

MAREK PRYMON, JACEK SCHNOTALE\*

ZMNIEJSZENIE OBCIĄŻENIA CHŁODNICZEGO  
W SYSTEMIE KLIMATYZACJI Z AKUMULACJĄ ZIMNALOWERING AIR CONDITIONING REFRIGERATION  
LOAD BY IMPLEMENTATION OF HEAT STORAGE

## Streszczenie

Wykorzystanie systemu wentylacji nocnej w połączeniu z akumulacją energii w materiałach zmieniających stan skupienia (Phase Change Materials – PCM) może przyczynić się do znacznego obniżenia zapotrzebowania chłodu w budynkach. W artykule przedstawiono wyniki badań teoretycznych oraz doświadczalnych gęstożebrowanego stropu wentylowanego z betonu zmodyfikowanego domieszką PCM w postaci mikrogranulek. Obniżenia temperatury w okresie nocnym mogą zostać wykorzystane do rozładowania zasobnika energii, który następnie w czasie użytkowania pomieszczenia posłuży do akumulacji zysków ciepła występujących w pomieszczeniach. W artykule zaprezentowano wyniki symulacji numerycznych wykonanych w oparciu o własności cieplne zmodyfikowanych materiałów budowlanych otrzymane doświadczalnie.

*Słowa kluczowe:* akumulacja energii, PCM, klimatyzacja, chłodnictwo

## Abstract

Thermal energy storage based on Phase Change Materials (PCM) combined with night ventilation is considered for lowering the refrigeration load of residential and office buildings. Since the low temperature air is available in the night time but the heat loads appears during day it is necessary to use the energy storage. Simple night ventilation system offers limited capacity resulting from relatively low heat capacity and limited heat transfer area compare to required energy storage capacity. To overcome these limits building elements are modify by embedding micro-encapsulated PCM to use them as energy reservoirs with increased heat capacity. In the paper results of theoretical study based on Computer Fluid Dynamics (CFD) and measurements data of such air conditioning are presented. The impact of these system on air conditioning refrigeration load are presented for a typical office space building.

*Keywords:* thermal energy storage, PCM, ventilation, refrigeration

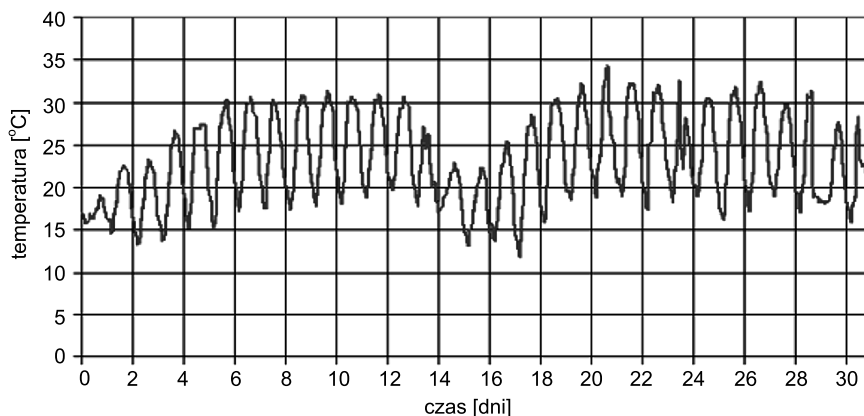
\* Dr inż. Marek Prymon, prof. dr inż. Jacek Schnotale, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Zużycie energii przez systemy klimatyzacyjne ma znaczący wpływ na całkowite koszty użytkowania budynków biurowych oraz mieszkalnych w okresie letnim. Biorąc pod uwagę fakt, że większość energii elektrycznej wytwarzana jest na świecie w oparciu o spalanie paliw kopalnych, z czego około 37% stanowi węgiel, klimatyzacja budynków ma również wpływ na globalną emisję  $\text{CO}_2$ . Z wymienionych powyżej powodów coraz częściej w systemach klimatyzacji stosowane są techniki pozwalające wykorzystywać naturalne źródła chłodu. Jedną efektywnych metod jest wykorzystanie dobowych wahań temperatury powietrza atmosferycznego czyli tzw. wentylacja nocna. Temperatura powietrza zewnętrznego w okresie letnim w klimacie umiarkowanym praktycznie zawsze spada poniżej temperatury komfortu pożądanej w pomieszczeniach w okresie ciepłych dni. Przekładowe wyniki pomiarów temperatury powietrza atmosferycznego w Krakowie z lipca 2007 zaprezentowano na wykresie (rys. 1). Ze względu na dostępność chłodu w czasie nocy i jego zapotrzebowanie w czasie dnia konieczne jest zastosowanie akumulacji energii. Skuteczność systemów chłodzenia pomieszczeń opartych o materiały konstrukcyjne zmodyfikowane PCM była analizowana przez Takeda, Nagano, Mochida, Nakamura [2] and Schossig, Henning, Haussman, Raicu [1]. W zaproponowanym systemie strop wentylowany działa jak regeneracyjny wymiennik ciepła. Zyski ciepła w okresie dziennym są akumulowane w zmodyfikowanych PCM pustakach stropowych. W czasie nocy zakumulowana energia jest rozładowywana przez cyrkulujące w kanałach stropowych chłodne powietrze zewnętrzne. System ten pozwala uniknąć większości problemów ograniczających wydajność prostej wentylacji nocnej. Podstawowe ograniczenia wentylacji nocnej jako metody zmniejszania obciążenia cieplnego budynków, wpływające na jej małą efektywność usuwania zysków ciepła wynikają z faktu, że przestrzeń użytkowa budynku ze względu na jej geometrię oraz małą pojemność cieplną przegród budowlanych nie stanowi dobrego wymiennika ciepła. W efekcie przez pomieszczenia przetłaczany jest duży strumień powietrza chłodnego lecz ze względu na relatywnie małą pojemność cieplną przegród i szybki spadek ich temperatury trudno jest zakumulować w nich odpowiednio dużą porcję energii. Ponadto mała prędkość powietrza w okolicy ścian wpływa na małe wartości współczynnika przejmowania ciepła, co przy krótkim (kilkugodzinnym) czasie kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od temperatury komfortu dodatkowo ogranicza energię możliwą do zakumulowania i usunięcia. Problemy te można zauważyć w wielu prezentowanych rozwiązaniach systemów klimatyzacji opartych na wykorzystaniu chłodu powietrza zewnętrznego w połączeniu z akumulacją energii.

