

Problem integracji systemów sterowania stropami aktywowanymi termicznie i wentylacji w budynkach edukacyjnych

The problem of integrating control systems for thermally activated building slabs and ventilation in educational buildings

KATARZYNA PAŁASZYŃSKA, KAROL BANDURSKI, MIECZYŚLAW POROWSKI

DOI 10.36119/15.2024.3.4

W artykule przedstawiono zagadnienie sterowania systemami HVAC (ang. *Heating, Ventilation, Air Conditioning*) ze stropami aktywowanymi termicznie – TABS (ang. *Thermally Activated Building Slabs*) dla budynków edukacyjnych charakteryzujących się dużymi i zmiennymi w czasie wewnętrznymi obciążeniami chłodniczymi. Zidentyfikowano problem odprowadzenia obciążeń chłodniczych przez system TABS w tych budynkach, zaproponowano wykorzystanie powietrza wentylacyjnego do odprowadzenia części tych obciążeń oraz porównano proste algorytmy sterowania integrujące system TABS i system powietrzny. Jako narzędzia badawcze opracowano model symulacyjny działania tego systemu w ciągu całego roku w programie TRNSYS17.

Rozwiązano problem wyboru sterowania energooptimalnego, w którym ograniczeniami było spełnienie warunków komfortu cieplnego (temperatury odczuwalnej w wymaganym przedziale), a funkcją celu minimum zapotrzebowania na energię pierwotną systemu HVAC w ciągu roku. Algorytmy sterowania systemem TABS oparto na krzywych grzania i chłodzenia wyznaczonych na podstawie metody UBB (ang. *Unknown-But-Bounded* – nieznany, ale ograniczony [profil obciążeń]), w których temperatury przełączenia wyznaczono opierając się na oryginalnej autorskiej metodzie.

Obliczenia przeprowadzono dla studium przypadku – sali wykładowej w budynku edukacyjnym. Wykazano, iż tylko współpraca systemu TABS z wentylacją działającą również na potrzeby odprowadzenia części obciążeń termicznych – TABS+VAV (ang. *Variable Air Volume*), pozwala na utrzymanie wartości temperatury odczuwalnej w wymaganym przedziale komfortu cieplnego – 83% czasu użytkowania dla najkorzystniejszego komfortowo wariantu sterowania. W przypadku, gdy wentylacja działała wyłącznie na potrzeby higieniczne – TABS+DCV (ang. *Demand Control Ventilation*) czas, w którym temperatura odczuwalna mieściła się w przedziale komfortowym wynosił dla najkorzystniejszego wariantu sterowania tylko 14% czasu użytkowania pomieszczenia.

Słowa kluczowe: TABS, TRNSYS, VAV, DCV, sterowanie energooszczędne, użytkownicy, komfort cieplny

In the article, the issue of control HVAC (*Heating, Ventilation, Air Conditioning*) systems with thermally activated building systems (TABS) in educational buildings, characterized by large and dynamically changing internal cooling loads, is presented. The problem of dissipating cooling loads through the TABS system in this kind of building was identified. The use of ventilation air to dissipate a portion of these loads was proposed, and simple control algorithms integrating the TABS system and the air system were compared. A simulation model of the system's operation throughout the year was developed using the TRNSYS17 program as a research tool.

The optimization problem of selecting energy-optimal control was solved, where the constraints were to meet thermal comfort conditions (operative temperature within the required range), and the objective function was to minimize the primary energy demand of the HVAC system throughout the year. TABS system control algorithms were based on: heating and cooling curves determined with the Unknown-But-Bounded (UBB) method and switching temperatures were determined with an original author's method.

Calculations were carried out for a case study – a lecture room in an educational building. It was demonstrated that only the integration of the TABS system with ventilation, also acting to dissipate part of the thermal loads TABS+VAV (*Variable Air Volume*), allows maintaining the operative temperature within the required comfort range for 83% of the occupation time for the most favorable comfort control variant. In the case where ventilation only served hygiene purposes – TABS+DCV (*Demand Control Ventilation*), the time of operative temperature within the comfort range was only 14% of the room's occupation time for the most favorable control variant.

Keywords: TABS, TRNSYS, VAV, DCV, energy-efficient control, users, thermal comfort

mgr inż. Katarzyna Pałaszynska <https://orcid.org/0000-0002-3403-7536>, dr inż. Karol Bandurski <https://orcid.org/0000-0001-8578-7233>, dr hab. inż. Mieczysław Porowski, prof. PP <https://orcid.org/0000-0002-9793-6133> – Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

Adres mailowy do korespondencji/Corresponding author: katarzyna.palaszynska@put.poznan.pl

Wprowadzenie

Budynki edukacyjne – definicja, charakterystyka obciążeń

Budynki edukacyjne charakteryzują się dużym nagromadzeniem ludzi w ograniczonej przestrzeni. Obciążenia wewnętrzne powstające w wyniku obecności osób w pomieszczeniach dydaktycznych podlegają dynamicznym zmianom, zależnym od harmonogramu zajęć oraz wielkości grupy lekcyjnej lub akademickiej. W konsekwencji, budynki edukacyjne charakteryzują się relatywnie dużymi i dynamicznie zmieniającymi się obciążeniami chłodniczymi oraz obciążeniami od zanieczyszczeń pochodzących od ludzi.

