

mgr inż. Joanna Sinacka^{1*)}
 prof. dr hab. inż. Edward Szczechowiak¹⁾

Stropy i sufity grzewczo-chłodzące o dużej pojemności cieplnej

Thermally activated building systems with high thermal capacity

DOI: 10.15199/33.2019.01.10

Streszczenie. Celem artykułu jest analiza wpływu stropu aktywowanego termicznie i sufitu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem materiałem zmienno-fazowym (PCM) na temperaturę powierzchni, temperaturę powietrza wewnętrznego oraz zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia w pomieszczeniu biurowym, uwzględniając pojemność cieplną przegród i systemu grzewczo-chłodzącego. Scharakteryzowano stropy aktywowane termicznie i sufity grzewczo-chłodzące z wypełnieniem materiałem zmienno-fazowym. Wykonano symulacje dynamicznych oddziaływań stropu i sufitu aktywowanego termicznie na warunki termiczne w pomieszczeniu i bilans energetyczny.

Słowa kluczowe: stropy aktywowane termicznie; sufity grzewczo-chłodzące; pojemność cieplna; bilans energetyczny budynku.

Abstract. The aim of the article was analysis of the thermally activated building system and heating/cooling ceiling system with phase change material (PCM) impact on the surface temperature, internal air temperature and energy demand for heating and cooling in an office room, taking into account the thermal capacity of construction and system. In this article was characterized thermally activated building system and heating/cooling ceiling system with phase change material. Based on the simple hourly method, simulation of the thermally activated building system and cooling – heating ceiling system influence on thermal conditions and energy balance in the office room were carried out.

Keywords: thermally activated building system; cooling and heating ceiling system; thermal capacity; energy balance.

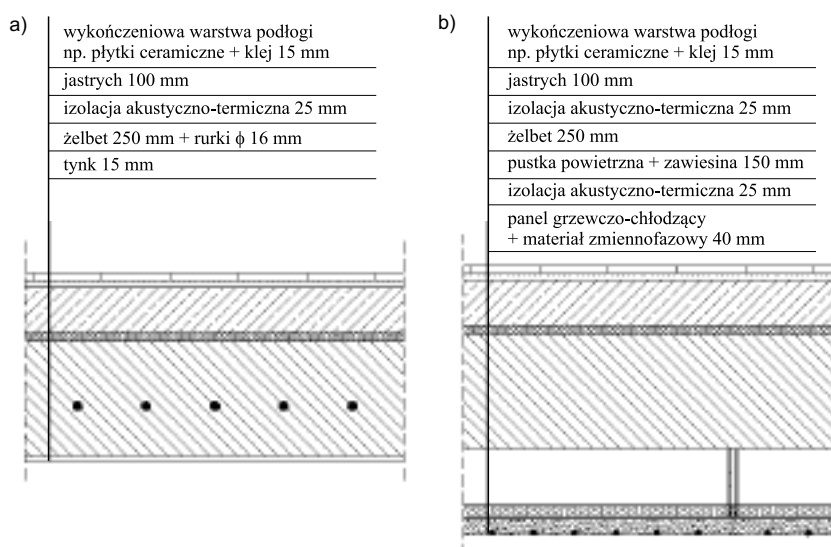
Systemy stropów i sufitów grzewczo-chłodzących mają na celu utrzymanie temperatury odczuwalnej w zakresie komfortu cieplnego i ograniczenie wymaganego strumienia powietrza nawiewanego do pomieszczenia za pomocą instalacji wentylacji mechanicznej, do ilości spełniającej kryterium higieniczne [1]. Układ regulacyjny powinien uwzględniać ograniczenia temperaturowe i wilgotnościowe, warunkowane komfortem cieplnym oraz koniecznością zachowania temperatury powierzchni wyższej od temperatury punktu rosy. W celu eliminacji zjawiska przegrzewania głowy, temperatura powierzchni stropów nie powinna przekraczać 28°C. Projektowa różnica temperatury na zasilaniu i powrocie to 3°C [3 ÷ 5].