Dzięki relatywnie dużej prędkości powietrza w kanałach stropu możliwe osiągnięcie znacznie wyższych wartości współczynników przejmowania ciepła, co w połączeniu ze względnie dużą łączną powierzchnią wymiany ciepła daje znacznie lepsze warunki wymiany ciepła. Zastosowanie w proponowanym systemie materiałów zmieniających stan skupienia poza kilkukrotnym zwiększeniem pojemności cieplnej zapewnia niemal izotermiczne rozładowanie oraz załadowanie zasobnika ciepła (którym jest tutaj strop). Ponadto system nie wymaga intensywnej wentylacji w okresie nocy całej przestrzeni pomieszczeń. Powietrze wewnętrzne transportowane jest tylko przez kanały stropowe.

W artykule przedstawiono teoretyczną analizę działania systemu chłodzenia pomieszczeń opartego na wentylowanym stropie i wykorzystaniu dobowych wahań temperatury powietrza zewnętrznego.

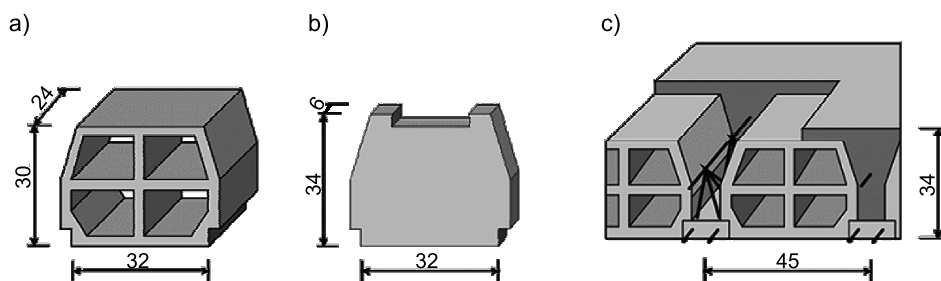


Rys. 1. Temperatura powietrza zewnętrznego w Krakowie – Lipiec 2007

Fig. 1. Ambient temperature measured in Krakow – July 2007

## 2. Opis systemu

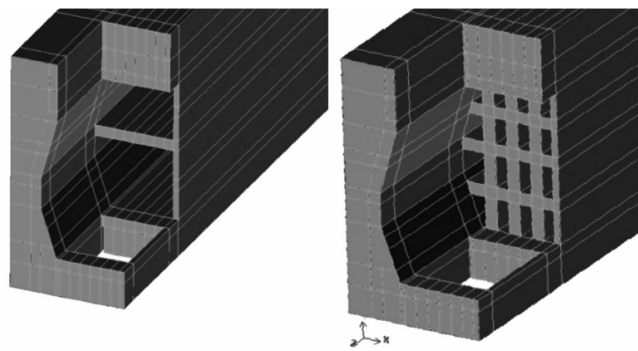
Jako akumulacyjny wymiennik ciepła wykorzystano typowy strop Teriva (rys. 2), którego pustaki zostały zmodyfikowane zarówno pod względem pojemności cieplnej, jak i geometrii wewnętrznych kanałów. Nie zmieniono jednak kształtu zewnętrznego pustaka.