W odniesieniu do obciążeń cząstkami aktywnymi (wirusy, bakterie, zarodniki grzybów) wiąże się to ze zwiększeniem ryzyka transmisji wirusów wśród zgromadzonych ludzi. Duże cząstki oddechowe, czyli krople o średnicy większej niż 5-10µm [2], są głównym sposobem prze-

powiednich własnościach dynamicznych, dostosowanych do dynamiki zmian tych obciążeń. Wynikowo natomiast istotne jest, aby system HVAC dla budynków edukacyjnych spełniał dodatkowo współczesne wymagania i standardy energetyczne związane z eksploatacją tych systemów.

Systemy HVAC z TABS – struktura, rozwój badań

Intensywne badania nad wykorzystaniem masy budynku do grzania i chłodzenia trwają od lat '90 dwudziestego wieku. W 1993 roku Meierhans wykazał, że powierzchnie chłodzone bezpośrednio wodą zapewniają dobry komfort cieplny przy dużych obciążeniach chłodniczych, a wysoka wydajność dystrybucji ciepła w systemach hydraulicznych zmniejsza koszty transportu energii, natomiast całkowite zużycie energii jest tylko nieznacznie niższe [13].

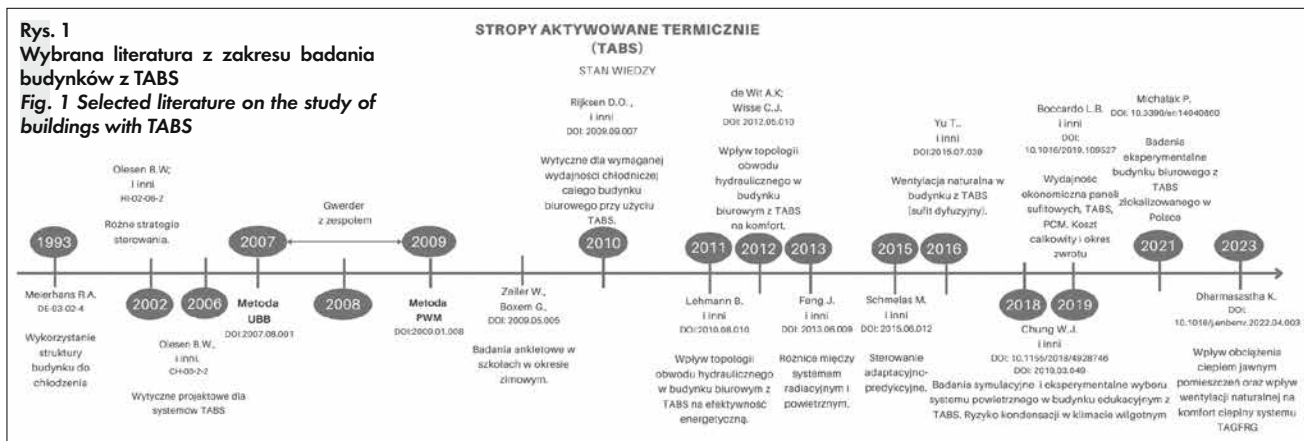
TABS (ang. *Thermally Activated Building Systems*) to technologia, która wyko-

duża bezwładność cieplna TABS implikuje problemy eksploatacyjne w sterowaniu, przede wszystkim brak możliwości regulacji parametrów komfortu w różnych pomieszczeniach znajdujących się w tej samej strefie hydraulicznej lub doraźnie w funkcji szybkich i nie kontrolowanych zmian obciążeń. Dlatego niekiedy występuje konieczność ręcznego przełączania między trybem grzania i chłodzenia na podstawie niejednoznacznych przesłanek, co komplikuje obsługę obiektu i wymaga dodatkowego zaangażowania operatorów [6, 18].

Rys. 1 przedstawia wybrane publikacje uporządkowane na osi czasu obrazujące rozwój TABS. Analiza chronologii pozwala zaobserwować ewolucję badań. W początkowym okresie opracowywano metody wyznaczenia temperatury wody zasilającej w stropach, [6, 13, 15, 17], a następnie coraz bardziej zaawansowane strategie sterowania działaniem systemów HVAC wykorzystujących TABS.

Rys. 1

Wybrana literatura z zakresu badania budynków z TABS
Fig. 1 Selected literature on the study of buildings with TABS



noszenia chorób, takich jak COVID-19. SARSCoV-2 może być również przenoszony przez aerozole oddechowe, czyli krople mniejsze niż 5-10µm średnicy [2]. W słabo wentylowanych pomieszczeniach takie aerozole utrzymują się w powietrzu przez dłuższy czas i przenoszą się na większe odległości.

W przypadku pomieszczeń bez wentylacji czas, po którym liczba zawieszonych w powietrzu drobnych kropelek zmniejsza się o połowę wynosi 4 minuty, natomiast przy załączonej wentylacji mechanicznej liczba cząstek oddechowych zmniejsza się o połowę w ciągu 1,4 min. [1].

Dlatego też wentylacja mechaniczna jest aktualnie wymagany standardem w odniesieniu do budynków edukacyjnych, zwłaszcza nowo projektowanych. W celu odprowadzenia obciążeń chłodniczych istotny jest wybór systemu ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji – HVAC (ang. *Heating, Ventilation, Air Conditioning*), o od-

rzystuje strukturę budynku do magazynowania ciepła i chłodu, umożliwiając efektywne ogrzewanie i chłodzenie budynku. Według normy [9] przegroda aktywna definiowana jest jako przegroda w budynku, w której zatopione są przewody z płynem do celów grzania i chłodzenia.