Strop aktywowany termicznie to rozwiązanie, które wykorzystuje zdolność akumulacji ciepła konstrukcji żelbetowej. Zatopione w konstrukcji rurki o średnicy 14 – 20 mm w rozstawie 15 – 30 cm, zasilane wodą grzewczą/chłodzącą aktywują termicznie konstrukcję [8]. Alternatywnym systemem jest sufit grzewczo-chłodzący, który może być instalowany również w istnie-

jących budynkach. Najczęściej stosowanymi systemami są sufity zintegrowane z konstrukcją budynku (natynkowe lub podtynkowe o średnicy rur 14 – 20 mm i rozstawie 10 – 20 cm; rurki kapilarne w warstwie tynku) oraz systemy podwieszane (panele gipsowo-kartonowe lub stalowe z rurkami miedzianymi lub z tworzywa sztucznego o średnicy 10 – 16 mm, ułożonymi w meandry w rozstawie 45 – 120 mm) [4]. Zwiększenie pojemności cieplnej systemu następuje przez wprowadzenie materiału zmien-

no-fazowego (PCM) do warstwy tynku przykrywającego rurki lub jako wypełnienie paneli grzewczo-chłodzących [2]. Przykładową konstrukcję stropu aktywowanego termicznie oraz sufitu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem PCM przedstawiono na rysunku 1.

Celem artykułu jest ocena wpływu płaszczyznowych systemów grzewczo-chłodzących o dużej pojemności cieplnej na bilans energetyczny budynku oraz warunki termiczne w pomieszczeniu.



Rys. 1. Przykładowa konstrukcja: a) stropu aktywowanego termicznie; b) sufitu grzewczo-chłodzącego wypełnionego PCM

Fig. 1. An example of: a) thermally activated building system; b) cooling and heating ceiling system with a PCM

¹⁾ Politechnika Poznańska; Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*)} Adres do korespondencji:
joanna.sinacka@put.poznan.pl

Wydajność grzewcza i chłodnicza

Rozwiązanie zagadnienia wymaganej mocy grzewczej i chłodniczej budynku, w którym zastosowano stropy lub sufity grzewczo-chłodzące, współpracujące z materiałami o dużej pojemności cieplnej, powinno uwzględniać dynamikę cieplną budynku oraz podział sposobu przekazywania ciepła na konwekcyjny i radiacyjny. Wymiana ciepła pomiędzy stropem (sufitem) grzewczo-chłodzącym a otoczeniem odbywa się z przewagą promieniowania, które podczas chłodzenia stanowi ok. 60%, natomiast podczas grzania zwiększa się nawet do 80% [2]. Dla przykładowych konstrukcji stropu aktywowanego termicznie, w tabeli 1 przedstawiono:

- jednostkową moc grzewczą, gdy temperatura zasilania wynosi 28°C, temperatura powrotu 25°C, a temperatura w pomieszczeniu 20°C;

- jednostkową moc chłodniczą przy założeniu, że temperatura zasilania wynosi 18°C, temperatura powrotu 21°C, a temperatura w pomieszczeniu 26°C [8].

Charakterystykę wybranych paneli grzewczo-chłodzących pokazano w tabeli 2. Zależność na moc grzewczą i moc chłodniczą Q opisana jest wzorem [5, 9]:

$$\dot{Q} = K \cdot \Delta T^n \text{ [W]} \quad (1)$$

gdzie:

ΔT – różnica temperatury pomiędzy powierzchnią panelu a otoczeniem [K];
 K, n – wartości stałe dla danego panelu grzewczo-chłodzącego [-].

Tabela 1. Jednostkowa moc grzewcza i chłodnicza w zależności od konstrukcji stropu aktywowanego termicznie [8]

Table 1. Heating/cooling performance of different thermally activated building systems [8]

Warstwy stropu	Jednostkowa moc grzewcza/chłodnicza [W/m ²]		
	sufit	podłoga	suma
Dywan 15 mm, jastrych 100 mm, izolacja 25 mm, żelbet 250 mm	24/33,8	5,1/4,6	29,1/38,4
Płytki ceramiczne 15 mm, jastrych 100 mm, izolacja 25 mm, żelbet 250 mm	23,9/33,7	6,2/5,5	30,1/39,2
Płytki ceramiczne 15 mm, jastrych 100 mm, żelbet 250 mm	22,1/31,2	14,7/12,2	36,8/43,4