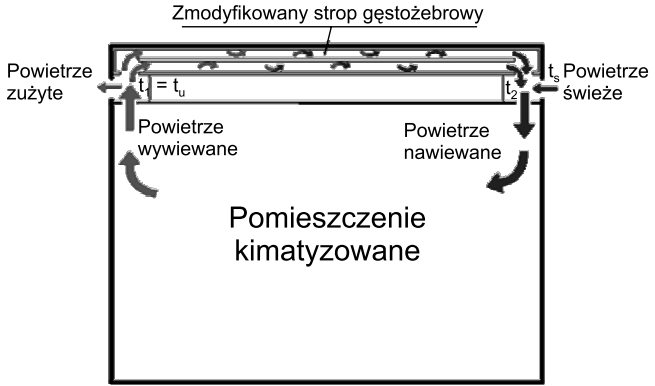
Rys. 2. Strop wykorzystany do budowy systemu

Fig. 2. Structural ceiling

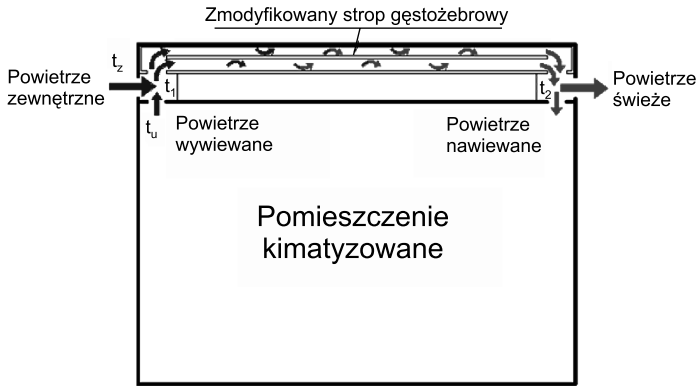
W tym przypadku strop działa jak regeneracyjny wymiennik ciepła. Do przeprowadzenia symulacji systemu założono, że w pomieszczeniu działa dodatkowe urządzenie klimatyzacyjne, które utrzymuje temperaturę powietrza na stałym poziomie. Podczas nocy chłodne powietrze zewnętrzne przetłaczane jest przez kanały stropowe przez układ wentylacyjny ochładzając beton oraz zestalając zawarty w nim kompozyt zmieniający stan skupienia PCM (rys. 5). W godzinach dziennych podczas użytkowania pomieszczenia powietrze z pomieszczenia jest przetłaczane przez kanały stropowe (rys. 4). W ten sposób zyski ciepła są akumulowane w materiale stropu. W celu umożliwienia regulacji wydajności systemu i tym samym zachowania warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniu założono, że układ regulacji



Rys. 3. Typowa i zmodyfikowana geometria pustaków stropowych  
Fig. 3. Standard and modified geometry of ceiling tiles



Rys. 4. Schemat działania systemu – pora dnia  
Fig. 4. System operation – day mode



Rys. 5. Schemat działania systemu – pora nocna  
Fig. 5. System operation – night mode

kontroluje strumień przetłaczanego powietrza poprzez zmianę prędkości obrotowej wentylatorów. Ze względu na przyjęty sposób regulacji oraz ograniczoną pojemność cieplną stropu wentylowanego założono również ograniczenie w postaci maksymalnego strumienia powietrza. Przeprowadzono analizę dwóch modyfikacji stropu Teriva w stosunku do typowego jego rozwiązania. W pierwszym przypadku zmodyfikowano geometrię kanałów wewnątrz stropu przez dodanie dodatkowych przegród.

Symulacja została przeprowadzona dla wszystkich wymienionych powyżej kombinacji przypadków: A – strop o standardowej geometrii wykonany z niemodyfikowanego betonu, B – strop o standardowej geometrii wykonany ze zmodyfikowanego betonu, C – strop o zmodyfikowanej geometrii wykonany z niemodyfikowanego betonu, D – strop o zmodyfikowanej geometrii wykonany ze zmodyfikowanego betonu. Rozpatrzono również kilka trybów pracy.