Przewody z płynem są osadzone w powierzchniach budynku lub w konstrukcji budynku. Działają jako wymienniki ciepła pełniące funkcję emitorów i absorberów ciepła oraz magazynów ciepła/chłodu w konstrukcji.

Układy promieniujące o dużych powierzchniach i małej różnicy temperatury między powierzchniami a obsługiwaną przestrzenią mają znaczny stopień samoregulacji. Niewielkie zmiany temperatury w pomieszczeniu znacząco zmieniają intensywność wymiany ciepła [15].

Jednakże, pomimo tego efektu, mogą wystąpić trudności w kompensowaniu intensywnych profili obciążeń cieplnych.

Równolegle z TABS musi pracować instalacja wentylacyjna. Aktualnie dominującym standardem jest wymiarowanie tej instalacji tylko na potrzeby higieniczne, bez uwzględniania obciążeń termicznych – system DCV (ang. *Demand Control Ventilation* – wentylacja sterowana zapotrzebowaniem), wówczas działa ona w funkcji obciążeń higienicznych i jest sterowana w oparciu o pomiary CO₂. Jednak w najnowszej literaturze coraz częściej pojawiają się zagadnienia związane z integracją TABS z systemami wentylacyjnymi w celu efektywniejszego odprowadzenia obciążeń cieplnych [3–5, 25].

W [15] autorzy uznali, że stacjonarne analizy energetyczne systemów TABS są niewystarczające do oceny ich wydajności i opracowywania ich algorytmów sterowania. W celu wykonania analiz dynamicznych systemów TABS wykorzystano program do symulacji dynamicznej systemów energetycznych (w tym budynków)

TRNSYS1998. Olesen i in. w [16] zaprezentowali zestaw wytycznych projektowych dla wbudowanych systemów ogrzewania/chłodzenia wykorzystujących wodę, opartych na odnawialnych źródłach energii. Zaproponowali metodę aktywnej integracji masy budynku w celu redukcji obciążeń szczytowych: przenoszenia obciążeń grzewczych lub chłodniczych poza godziny szczytu. Przedstawili uproszczoną metodę wymiarowania systemu z TABS opartą o diagramy, oraz bardziej dokładną opartą na metodzie różnic skończonych.

Gwerder i zespół [6, 7, 10, 11, 14, 24] zaprezentowali metodę sterowania TABS w oparciu o krzywą grzewczą i chłodniczą. W [6] przedstawili metodę UBB (ang. *Unknown-But-Bounded* – nieznany, ale ograniczony [profil obciążeń]), która może być stosowana w obiektach o niskich lub średnich obciążeniach chłodniczych. Zaproponowali też bardziej rozbudowaną metodę PWM (ang. *Pulse Width Modulation* – modulacja szerokości impulsów [aktywnej pracy TABS]) opartą o dodatkowe czujniki i sterowanie czasem pracy pomp obiegowych [8]. Lehmann, B. i in. w [11] przeanalizowali wpływ regulacji obiegu hydraulicznego i wytwarzania chłodu na efektywność energetyczną, a w [10, 14] zaprezentowali model sterowania predykcyjnego w oparciu o prognozy pogody i automatykę pomiarową wewnątrz budynku. Sterowanie adaptacyjno-predykcyjne analizowane było również w [22], w tym wypadku zastosowana metoda pozwoliła na ograniczenie czasu pracy pompy aż do 81%, przy jednoczesnym polepszeniu komfortu cieplnego.

Systemy HVAC z TABS w budynkach edukacyjnych – sterowanie, problem badawczy

W literaturze brakuje badań dotyczących budynków edukacyjnych z TABS. Jest to jednak istotne zagadnienie, gdyż trwająca transformacja energetyczna i nowe inwestycje dotyczą również tego typu obiektów. Natomiast z perspektywy uczniów, ważne jest, aby czas spędzony w szkole (6-8 godzin dziennie) był efektywny, czemu sprzyja wysoka jakość środowiska wewnętrznego [12].

W [26] przedstawiono wyniki pomiarów i ankiet przeprowadzanych w 14 szkołach wyposażonych w różne typy systemów HVAC, w tym w trzech szkołach z TABS. Wszystkie analizowane placówki to szkoły podstawowe zlokalizowane w Holandii. Wykazano, że stosowanie stropów aktywowanych termicznie może w niewielkim stopniu poprawić komfort cieplny w budynkach szkolnych w okresie

zimowym. Mankamentem prezentowanych badań ankietowych była niewielka liczba kwestionariuszy (między 4 a 43 na szkołę) oraz fakt, że w niektórych placówkach ankiety zostały wypełnione wyłącznie przez osoby dorosłe. Wiadomo natomiast, że preferencje termiczne oraz odczucia mogą być różne w zależności od grupy wiekowej. Dzieci w szkołach preferują niższe temperatury powietrza niż osoby dorosłe [21].

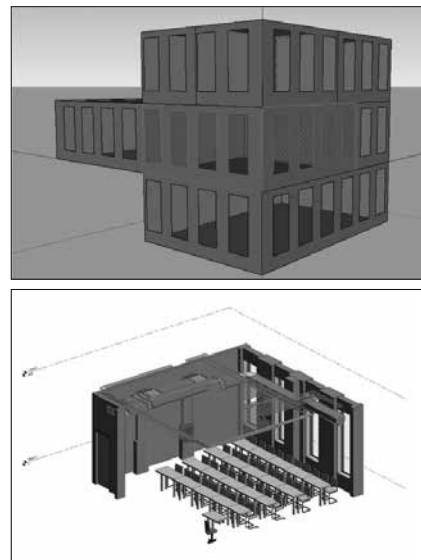
Inną istotną kwestią w przypadku budynków edukacyjnych jest zmienny w czasie i trudny do precyzyjnego przewidzenia harmonogram wewnętrznych obciążeń wynikający z profilu użytkowania pomieszczenia. W [23] potwierdzono wpływ profilu użytkowania pomieszczenia na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia w budynku biurowym ze stropami grzewczo – chłodzącymi.