Tabela 2. Charakterystyka wybranych paneli grzewczo-chłodzących [9]
Table 2. Performance of selected heating and cooling ceiling modules [9]

Parametry		Panele stalowe z warstwą grafitu i izolacją		Panele stalowe z warstwą aluminium i izolacją	
		wolnowiszące	sufit zabudowany	wolnowiszące	sufit zabudowany
Tryb chłodzenia	K	11,653	10,402	10,572	9,439
	n	1,047	1,023	1,043	1,023
	ΔT [K]	jednostkowa moc chłodnicza q_{ch} [W/m ²]			
	2	24,1	21,1	21,8	19,2
	6	76,1	65	68,5	59
Tryb grzania	K	7,9514	6,407	6,8209	5,839
	n	1,097	1,095	1,1133	1,096
	ΔT [K]	jednostkowa moc grzewcza q_g [W/m ²]			
	6	56,8	45,6	50,1	41,6
	4	36,4	29,2	31,9	26,7

Model obliczeniowy

Model obliczeniowy powstał z wykorzystaniem prostej godzinowej dynamicznej metody opisanej w [7]. W modelu założono, że pomieszczenie składa się z trzech przegród, każda o zdefiniowanej skupionej pojemności cieplnej. W sieci modelującej przepływ ciepła wyodrębniono trzy węzły reprezentujące temperaturę powierzchni wewnętrznych budynku, trzy węzły reprezentujące temperaturę konstrukcji budynku oraz węzeł temperatury powietrza wewnętrznego. Wprowadzono węzły definiujące temperaturę powietrza nawiewanego, powietrza zewnętrznego i sąsiednich pomieszczeń klimatyzowanych. Zdefiniowano współczynniki przenoszenia ciepła. Moc grzewcza/chłodnicza, jaką należy dostarczyć do węzła reprezentującego temperaturę stropu (sufitu), obliczana jest dla każdej godziny. Temperatura operatywna jest średnią arytmetyczną temperatury powietrza i średniej ważonej temperatury powierzchni pomieszczenia [6].

Model obliczeniowy dynamiki cieplnej pomieszczenia oparty jest na metodzie Cranka-Nicholsona. Temperatura konstrukcji $\Theta_{m,t,i,j}$ obliczana jest z poprzedniej wartości temperatury $\Theta_{m,t,i,j-1}$ i uwzględnia pojemność cieplną C_m , całkowity strumień ciepła $Q_{mot,i}$ oraz zastępcze współczynniki przenoszenia ciepła $\sum H_{i,j}$, wg zależności [7]:

$$\Theta_{m,t,i,j} = \frac{\Theta_{m,t,i,j-1} \cdot \left[\left(\frac{C_m}{3600} \right) - 0,5 \cdot (\sum H_{i,j}) \right] + Q_{mot,i,j}}{\left[\left(\frac{C_m}{3600} \right) + 0,5 \cdot (\sum H_{i,j}) \right]} \quad (2)$$

Temperaturę węzłową dla przyjętego kroku czasowego oblicza się jako średnią arytmetyczną $\Theta_{m,t,i,j}$ i $\Theta_{m,t,i,j-1}$, natomiast temperaturę i-tej powierzchni:

$$\Theta_{s,i,j} = \frac{\sum Q_{s,i,j} + \sum H_{s,i,j} \Theta_{s,i,j}}{\sum H_{s,i,j}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{s,i,j}$ – strumień ciepła docierający bezpośrednio do węzła powierzchniowego [W];
 $H_{s,i,j}$ – zastępczy współczynnik przenoszenia ciepła [W/K];
 $\Theta_{s,i,j}$ – zastępcza temperatura sąsiedniego węzła [°C].