### 3. Modelowanie

Efektywność oraz wydajność opracowanego systemu przeanalizowano wykorzystując symulację numeryczną. Ze względu na nieliniowe własności cieplne materiału, z którego zostały wykonane pustaki do symulacji procesu wymiany ciepła oraz przepływu powietrza w kanałach stropowych wykorzystano symulację CFD. Celem symulacji nie było jednak dokładne poznanie profilu prędkości oraz temperatury w kanałach stropowych oraz pomieszczeniu. W celu uniknięcia dużego kosztu obliczeniowego związanego z symulacją CFD całego pomieszczenia obliczenia CFD zostały wykorzystane jedynie do symulacji przepływu powietrza oraz wymiany ciepła w symetrycznym, powtarzalnym elemencie kanału stropowego. Dodatkowo ze względu na symetrię pola temperatury oraz prędkości przedmiotem modelowania CFD była połowa pojedynczego kanału. Pozostała część modelu została sprowadzona do obliczeń funkcji zysków ciepła w pomieszczeniu o stałej temperaturze powietrza.

Własności cieplne zmodyfikowanych materiałów budowlanych zostały wyznaczone jako funkcje temperatury metodą wykorzystującą rozwiązanie zagadnienia odwrotnego z algorytmem ewolucyjnym jako procedurą optymalizacyjną. Funkcje te dla ciepła właściwego oraz współczynnika przewodzenia ciepła przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Skuteczność zmniejszenia obciążenia chłodniczego pomieszczeń była symulowana dla upalnego letniego dnia dla strefy klimatycznej II w Polsce (rys. 8).

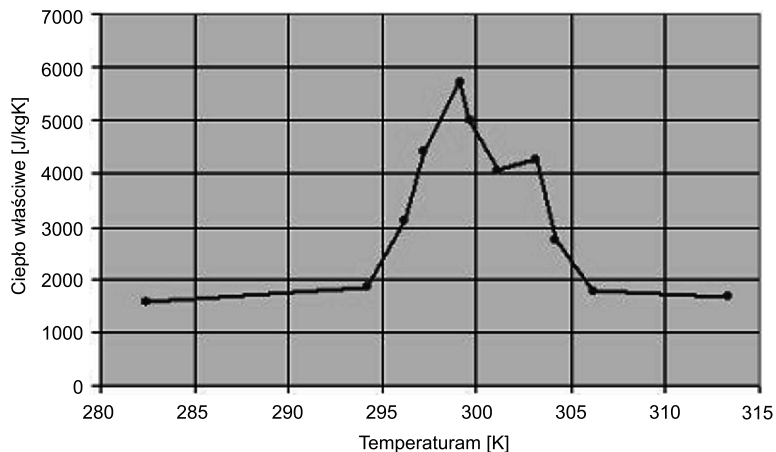
Model numeryczny stropu przedstawiony schematycznie na rysunku 9 został sprzężony z procedurą wyznaczającą chwilowe, zmienne w czasie wartości warunków brzegowych w postaci temperatury powietrza zewnętrznego oraz obliczającej prędkość średnią powietrza w kanale stropowym w zależności od pory dnia w celu chwilowego zrównoważenia zysków ciepła. Prędkość powietrza w kanale wyliczana jest z zależności (1):

$$w = \frac{\dot{Q}}{(24 \cdot S_w \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{pom}} - T_{\text{now}}^{k-1}))} \quad (1)$$

gdzie:

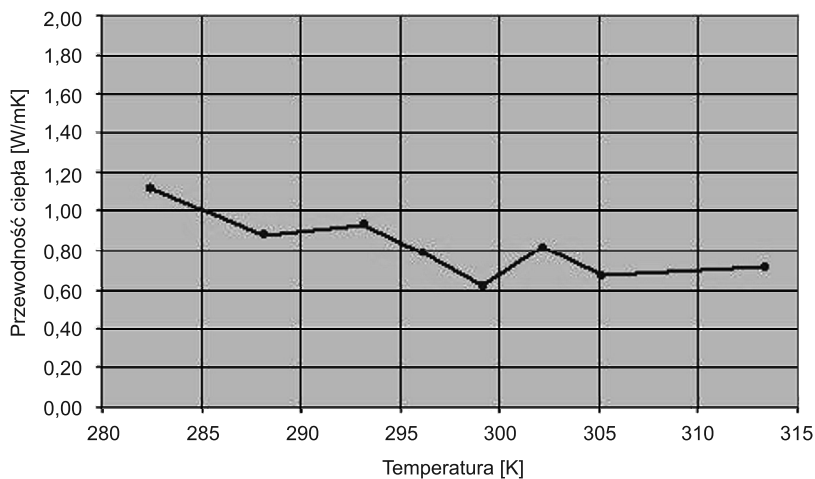
- $\dot{Q}$  – chwilowa wartość zysków ciepła [W],
- $S$  – cross section of ceiling ducts [m<sup>2</sup>],