Znane i stosowane dotychczas algorytmy sterowania systemami HVAC z TABS zakładają sterowanie strumieniem powietrza wentylacyjnego głównie w funkcji higienicznej, natomiast system TABS realizuje funkcję odprowadzenia obciążeń termicznych (zysków lub strat ciepła jawnego).

W aplikacjach systemów HVAC z TABS w budynkach edukacyjnych – o dużych i dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych – chwilowe wydajności chłodnicze TABS (ze względu na dużą bezwładność) nie odpowiadają na ogół chwilowym obciążeniom chłodniczym, w konsekwencji przedziały zmienności temperatury w pomieszczeniach są większe od akceptowalnych. Wynikowo, powoduje to pogorszenie komfortu cieplnego w pomieszczeniach. Rozwiązaniem problemu może być wykorzystanie powietrza wentylacyjnego do odprowadzania części obciążeń termicznych, zwłaszcza chłodniczych. Związane jest to z poszerzeniem funkcji instalacji powietrznej z funkcji tylko higienicznej, do funkcji częściowego odprowadzenia obciążeń termicznych, czyli z zastosowaniem systemu ze zmiennym strumieniem powietrza VAV (ang. *Variable Air Volume*), ewentualnie ze zmianą temperatury powietrza nawiewanego. Podstawowym problemem badawczym o dużym znaczeniu aplikacyjnym jest tutaj opracowanie algorytmów sterowania systemu TABS współpracującego z instalacją wentylacyjną w taki sposób, aby jednocześnie uzyskać minimum zapotrzebowania na energię i wysoką jakość środowiska wewnętrznego. Przedstawienie i rozwiązanie tego zagadnienia dla studium przypadku jest przedmiotem prezentowanych analiz.

Model technologiczny pomieszczenia

Model geometryczny pomieszczenia zaimplementowany w programie TRNSYS 17 przedstawiono na rys. 2. Model ten odzwierciedla narożne pomieszczenie dydaktyczne zlokalizowane na pierwszym piętrze (trzy piętrowego budynku) o orientacji północno-wschodniej przegród przezroczystych. Powierzchnia pomieszczenia wynosi 69 m², a kubatura 230 m³. Pomieszczenie posiada dwie ściany zewnętrzne o powierzchni 28 m², w których powierzchnia okien stanowi 42%.



Rys. 2
Ilustracja modelu [27]
Fig. 2 Illustration of the model [27]

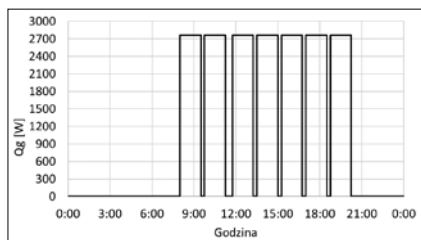
Maksymalna liczba osób w sali wynosi 45 (1,5 m²/os). Przyjęto jednostkowe zyski ciepła jawnego od ludzi równe 75 W/os (praca siedząca, pisanie) oraz od urządzeń i oświetlenia. Jednostkowy strumień powietrza wentylacyjnego 30 m³/h/os – maksymalna wartość strumienia powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniu wynosi 1625 m³/h.

Przyjęty harmonogram obciążeń (rys. 3.) zakłada, że zajęcia trwające 90 minut rozpoczynają się o godzinie 8:00, a kończą o 20:15. Pomiedzy zajęciami są przerwy 15 lub 30 minutowe. Przyjęty harmonogram obciążeń stanowi 80% obciążenia maksymalnego.

Wynikowy harmonogram wewnętrznych zysków ciepła (konwekcyjnych i radiacyjnych) przedstawiono na rys.3.

Dane meteorologiczne do symulacji przyjęto dla typowego roku meteorologicznego w Poznaniu, wg danych udostępnionych w pakiecie TRNSYS 17.

Wymagania komfortu cieplnego i jakości powietrza są następujące:



Rys. 3
Harmonogram
Fig. 3 Schedule

- temperatura powietrza w pomieszczeniu w przedziale 22°C do 24°C,
- prędkość powietrza 0,1 m/s,
- izolacyjność cieplna odzieży 1 clo,
- aktywność fizyczna 1 met,
- wskaźnik komfortu PMV – 0,5 do +0,5,
- wentylacja higieniczna: 30m³/h/os.

System HVAC z TABS – model symulacyjny

Algorytm ogólny, założenia i dane wejściowe

Narzędziem zastosowanym w celu rozwiązania problemu badawczego – takiego sterowania współdziałaniem systemu powietrznego i TABS w ramach systemu HVAC, aby utrzymać parametry komfortu w pomieszczeniu w dopuszczalnych przedziałach przy minimum rocznego zapotrzebowania na energię – jest model symulacyjny. Model symulacyjny działania systemu HVAC z TABS w ciągu całego roku opracowany został w programie TRNSYS 17.