Analizie poddano pomieszczenie biurowe o powierzchni użytkowej 100 m², przeznaczone dla 10 pracowników. W godzinach pracy budynku (8:00 – 16:00) zapewniony jest komfort cieplny (temperatura operatywna: 20 – 26°C). Poza godzinami użytkowania budynku temperatura operatywna wynosi 18 – 29°C. Strumień powietrza nawiewanego jest równy 300 m³/h, a sprawność odzysku ciepła to 70%. Współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych (dach, ściana południowa i wschodnia) wynosi 0,15 W/(m²K), a okien 0,8 W/(m²K). Pojemność cieplną przegród przedstawiono w tabeli 3. Wartości obliczeniowe właściwości fizycznych wybranych materiałów przyjęto wg PN-EN ISO 6946.

Wyniki i wnioski

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki symulacji wymiany ciepła pomiędzy stropem aktywowanym termicznie a pomieszczeniem oraz pomiędzy sufitem grzewczo-chłodzącym wypełnionym PCM a pomieszczeniem. Potwierdzono wpływ zwiększonej pojemności cieplnej przegród otaczających pomieszczenie na stabilizację temperatury

odczuwalnej w zakresie komfortu cieplnego, przy obciążeniach chłodniczych i stratach ciepła zmiennych w czasie. Widoczne jest również zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia, obniżenie wymaganej mocy grzewczej i chłodniczej oraz jednoznaczne rozdzielanie sezonu ogrzewczego od chłodniczego. Istotny wpływ na bilans energetyczny ma temperatura

zewnątrzna, promieniowanie słoneczne, zyski wewnętrzne, konstrukcja przegród budowlanych oraz rodzaj stolarki okiennej i drzwiowej. Wypełnienie sufitowych paneli grzewczo-chłodzących materiałem zmiennofazowym daje podobne wyniki do systemu stropu aktywowanego termicznie.

Przy zastosowaniu stropów (sufitów) aktywowanych termicznie podczas chło-

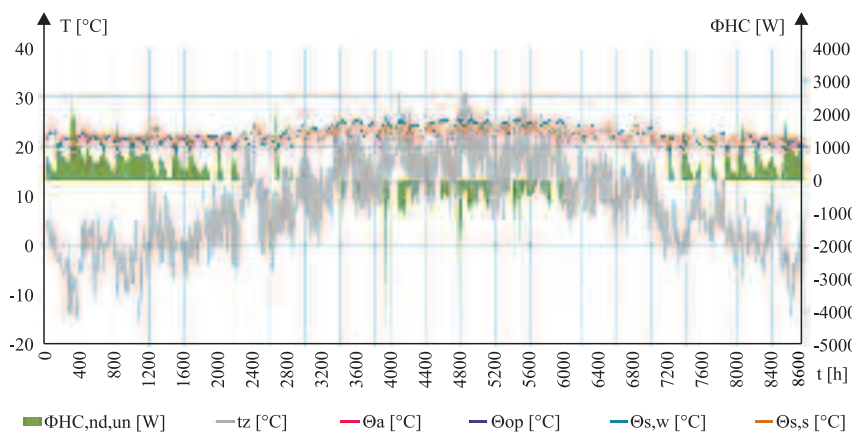
dzenia, temperatura powierzchni w pomieszczeniu jest niższa lub równa temperaturze powietrza w pomieszczeniu. To pozwala na uzyskanie komfortu cieplnego przy wyższej temperaturze powietrza w porównaniu z systemami, w których przeważa wymiana ciepła na drodze konwekcji. Zwiększając powierzchnię chłodzącą, uzyskuje się obniżenie temperatury odczuwalnej przez człowieka i zmniejszona zostaje różnica temperatury pomiędzy sufitem a pozostałymi przegrodami. Analogicznie, w sezonie ogrzewczym, komfort cieplny uzyskiwany jest przy niższej temperaturze powietrza niż temperatura odczuwalna.