- $c_p$  – ciepło właściwe [J/kg K],  
 $r$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],  
 $T_{\text{pom}}$  – temperatura powietrza w pomieszczeniu [K],  
 $T_{\text{naw}}$  – temperatura powietrza nawiewanego [K],  
 $k-1$  – poprzedni krok czasowy.



Rys. 6. Ciepło właściwe

Fig. 6. Specific heat

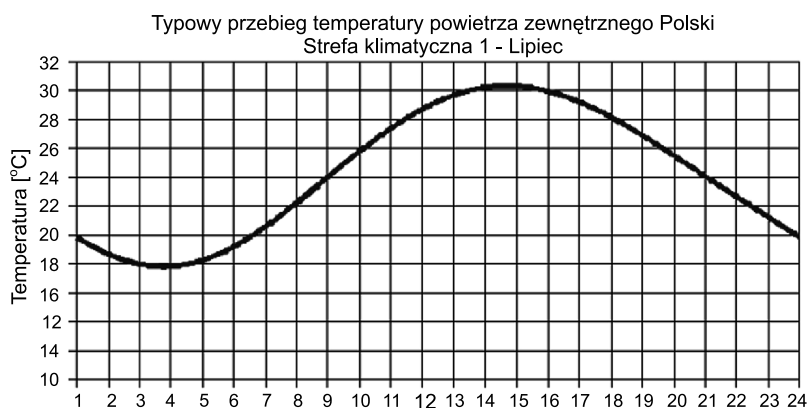


Rys. 7. Przewodność cieplna

Fig. 7. Thermal conductivity

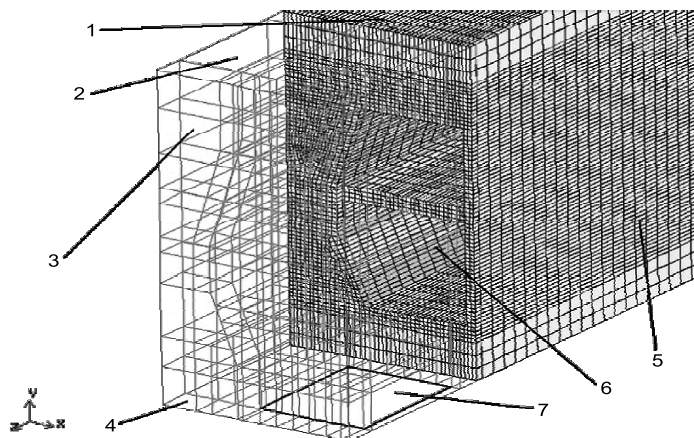
W obliczeniach zastosowano model turbulencji  $k$ -epsilon z wykorzystaniem procedury Standard Wall Function Chung (2002). Pozwala to zredukować ilość elementów siatki dyskretyzującej przestrzeń w porównaniu do dokładnego rozwiązania warstwy przyściennej

co znacznie przyspiesza obliczenia w stanie nieustalonym. Symulację przeprowadzono dla jednej doby podczas której temperatura powietrza atmosferycznego miała przebieg przedstawiony na wykresie (rys. 8). Warunek początkowy zakładał, że temperatura całej rozpatrywanej przestrzeni wynosiła  $20^{\circ}\text{C}$ . Następnie prowadzone były obliczenia kolejnych dobowych okresów o tym samym przebiegu temperatury powietrza atmosferycznego odpowiadającemu upalnemu dniu w strefie klimatycznej II dla Polski. Po około 5 dobach różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w aktualnej i poprzedniej dobie można było uznać za nieistotne.