Przyjęto następujące warianty współdziałania systemu TABS i systemu powietrznego:

- TABS+DCV (strumień powietrza w funkcji higienicznej),
- TABS+VAV (strumień powietrza w funkcji higienicznej i odprowadzenia obciążeń termicznych, ewentualnie regulacja temperatury powietrza nawiewanego w funkcji odprowadzenia obciążeń termicznych).

Jako kryterium oceny komfortu cieplnego przyjęto temperaturę odczuwalną (średnią arytmetyczną temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania przegród).

Zapotrzebowanie na energię pierwotną dla ogrzewania i chłodzenia wyznaczono opierając się na równaniu [19, 20]:

$$E_p = w_{H,TABS} \cdot \frac{Q_{H,TABS}}{\eta_{H,TABS}} + w_{H,AIR} \cdot \frac{Q_{H,AIR}}{\eta_{H,AIR}} + w_{C,TABS} \cdot \frac{Q_{C,TABS}}{\eta_{C,TABS}} + w_{C,AIR} \cdot \frac{Q_{C,AIR}}{\eta_{C,AIR}} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{H/C,TABS/AIR}$ – moc na potrzeby ogrzewania (H) lub chłodzenia (C) pomieszczenia dostarczona poprzez system TABS lub powietrzny (AIR); [W]

$w_{H,TABS}$ – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej, dla grzania, przez TABS, przyjęta wartość 1,1

$w_{H,AIR}$ – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej, dla grzania, przez system powietrzny, przyjęta wartość 1,1

$w_{C,TABS}$ – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej, dla chłodzenia, przez TABS, przyjęta wartość 2,5

$w_{C,AIR}$ – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej, dla chłodzenia, przez system powietrzny, przyjęta wartość 3,0

$\eta_{H,TABS}$ – średnia sezonowa całkowita sprawność ogrzewania za pomocą systemu TABS, przyjęta wartość 0,81

$\eta_{H,AIR}$ – średnia sezonowa całkowita sprawność ogrzewania za pomocą systemu powietrznego, przyjęta wartość 0,81

$\eta_{C,TABS}$ – średnia sezonowa całkowita sprawność chłodzenia za pomocą systemu TABS, przyjęta wartość 3,5

$\eta_{C,AIR}$ – średnia sezonowa całkowita sprawność wytwarzania chłodu za pomocą systemu powietrznego, przyjęta wartość 1,9

Krzywe grzania i chłodzenia dla systemu TABS wyznaczono na podstawie autorskiej koncepcji stanowiącej modyfikację metody UBB [6]. Metoda UBB dedykowana jest dla przypadków, w których wewnętrzne obciążenia chłodnicze nie zmieniają się w szerokim przedziale. W przypadku budynków edukacyjnych o dużych i dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych (dużych różnicach między obciążeniem minimalnym i maksymalnym), metoda UBB nie daje możliwości wyznaczenia temperatury przełączenia trybu działania stropu (grzanie – pauza – chłodzenie). Opierając się na autorskiej koncepcji wykorzystano metodę UBB do wyznaczenia

krzywych grzania i chłodzenia natomiast temperaturę przełączenia między trybem grzania, chłodzenia i brakiem działania TABS (pauza w działaniu) określono na podstawie autorskiego algorytmu. Kroki tego algorytmu są następujące:

- 1) Symulacja obciążeń termicznych pomieszczenia w ciągu całego roku przy założeniu wyłączanego systemu HVAC – braku aktywnego odprowadzania obciążeń termicznych (zysków lub strat ciepła jawnego).
- 2) Wyznaczenie – na podstawie symulacji obciążeń termicznych – zależności temperatury odczuwalnej (T_{op}) w pomieszczeniu w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego (T_e) – wynikowo w formie chmury punktów w układzie współrzędnych $T_{op} = f(T_e)$.
- 3) Na podstawie otrzymanej chmury punktów dla oczekiwanego przedziału temperatury odczuwalnej (22 ÷ 24°C) określenie odpowiadającej mu średniej temperatury zewnętrznej $T_{e,śr}$.
- 4) Na podstawie otrzymanej chmury punktów określenie wariantów szerokości przedziału wyłączenia stropu (pauzy w działaniu) przez określenie $T_{e,H}$ – maksymalnej temperatury zewnętrznej trybu grzania, $T_{e,C}$ – minimalnej temperatury zewnętrznej trybu chłodzenia:

$$T_{e,H} = T_{e,śr} - \Delta T \quad (2)$$

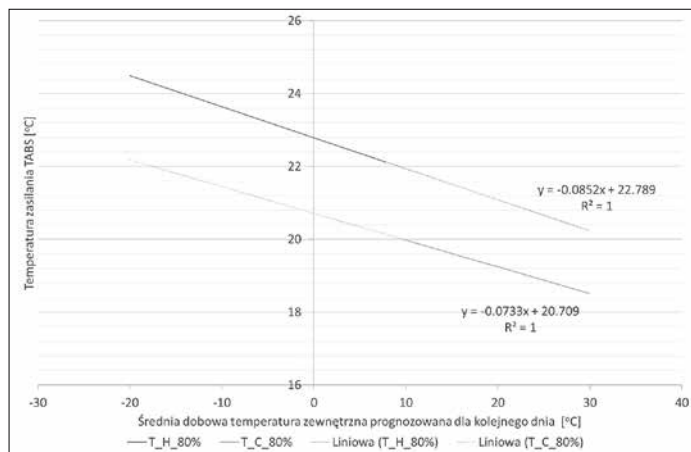
$$T_{e,C} = T_{e,śr} + \Delta T \quad (3)$$

Czyli pauza w działaniu wynosi $2\Delta T$.

