatury powietrza zewnętrznego. Ponieważ system działa w okresie, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest na tyle niska aby możliwe było ochłodzenie wody chłodniczej lub powietrza w pomieszczeniu, stąd w samym pomieszczeniu muszą być generowane odpowiednie zyski ciepła, które są konieczne do usunięcia pomimo stosunkowo niskiej temperatury powietrza zewnętrznego. Jest to sytuacja, która w znacznym stopniu limituje możliwości stosowania tego typu systemu do miesiąca – dwóch maksymalnie, przy założeniu pracy systemu klimatyzacji kilka godzin dziennie.

2. Przykładowe systemy z zastosowaniem free-cooling'u

Jednym z najprostszych systemów wykorzystujących zjawisko naturalnego wykorzystania zdolności chłodzących powietrza zewnętrznego jest system free-cooling'u bezpośredniego. System ten polega na wykorzystaniu w sposób bezpośredni powietrza zewnętrznego do chłodzenia pomieszczeń klimatyzowanych. Rozwiązanie to jest wykorzystywane w modułowych centralach klimatyzacyjnych lub monoblokowych centralach klimatyzacyjnych przygotowujących powietrze pierwotne w systemach o dwuetapowym uzdatnianiu powietrza. W centralach składających się z poszczególnych modułów funkcja free-cooling'u jest realizowana za pośrednictwem komory mieszania, w której poprzez odpowiednie sterowanie przepustnicami powietrza świeżego i recyrkulacyjnego zwiększa się udział powietrza zewnętrznego aż do 100 % udziału w powietrzu nawiewanym (w celu maksymalnego wykorzystania chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym). [2] Zwiększona ilość świeżego powietrza zewnętrznego jest utrzymywana na maksymalnym poziomie tylko przez określony czas występowania warunków sprzyjających do realizacji procesu free-cooling'u. W pozostałym czasie przepustnice są ustawiane na minimalny udział powietrza świeżego. Za określone udziały poszczególnych strumieni powietrza w powietrzu nawiewanym odpowiada sterownik mikroprocesorowy, który w oparciu o czujniki temperatury oraz specjalny algorytm sterowania („ekonomizer”) dokonuje optymalnego ustawienia kąta poszczególnych przepustnic. [3] W monoblokowych centralach klimatyzacyjnych przygotowujących powietrze pierwotne, z uwagi na pracę ze 100 % udziałem powietrza świeżego, funkcja

free-cooling'u jest realizowana poprzez dezaktywację sprężarkowego układu chłodniczego przy niskich temperaturach powietrza zewnętrznego, pozwalających na uzyskanie żądanej temperatury nawiewu za centralą bez pracy układu chłodniczego.

Drugi możliwy rodzaj wykorzystania chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym, tzw. „free-cooling pośredni”, umożliwia schłodzenie powietrza wewnętrznego z wykorzystaniem medium pośredniczącego pozwalającego na wymianę ciepła pomiędzy powietrzem ochładzanym, a świeżym powietrzem zewnętrznym. Ciecz pośrednicząca odbiera ciepło od schładzanego powietrza wewnętrznego, a następnie przekazuje je do świeżego powietrza zewnętrznego. Powietrze zewnętrzne dokonuje w sposób pośredni schłodzenia powietrza w pomieszczeniu (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu do produkcji wody lodowej z obiegiem free-cooling'u.

Figure 1. Schema of ice water production unit with free-cooling system.

Systemy klimatyzacyjne wymagające przygotowania wody ziębniczej o określonej temperaturze z reguły wykorzystują sprężarkowe agregaty chłodnicze do jej schłodzenia. Wykorzystanie powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze w celu schłodzenia cieczy pośredniczącej bez ingerencji sprężarkowego układu chłodniczego przynosi wymierne korzyści finansowe związane z niższymi kosztami eksploatacji, a także podnosi wartość obiektu z uwagi na wyższą efektywność systemów w nim działających. Ciecz pośrednicząca może stanowić woda zasilająca odbiorniki chłodu, takie jak klimakonwektory, belki chłodnicze, itp. Inne medium pośredniczące może stanowić czynnik chłodniczy (rozwiązanie firmy Carrier). Z uwagi na fakt, że proces free-cooling'u jest realizowany tylko przy temperaturze powietrza zewnętrznego niższej od temperatury wody na powrocie z instalacji, realizacja free-cooling'u odbywa się często przy współdziałaniu sprężarkowych agregatów chłodniczych. [4] Mechanicznie rozwiązanie free-cooling'u jest w pewnym stopniu powiązane z pracą agregatu; z tego powodu możemy rozróżnić następujące warianty realizacji free-cooling'u pośredniego:

- rozwiązanie w postaci dodatkowego wymiennika free-cooling'u z trójdrogowym zaworem regulacyjnym, jako opcjonalnym wyposażeniem dla mono-

blokowego agregatu chłodniczego,

- rozwiązanie w postaci wymiennika pośredniego, pompy glikolowej oraz dodatkowego wymiennika free-cooling (współpracującego ze sprężarkowym agregatem wody ziemniczej),
- rozwiązanie bez dodatkowego wymiennika free-cooling'u, wykorzystujące typowy układ chłodniczy agregatu chłodniczego oraz pompę czynnika chłodniczego pracującą w okresie postoju sprężarki i w sprzyjających warunkach do realizacji procesu schładzania cieczy za pośrednictwem powietrza o niskiej temperaturze (rozwiązanie stosowane przez firmę Carrier),
- inne rozwiązania, np. wykorzystujące „free-cooler”, czyli dry-cooler, którego zadaniem jest schłodzenie cieczy w instalacji za pośrednictwem powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze.

Dry-cooler realizujący proces free-cooling'u może być wykorzystywany zarówno w rozwiązaniach, w których stosowane są monoblokowe agregaty chłodnicze ze skraplaczem chłodzonym cieczą, jak i monoblokowe agregaty ze skraplaczem chłodzonym powietrzem. W przypadku agregatów ze skraplaczem chłodzonym cieczą w okresach wysokich temperatur powietrza zewnętrznego „dry-cooler” odprowadza ciepło ze skraplaczy podczas „produkcji mocy chłodniczej”, natomiast w okresie niskich temperatur powietrza zewnętrznego „dry-cooler” pełni funkcję „free-coolera”, czyli urządzenia, które kosztem poboru mocy tylko silników wentylatorów pozwala na schłodzenie cieczy do żądanej temperatury.

W przypadku monoblokowych agregatów chłodniczych ze skraplaczem chłodzonym powietrzem dry-cooler może pełnić funkcję urządzenia wstępnie schładzającego wodę do żądanej temperatury, natomiast dalsze schłodzenie w miarę potrzeby może być realizowane na parowniku agregatu chłodniczego. [3]

3. Analiza działania systemu z wykorzystaniem free-cooling'u

Zapotrzebowanie na energię chłodniczą obliczono dla przyjętego obiektu jakim jest budynek centrum handlowego typu „galeria”. Założono parametry powietrza w pomieszczeniach i na zewnątrz zgodnie z polskimi normami w tym zakresie. Temperatura wewnętrzna w okresie letnim ustalona została na poziomie 21°C, natomiast temperatura zewnętrzna jest zmienna w zależności od godziny, niemniej za godzinę obliczeniową przyjęto 14⁰⁰ w miesiącu lipcu. Na podstawie zysków ciepła określona została ilość powietrza wentylacyjnego na poziomie 992 000 m³/h. W analizowanym przypadku w centralach klimatyzacyjnych znajdują się systemy odzysku ciepła, wykorzystywane w okresie letnim do odzysku chłodu z powietrza wywiewanego o sprawności ok. 55%. Pomimo stosowanego odzysku chłodu pozwalającego na ochłodzenie powietrza od temperatury zewnętrznej wynoszącej 29,5°C do 26,5°C, moc chłodnicza osiągnęła wartość 3 473 kW.

Dla tak przyjętych założeń policzono zapotrzebowanie na chłód dla każdego miesiąca przyjmując dla uproszczenia, że jest ono zależne od różnicy entalpi pomiędzy powietrze w pomieszczeniu h_p , a powietrzem zewnętrznym h_z . Dla miesiąca lipca obliczona wartość zapotrzebowania na chłód wynosi: $Q_{ch}^{lipiec} = 3\,473$ kW. Zatem dla pozostałych miesięcy wartość ta zależy w przybliżeniu od parametrów powietrza, zgodnie z zależnością:

$$Q_{ch}^{miesiqi} = Q_{ch}^{lipiec} \cdot \frac{\Delta h_{miesiqi}}{\Delta h_{lipiec}}, \quad kW \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{ch}^{miesiqc}$ – 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