Rys. 8. Temperatura powietrza atmosferycznego w Polsce dla ciepłego letniego dnia

Fig. 8. Ambient temperature – summer day for southern Poland

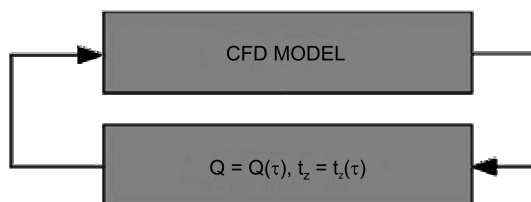


Rys. 9. Schemat fragmentu siatki obliczeniowej z oznaczonymi warunkami brzegowymi

Fig. 9. Meshed model and boundary conditions

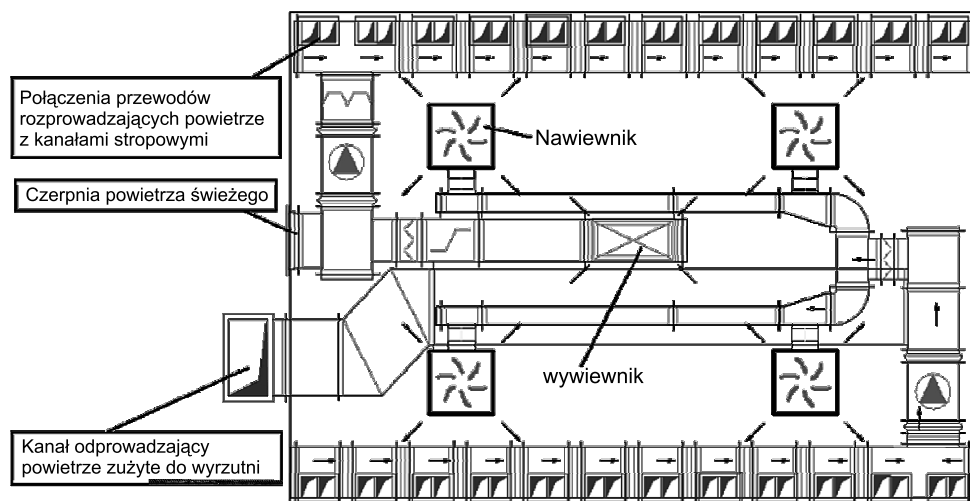
Założono następujące warunki brzegowe (rys. 9): 1 – podłoga w pomieszczeniu powyżej pomieszczenia analizowanego – współczynnik przejmowania ciepła  $h = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , wartości temperatury równa wartości temperatury w rozpatrywanym pomieszczeniu; 2, 3 – powierzchnia adiabatyczna, 4 – współczynnik przejmowania ciepła  $h = 6,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , wartości

temperatury równa wartości temperatury w rozpatrywanym pomieszczeniu; 5 – powierzchnia adiabatyczna, 6 – CFD model, 7 – prędkość powietrza na wlocie do kanału stropowego (wyliczana z zależności (1)) oraz wartość temperatury równa wartości temperatury w pomieszczeniu (w porze dziennej) lub wartości temperatury powietrza atmosferycznego (w porze nocnej).



Rys. 10. Schemat procedury obliczeniowej

Fig. 10. Computation procedure loop



Rys. 11. Schemat instalacji rozprowadzenia powietrza w systemie wentylowanego stropu akumulacyjnego

Fig. 11. Air duct system

Całkowita efektywność systemu została wyznaczona jako stosunek ciepła usuniętego w czasie doby z pomieszczenia przez system do energii elektrycznej koniecznej do pracy wentylatorów w tym czasie.

W celu obliczenia energii zużytej przez wentylatory zaprojektowano system kanałów rozprowadzających powietrze wraz z filtrami, czerpniami, wyrzutniami, przepustnicami i koniecznym wyposażeniem (rys. 11) Dla tak zaprojektowanego układu określono chwilowy spadek ciśnienia co przy wiadomym chwilowym strumieniu powietrza przepływającego przez układ pozwoliło na oszacowanie energii zużytej do napędu wentylatorów.