- 1) Symulacja działania systemu HVAC z TABS – wyznaczenie:
 - rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną E_p dla każdego wariantu pauzy – każdej pary $T_{e,H}$ i $T_{e,C}$,
 - parametrów komfortu cieplnego w pomieszczeniu i czasu komfortu oraz dyskomfortu w trakcie użytkowania pomieszczenia.
- 2) Wyznaczenie sterowania energooszczędnego – takich temperatur przełączenia $T_{e,H}$ i $T_{e,C}$ dla których temperatura odczuwalna w pomieszczeniu mieści się w przedziale dopuszczalnym i roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną E_p osiąga minimum.

Krzywe grzania i chłodzenia

Warianty par temperatur przełączenia między krzywą grzania, chłodzenia a brakiem działania TABS – $T_{e,H}$ i $T_{e,C}$ – wyznaczono na podstawie algorytmu opisanego wcześniej, przedstawiono w tabeli 1, natomiast na rys. 4 przedstawiono krzywe grzania i chłodzenia wyznaczone metodą UBB dla profilu obciążeń przedstawionego na rys. 3.



Rys. 4
Krzywa grzewcza
i chłodnicza, użyt-
kowane w
wariantach $\Delta T = 1$
z tab. 1

Fig. 4 Supply
water temperature
for heating and
cooling used
acc. to $\Delta T = 1$ from
tab. 1

okresy przegrzania zarówno w zimie (max. 27°C), jak i w lecie (max. 35°C);

- dla systemu TABS+VAV istnieją warianty przełączania trybów, dla których temperatura odczuwalna mieści się w dopuszczalnym komfortowo przedziale 20 ÷ 24°C;

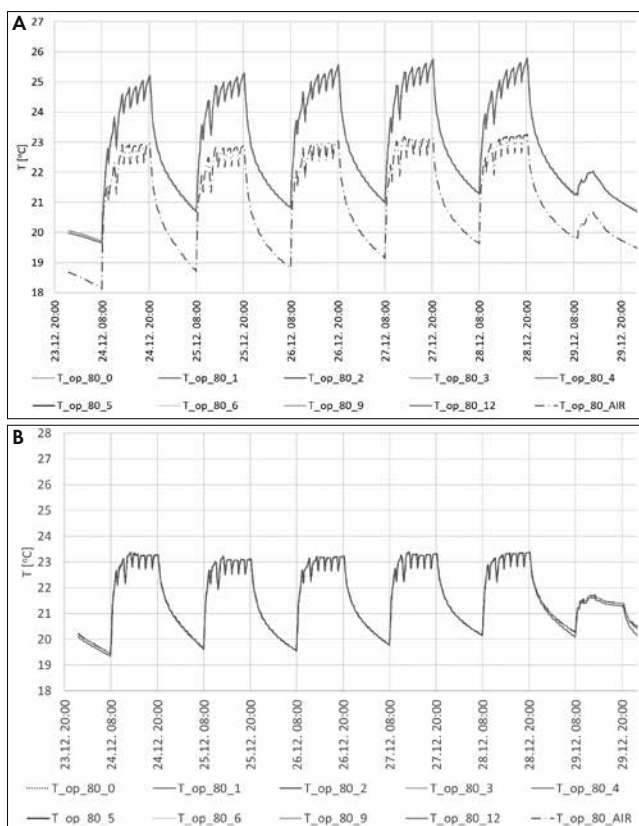
- System TABS+VAV jest dla każdego wariantu przełączania trybów lepszy komfortowo od systemu TABS+DCV.

Dla oceny komfortu cieplnego przeanalizowano dodatkowo czas trwania poszczególnych przedziałów temperatury odczuwanej – wyniki w tabeli 2 – dla systemu TABS+DCV oraz w tabeli 3 – dla

TABELA 1 Temperatury przełączenia dla między krzywą grzania, chłodzenia i brakiem działania TABS
TABLE 1. Switching temperatures for between heating, cooling and no TABS mode

ΔT [°C]	$T_{e,H}$ [°C]	$T_{e,C}$ [°C]
0	8,7	8,7
1	7,7	9,7
2	6,7	10,7
3	5,7	11,7
4	4,7	12,7
5	3,7	13,7
6	2,7	14,7
9	-0,3	17,7
12	-3,3	20,7
∞ (AIR – tylko system powietrzny)	-	-

Rys. 5
Przebieg temperatur
powietrza w przykła-
dowym tygodniu zimą
dla TABS+DCV (rys A),
TABS+VAV (rys B),
Fig. 5 Air temperature
course in an example
week in winter for
TABS+DCV (fig. A),
TABS+VAV (fig. B),
Oznaczenia:
 T_a – temp. Powietrza,
 T_{op} – temp. odczu-
walna, AIR – działa
wyłącznie system
powietrzny, wartość
liczbowa – odległość
temperatury przełącze-
nia od temperatury
średniej



Wyniki obliczeń, interpretacja

Wyniki obliczeń na podstawie modelu symulacyjnego dotyczą komfortu cieplnego oraz zapotrzebowania na energię pierwotną dla analizowanych dwóch wariantów systemu HVAC: TABS+DCV i TABS+VAV oraz dziewięciu wariantów przełączenia między trybami grzania, chłodzenia i brakiem pracy TABS przedstawionymi w tabeli 2. Dla porównania wykonano również obliczenia dla wariantu, w którym działa tylko system powietrzny, bez wsparcia TABS ($\Delta T = \infty$).