Tabela 3. Pojemność cieplna przegród w przypadku wybranych wariantów

Table 3. Thermal capacity of different building structure

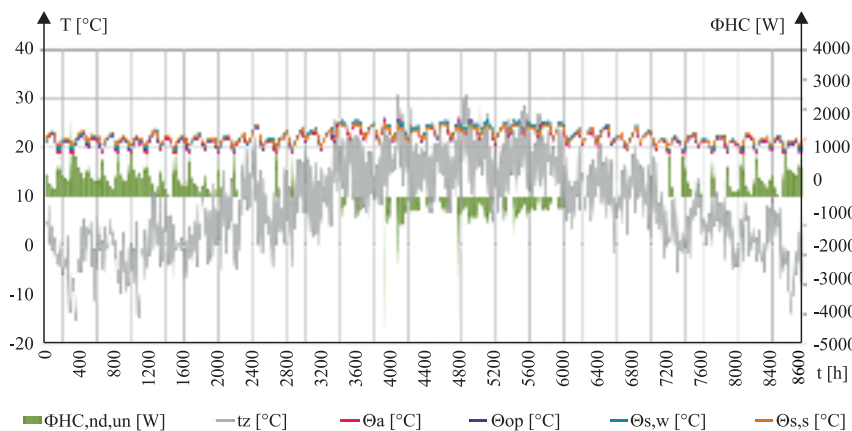
Wariant	Przegroda	Rodzaj materiału	Ciepło właściwe c_w [J/kg/K]	Powierzchnia A [m ²]	Grubość czynnika h [m]	Pojemność cieplna C_m [J/K]
1	przegrody wewnętrzne	cegła silikatowa pełna	880	166,0	0,06	16653120
	ściana zewnętrzna			55,2	0,1	9229440
	strop			100	0,15	31500000
2	przegrody wewnętrzne	cegła silikatowa pełna	880	166,0	0,06	16653120
	ściana zewnętrzna			55,2	0,1	9229440
	sufit			100	0,05	21937500

* uwzględnia ciepło przemiany fazowej (topnienie 49 kJ/kg, krystalizacja 39 kJ/kg)



Rys. 2. Wyniki symulacji wymiany ciepła pomiędzy stropem aktywowanym termicznie a pomieszczeniem

Fig. 2. Simulation results of heat transfer between thermally activated building system and room



Rys. 3. Wyniki symulacji wymiany ciepła pomiędzy sufitem grzewczo-chłodzącym wypełnionym PCM a pomieszczeniem

Fig. 3. Simulation results of heat transfer between cooling/heating ceiling system with PCM and room

Podsumowanie

W artykule przedstawiono dynamikę cieplną pomieszczenia biurowego ze stropami aktywowanymi termicznie i pomieszczenia biurowego z sufitami grzewczo-chłodzącymi z wypełnieniem PCM. Stosując prostą metodę godzinową, zdefiniowano reakcje środowiska wewnętrznego na zmiany temperatury zewnętrznej i zyski ciepła. Duża pojemność cieplna w istotny sposób wpłynęła na bilans energetyczny oraz warunki termiczne w pomieszczeniu.

Literatura

[1] Górka Andrzej, Andrzej Odyjas. 2013. „Simulations of floor cooling system capacity”. *Applied Thermal Engineering* (51): 84 – 90.

[2] Koca Alihsan, Ozgen Acikgoz, Alican Cebi, Gürsel Cetin, Ahmet Selim Dalkilic, Sonchai Wongwises. 2018. „An experimental investigation devoted to determine heat transfer characteristics in a radiant ceiling heating system”. *Heat and Mass Transfer, Vol. 54, issue 2*: 363 – 375.

[3] Koczyk Halina. (red.). 2005. *Ogrzewnictwo praktyczne. Projektowanie. Montaż. Eksploatacja*. Poznań. System Serwis.

[4] Recknagel Hermann, Eberhard Sprenger, Ernst-Rudolf Schramek. 2008. *Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo, Klimatyzacja, Ciepła woda, Chłodnictwo*. Wrocław. Omni Scala.

[5] Wojtkowiak Janusz, Łukasz Amanowicz. 2016. „Badania wydajności cieplnej aluminiowego sufitowego panelu grzewczo-chłodzącego”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 47 (10): 413 – 417.

[6] PN-EN ISO 52016-1 Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne. Część 1: Procedury obliczania.

[7] PN-EN ISO 13790 Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.

[8] www.rehau.pl (dostęp 24.04.2018 r.).

[9] www.zehnder.pl (dostęp 24.04.2018 r.).

Przyjęto do druku: 02.07.2018 r.