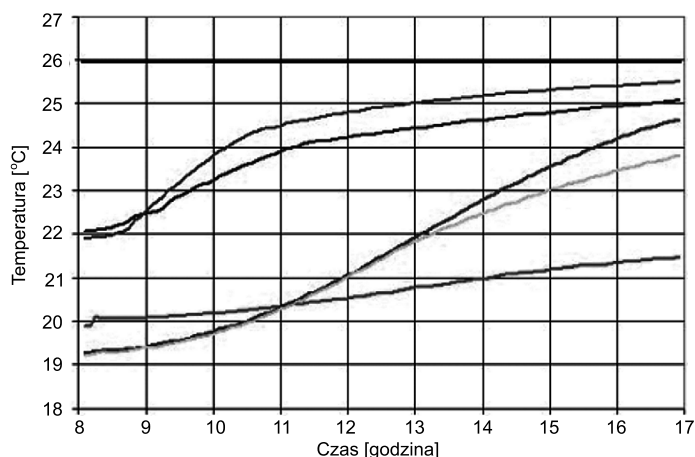


#### 4. Wyniki obliczeń

Symulacja została wykonana dla typowego pomieszczenia biurowego o wymiarach  $A \times B \times H = 5,5 \times 4,0 \times 3,50$  [m]. Ze względu na ilościową regulację wydajności cieplnej systemu konieczne było zastosowanie ograniczeń maksymalnego strumienia powietrza przetłaczanego przez kanały stropowe. Ograniczenia te zostały dobrane tak, aby nie przekroczyć, przy dobranym typie nawiewników wirowych w strefie przebywania ludzi prędkości powietrza zapewniającej warunki komfortu cieplnego dla pomieszczenia biurowego. Wartość ta wyniosła  $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Duży strumień powietrza poza prędkością powietrza w strefie przebywania ludzi ma również niekorzystny wpływ na zużycie energii przez wentylatory ze względu na większe opory przepływu. Dlatego też obliczenia przeprowadzono dla strumieni maksymalnych  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz  $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ . W porze nocnej powietrze było transportowane przez kanały stropowe ze stałym strumieniem  $550 \text{ m}^3/\text{h}$  do chwili, gdy różnica pomiędzy temperaturą powietrza wpływającego do stropu oraz temperaturą powietrza opuszczającego strop była większa bądź równa  $1\text{K}$ . Całkowite dzienne zyski ciepła oszacowane dla rozpatrywanego pomieszczenia biurowego z dwoma stanowiskami pracy oraz oknem skierowanym na południe wyniosły  $18,8 \text{ kWh}$ .

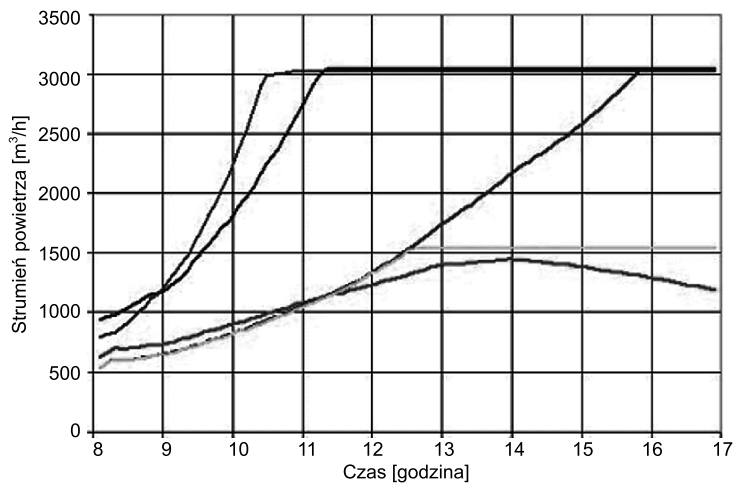
Tabela 1

System	Linia na wykresie	Geometria pustaka	Beton	Maksymalny strumień [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Energia usunięta z pomieszczenia przez system	Energia zużyta do napędu wentylatorów
					[kWh]	[kWh]
A	—	Standard	Standard	3000	11,1	7,4
B	—	Standard	Zmodyfikowana	3000	14,5	7,4
C	—	Zmodyfikowana	Standard	3000	18,3	5,4
D	—	Zmodyfikowana	Zmodyfikowana	3000	18,8	3,4
E	—	Zmodyfikowana	Standard	1500	16,1	4,1



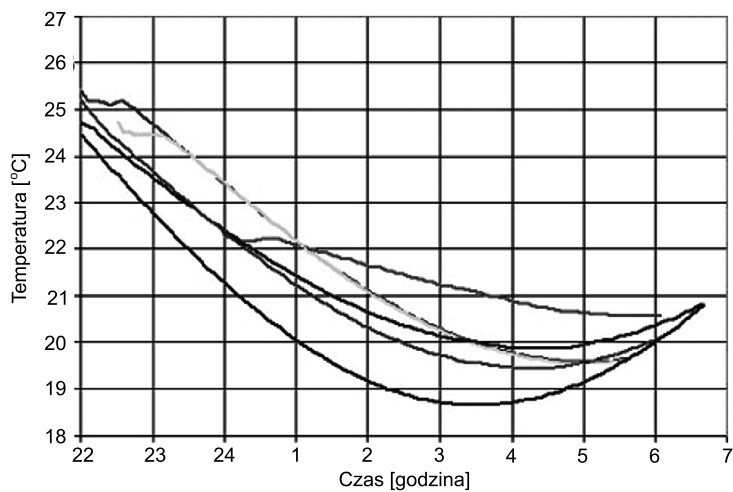
Rys. 12. Temperatura powietrza nawiewanego – dzień