Ocena komfortu cieplnego

W pierwszym przypadku systemu HVAC strumień powietrza wentylacyjnego jest funkcją wyłącznie zapotrzebowania na powietrze higieniczne (TABS+DCV), w drugim system wentylacyjny bierze udział w odprowadzaniu obciążeń chłodniczych (TABS+VAV). W obu przypadkach wentylacja działa przez cały czas

w godzinach 8-20. Na rys 5 i rys. 6 pokazano przebieg temperatur w wybranym tygodniu w okresie zimy i lata.

Analizując przedstawione na rysunkach 5 i 6 wykresy zmian temperatury odczuwanej w pomieszczeniu można stwierdzić, iż:

- dla systemu TABS+DCV we wszystkich wariantach przełączania trybów temperatura odczuwalna nie mieści się w dopuszczalnym komfortowo przedziale 20 ÷ 24°C – występują zwłaszcza

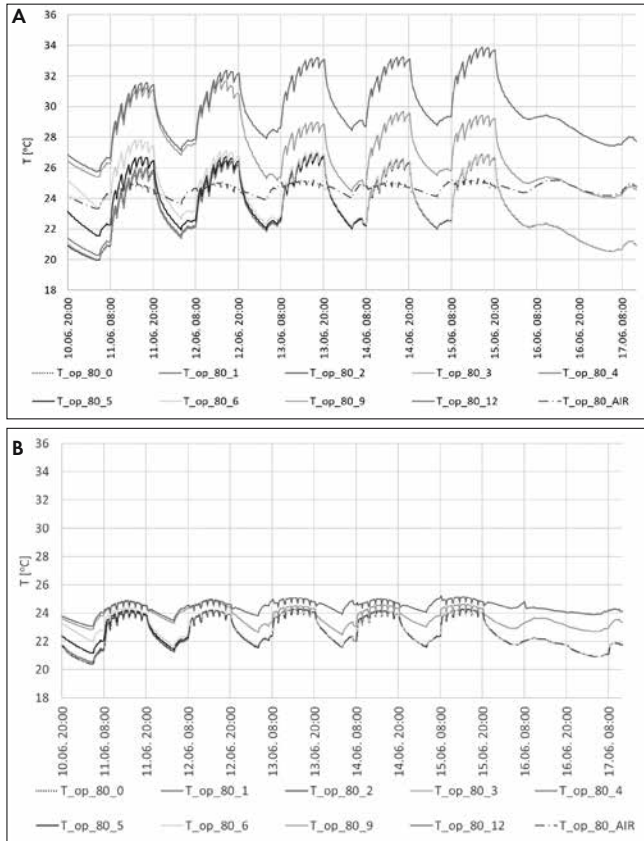
systemu TABS+VAV oraz systemu tylko powietrznego.

Analizując wyniki obliczeń przedstawione w tabelach 2 i 3 można stwierdzić, iż:

- dla przypadku, w którym za utrzymanie komfortu termicznego odpowiedzialny jest wyłącznie system powietrzny (dostarczanie ciepła i chłodu za pomocą instalacji powietrznej), założony zakres temperatury operacyjnej w pomieszczeniu jest utrzymywany przez około 51% czasu;

TABELA 2 Procentowy udział czasu trwania poszczególnych przedziałów temperatury odczuwanej dla wariantu TABS+DCV
TABLE 2. Percentage of the duration of individual temperature intervals for the TABS+DCV variant

	$T_{op_80_0}$	$T_{op_80_1}$	$T_{op_80_2}$	$T_{op_80_3}$	$T_{op_80_4}$	$T_{op_80_5}$	$T_{op_80_6}$	$T_{op_80_9}$	$T_{op_80_12}$
poniżej 22°C	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
22-24°C	14%	13%	13%	12%	11%	10%	9%	7%	8%
powyżej 24°C	85%	85%	86%	87%	88%	89%	90%	92%	91%



Rys. 6
Przebieg temperatur powietrza w przykładowym tygodniu latem dla TABS+DCV (rys A), TABS+VAV (rys B), Fig. 6 Air temperature course in an example week in summer for TABS+DCV (fig. A), TABS+VAV (fig. B),
Oznaczenia:
T_a – temp. Powietrza,
T_{op} – temp. odczuwalna, AIR – działa wyłącznie system powietrzny, wartość liczbową – odległość temperatury przełączenia od temperatury średniej

TABS nie działa (282 kWh/m²/a) – działa tylko system powietrzny. W przypadkach, w których TABS działa przez całą dobę ($\Delta T = 0$), a także gdy $\Delta T \leq 5^\circ\text{C}$, zapotrzebowanie na energię pierwotną utrzymuje się na podobnym poziomie. Na podstawie wyników obliczeń dotyczących oceny komfortu cieplnego i rocznego zapotrzebowania na energię można zidentyfikować wariant optymalny. Wariantem optymalnym jest wariant, dla którego temperatura odczuwalna utrzymywana jest w przedziale dopuszczalnym w najdłuższym czasie w ciągu roku i jednocześnie roczne zapotrzebowanie na energię jest najmniejsze. Wariantem optymalnym jest wariant sterowania, dla którego $\Delta T = 4^\circ\text{C}$. W tym wariantcie otrzymano najniższe zapotrzebowanie na energię pierwotną (253 kWh/a/m²), a temperatura w pomieszczeniu mieści się w założonym przedziale przez 77% czasu (rys. 7). W wariantcie optymalnym zapotrzebowanie na energię pierwotną jest mniejsze o 10%, w stosunku do wariantu, w którym strop grzewczo – chłodzący nie działa (wariant – AIR, $\Delta T = \infty$) oraz mniejsze o 7,4%, w stosunku do wariantu, w którym TABS działa w sposób ciągły ($\Delta T = 0$).