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

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

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

h_{ch} – entalpia powietrza po ochłodzeniu, kJ/kg

Chłodzenie występuje jedynie w sytuacji kiedy wymagana entalpia powietrza w pomieszczeniu jest mniejsza od entalpii powietrza zewnętrznego, $h_p < h_z$. Na podstawie wartości średniego zapotrzebowania godzinowego na chłód w poszczególnych miesiącach wyznaczona została wielkość sezonowego miesięcznego zapotrzebowania na energię chłodniczą.

$$Q_{ch}^{sezonowe} = Q_{ch}^{miesiqi} \cdot t, \quad kWh \quad (3)$$

gdzie:

t – czas pracy urządzenia chłodniczego (wentylacji) w ciągu miesiąca, h

Dla statystycznego miesiąca przyjęto średnio, że układ chłodniczy działa dziennie przez czas 12 godzin w dni powszednie oraz po 10 godzin w niedzielę, co łącznie określa ilość godzin w miesiącu na poziomie $t = 26 \cdot 12 + 4 \cdot 10 = 352$ h/m. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli nr 1. Zapotrzebowanie na chłód występuje jedynie w miesiącach letnich od maja do września włącznie. W celu określenia ram czasowych, w których możliwe będzie wykorzystanie systemu free-cooling'u należy ustalić najpierw granice stosowania instalacji chłodniczej oraz konieczności chłodzenia w pomieszczeniu.

Tabela 1. Zestawienie mocy chłodniczej w poszczególnych miesiącach

Tabel 1. Cooling power for each month's

Miesiące	h_z	$\Delta h^{miesiac}$	$Q_{ch}^{miesiac}$	$Q_{ch}^{sezonowe}$	$T_z^{średnia}$
	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kW]	[kWh]	°C
styczeń	1,6	24,1	-	-	-4,6
luty	8,6	17,1	-	-	0,3
marzec	9,1	16,6	-	-	1,0
kwiecień	20,6	5,1	-	-	8,0
maj	29,5	-3,8	876	308394	12,5
czerwiec	40,0	-14,2	3299	1161317	16,8
lipiec	40,7	-15,0	3473	1222496	16,9
sierpień	43,3	-17,5	4062	1429949	17,7
wrzesień	31,9	-6,2	1426	502038	12,3
październik	20,4	5,4	-	-	6,8
listopad	12,5	13,2	-	-	2,0
grudzień	6,7	19,0	-	-	-1,2

Sytuacja taka występuje kiedy temperatura nawiewu zrówna się z temperaturą po odzysku ciepła na wymienniku krzyżowym i występuje do momentu zrównania temperatury nawiewu z temperaturą zewnętrzną. Zmianę omawianych powyżej temperatur przedstawiono na rys. 2.

Założono, że w okresie letnim woda lodowa schładzana będzie od 12 do 7°C, natomiast w okresie przejściowym od 15 do 9°C.

Stąd punkt wyjścia dla systemu free-cooling jest zrównanie się temperatury powietrza zewnętrznego z temperaturą powrotu z instalacji wody chłodniczej w okresie przejściowym $T_z < 15^\circ\text{C}$. Ponadto w okresie zimowym założono współpracę systemu klimatyzacji z instalacją centralnego ogrzewania przez przyjęcie różnicy temperatur pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu, a powietrzem nawiewanym na poziomie $\Delta T_{w zimie} = 1 \text{ K}$.