Fig. 12. Supply air temperature – day



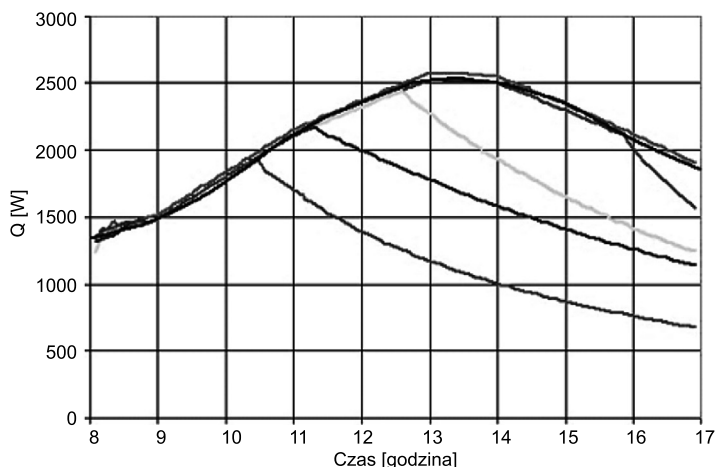
Rys. 13. Strumień powietrza nawiewanego – dzień

Fig. 13. Airflow – day



Rys. 14. Temperatura powietrza opuszczającego strop – noc

Fig. 14. Discharge air temperature – night



Rys. 15. Wydajność chłodząca systemu dla warunków obliczeniowej doby

Fig. 15. System capacity

## 5. Wnioski

Symulacja numeryczna systemu chłodzenia pomieszczeń z akumulacją chłodu w wentylowanym stropie gęsto-żebrowym wykazała, że strop ze zmodyfikowaną geometrią oraz materiałem zmodyfikowanym kompozytem zmieniającym stan skupienia (System D) umożliwił utrzymanie temperatury powietrza w pomieszczeniu na stałym poziomie zapewniającym warunki komfortu cieplnego bez konieczności stosowania żadnych dodatkowych urządzeń klimatyzacyjnych. W przypadku D również czas rozładowania zasobnika energii w okresie nocnym był najkrótszy. Zastosowanie Systemu C umożliwiło prawie całkowite usunięcie zysków ciepła, ale wartość maksymalnego dopuszczalnego strumienia powietrza została osiągnięta. Wpłynęło to na większe zużycie energii przez wentylatory oraz większą prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi, co może wpływać na warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Zaproponowany system stanowi alternatywę do wentylacji nocnej oraz klasycznych systemów klimatyzacji. Usunięcie energii zakumulowanej w ciągu dnia nie wymaga wentylacji całej przestrzeni budynku w okresie nocy, jak ma to miejsce w przypadku prostej wentylacji nocnej, dzięki czemu można zastosować system w budynkach zarówno biurowych, jak i mieszkalnych. Zaproponowana modyfikacja geometrii wewnętrznej pustaków (rys. 3) znacznie zwiększa powierzchnię wymiany ciepła oraz prędkość powietrza w kanałach stropowych, co istotnie poprawia warunki wymiany ciepła oraz zwiększa ilość materiału PCM, a tym samym pojemność cieplną systemu.

## Literatura

- [1] Schossig P., Henning H.M., Haussman T., Raicu A., *Encapsulated Phase-Change Materials integrated into construction materials* Heidenhofstrasse, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, POLAND, September 1–4, 2003.

- [2] Takeda S., Nagano K., Mochida T., Nakamura T., *Development of floor supply air conditioning system with granulated phase change materials*, Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Springer Netherlands 2007.
- [3] Feustel H.E., Stetiu C., *Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling Application*, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California Berkeley, CA 94720, USA, 1997.
- [4] Feustel H.E., *Phase-Change Wallboard and Mechanical Night Ventilation Commercial Buildings*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Report CA 94720, 1998.
- [5] Yamaha M., *Thermal performance of a latent heat storage system installed in air ducts for HVAC system*, Proc. of the 9th International Conf. on Thermal Energy Storage – Futurestock, Warsaw, 329-334.
- [6] Chung T.J., *Computational Fluid Dynamic*, Cambridge University Press, 2002.
- [7] Prymon M., Houzeaux G., *Numerical Simulation of Thermal Energy Storage in Building Elements Using Finite Elements Method and Inverse Problem Based on Evolutionary Algorithm for Determination of the Thermal Properties of PCM Modified concrete*, Science and Computing in Europe – Report 2008, CINECA Consorzio Interuniversitario 2008.