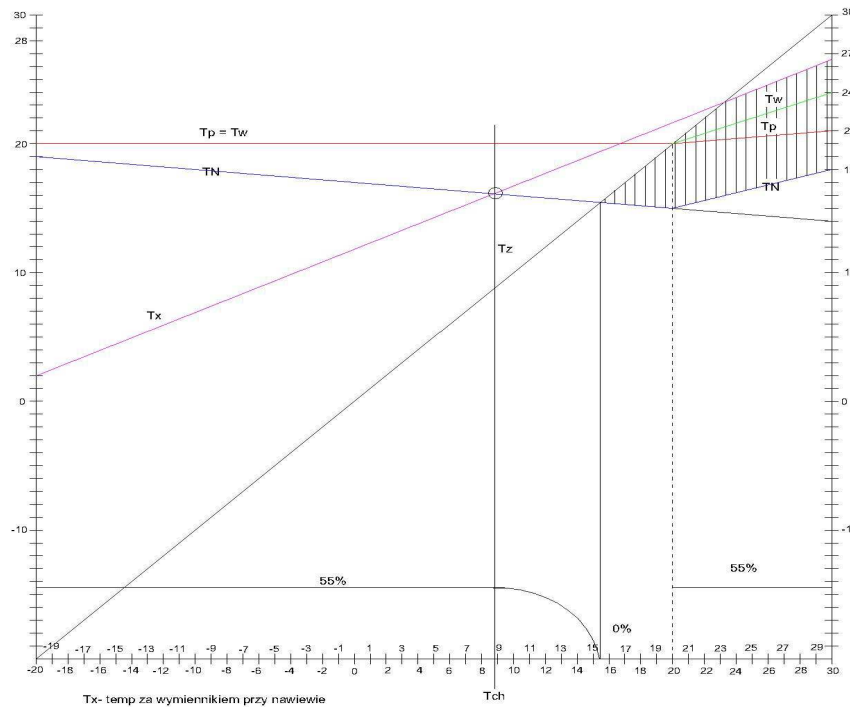
Możliwość pozyskania chłodu od powietrza zewnętrznego do celów przygotowywania wody chłodzącej powietrze w centrali klimatyzacyjnej w okresie przejściowym występuje jedynie w miesiącach kwiecień – maj oraz we wrześniu (rys. 3).

Obliczone wielkości sprawności wykorzystania systemu free-cooling'u zestawiono w tabeli nr 2. Sprawność ta jest stosunkowo mała i osiąga maksimum przy temperaturze zewnętrznej 9°C oraz maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{fc} . Wielkości sezonowej mocy jaka jest możliwa do pozyskania z systemu free-cooling'u Q_{fc} określa zależność:

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

gdzie: $Q_{ch}^{sezonowe}$ – sezonowe zużycie energii chłodniczej dla miesięcy o średniej temp powietrza od 9 – 15 °C, kWh

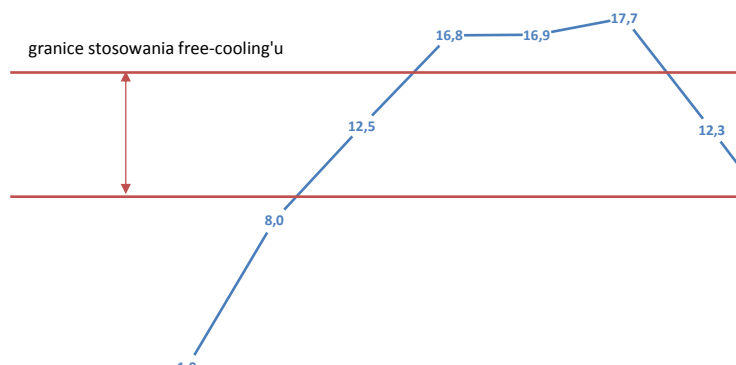
η_{fc} – sprawność sytemu free-cooling, %



Rys. 2. Wykres T_z-T_p dla analizowanego przypadku obciążenia chłodniczego budynku
 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

Figure 2. Diagram T_z-T_p for analysed circumstance of building cooling load
 T_z - ambient temperature, T_p - room temperature, T_N - supply air temperature, T_W - return air temperature, T_{ch} - end of cooling period temperature, T_x - temperature after heat recovery

Na tej podstawie określono orientacyjne wielkości mocy układu chłodniczego pochodzącego z systemu free-cooling'u. Wielkości te zestawiono w tabeli nr 3. Zgodnie z przedstawioną powyżej tabelą można określić skrajne wielkości sprawności systemu działającego free-cooling'u na poziomie pomiędzy 15 a 17% dla 2 miesięcy, w których system ten jest w stanie przy założonych parametrach wody lodowej działać dla potrzeb chłodniczych. W porównaniu z zapotrzebowaniem na energię chłodniczą dla całego sezonu chłodniczego, w którym należy zabezpieczyć moc rzędu 4,6MWh, dzięki działającemu układowi free-coolingu można tę wartość zmniejszyć jedynie w granicach ok 3%.



Rys. 3. Wykres zmienności temperatury powietrza zewnętrznego w zależności od miesiąca

Figure 3. Diagram of temperaturę changing due to month's

Tabela 2. Wydajność systemu free-cooling'u w zależności od temperatury zewnętrznej

Tabele 2. Free-cooling efficiency due to ambient temperature

T_z	ΔT_{fc}	Wydajność free-cooling'u, η_{fc}
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%
15	0	0
14	1	0
13	2	10
12	3	20
11	4	30
10	5	40
9	6	50

Tabela 3. Wielkość mocy chłodniczej pozyskanej z systemu free-cooling'u

Tabele 3. Free-cooling power system

Miesiąc	T_z	Sprawność η_{fc}	Q_{ch} sezonowo	Q_{fc}
	$^{\circ}\text{C}$	%	[kWh]	[kWh]
maj	12,5	15	30 8394	46 259
wrzesień	12,3	17	50 2038	85 346
Σ				131 606

4. Podsumowanie

Systemy free-cooling'u stosowane powinny być przede wszystkim w obiektach z dużymi zyskami ciepła wewnętrznego, szczególnie dotyczy to okresu przejściowego, w którym temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od wymaganej temperatury pomieszczeń wewnętrznych, niemniej zyski ciepła generowane w obiekcie powodują znaczne podniesienie temperatury powietrza wewnętrznego. Jak wynika z przedstawionej uproszczonej analizy możliwości pozyskania chłodu z użyciem systemu wymienników free-cooling'u dla analizowanego obiektu ilość energii chłodniczej w całym sezonie chłodniczym sięga ok. 3%, co nie stanowi wielkości interesującej z punktu widzenia inwestycyjnego. Biorąc pod uwagę jedynie okres miesięcy, w których system ten jest w stanie funkcjonować zapewnia on pokrycie ok. 16% całkowitego zapotrzebowania na chłód w rozpatrywaniu okresie, co może stanowić już pewną alternatywę jeśli chodzi o źródło chłodu, szczególnie ciekawe z uwagi na jego bardzo niski koszt eksploatacji w porównaniu z tradycyjnymi sprężarkowymi układami chłodniczymi. W zależności od współczynnika sezonowej wydajności energetycznej ESEER dla układu chłodniczego oraz wielkości mocy pomp obiegowych w systemie free-cooling'u oszczędności w energii elektrycznej mogą sięgać od 15 do 30%, przy założeniu że zużycie energii w systemie free-cooling'u będzie kształtować się na poziomie ok. 10 razy mniejszym od zużycia energii elektrycznej w systemie ze sprężarką elektryczną o współczynniku ESEER na poziomie pomiędzy 3,0, a 3,5. Jeśli chodzi o takie spojrzenie na wielkości oszczędności energii elektrycznej zaoszczędzonej przez system free-cooling'u to w okresie występowania możliwości zastosowania tego typu systemu w bilansie miesięcznym są to oszczędności jak najbardziej uzasadniające stosowanie tego typu rozwiązania.

Literatura

- [1] Adamski B., Free-cooling pośredni czy bezpośredni? Dylemat inwestora i projektanta, „Chłodnictwo i Klimatyzacja” nr 8/2010.
- [2] Kazimierz M., Uzdatnianie powietrza w inżynierii środowiska dla celów wentylacji i klimatyzacji, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [3] Gaziński B., Krzyżaniak G., Technika klimatyzacyjna dla praktykantów” SYSTHERM SERWIS, Poznań 2005.
- [4] Adamski B., Systemy free coolingu pośredniego. Analiza i symulacja oszczędności pod kątem nakładów eksploatacyjnych cz. 1, „Rynek Instalacyjny” nr 5/2009.

FREE COOLING SYSTEM APPLICATION IN AIR CONDITIONING

Summary

Oncreasing electricity prices, often forcing users to seek savings and new, cheap and clean energy. In many industries modern equipment to reduce electricity consumption are introduced. Also in air conditioning systems are increasingly being used all sorts of devices to reduce operating costs. Such solutions is free-cooling system. Free-cooling system operate as cooler of internal air in direct or intermediate way. Directed free-cooling system is on only if ambient temperature is below internal one – winter and transition period when air cooling is nesesity couse of large heat gain in cooled obiect. Intermediate free-cooling system work due to additional cool exchanger mounted in compressor unit with 3-way valve. The possible, obtained from analitical model the power of free-cooling system has been presented in the article. The boundaries of free-cooling system in all year period has presented using a T_z-T_p figure. Free-cooling effect, is usually carried out by adding a second free-cooling radiator and three-way valve in the compressor chiller. When the outdoor temperature drops below the temperature of the medium return intermediary, free cooling starts partial or at lower temperatures, the total cooling medium. The article presents an analysis of the demand in the cold for the selected object and to cover part of the system using free-cooling system.

Keywords: free-cooling, cooling, chiller, cooling power

DOI:10.7862/rb.2014.109

Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.

Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.