TABELA 3 Procentowy udział czasu trwania poszczególnych przedziałów temperatury odczuwalnej dla wariantu TABS+VAV, a także dla systemu wyłącznie powietrznego

TABLE 3. Percentage of the duration of individual temperature intervals for the TABS+VAV variant

	T _{op_80_0}	T _{op_80_1}	T _{op_80_2}	T _{op_80_3}	T _{op_80_4}	T _{op_80_5}	T _{op_80_6}	T _{op_80_9}	T _{op_80_12}	T _{op_80_AIR}
poniżej 22°C	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
22-24°C	83%	82%	81%	79%	77%	74%	70%	58%	53%	51%
powyżej 24°C	15%	16%	17%	19%	21%	24%	28%	40%	45%	45%

- wraz ze wzrostem udziału stropu grzewczo-chłodzącego (TABS) w odprowadzaniu obciążeń termicznych (zmniejszeniem ΔT) czas komfortu się wydłuża – w przypadku gdy strop działa cały czas ($\Delta T=0$) przedział temperatur komfortowych jest utrzymany najdłużej (83% czasu);
- w każdym z analizowanych scenariuszy przechłodzenie w pomieszczeniu występuje nie dłużej niż 2-3% czasu;
- im mniejszy udział działania stropu (TABS) – większa wartość ΔT , tym dłuższy jest czas, w którym może wystąpić przegrzanie.

Stwierdzono, iż współpraca systemu TABS z wentylacją działającą również na potrzeby odprowadzenia części obciążeń termicznych – (TABS+VAV), pozwala na utrzymanie wartości temperatury odczuwalnej w wymaganym przedziale komfortu cieplnego. W przypadku gdy wentylacja działa wyłącznie na potrzeby higieniczne – (TABS+DCV), występuje tendencja do przegrzewania się pomieszczenia.

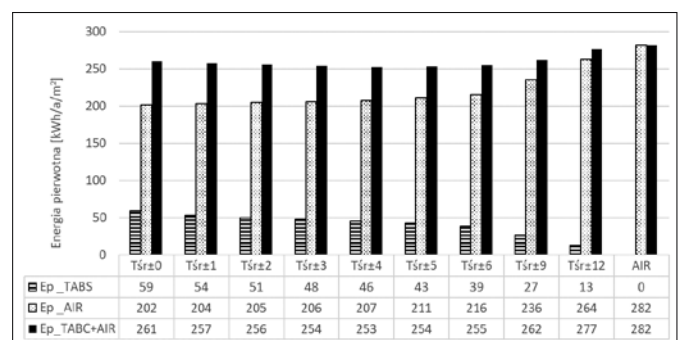
Zapotrzebowanie na energię

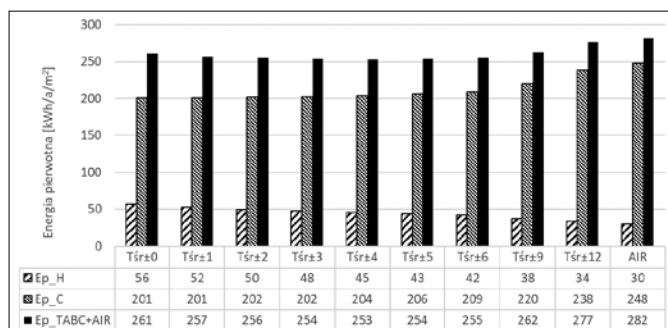
Wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię pierwotną dla analizowanych wariantów systemu TABS+VAV otrzymanych na podstawie modelu symulacyjnego, przedstawiono w formie wykresów na rys.7. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, iż im mniejszy jest udział stropu aktywowanego termicznie w odprowadzaniu obciążeń termicznych – większa wartość ΔT , tym większe jest zapotrzebowanie na energię pierwotną.

Najwyższe zapotrzebowanie na energię pierwotną otrzymano w przypadku gdy

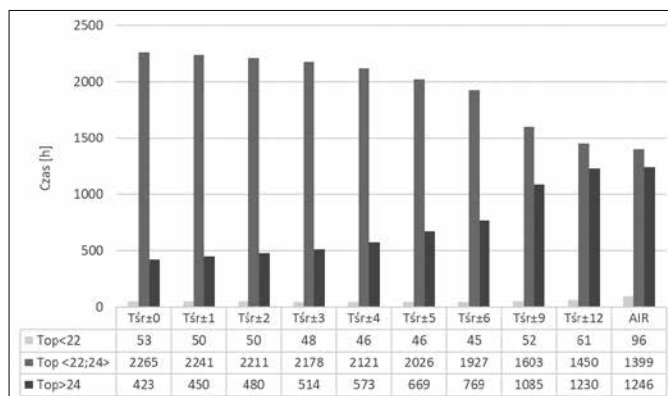
Na rys. 8 przedstawiono wykresy ilustrujące zapotrzebowanie na energię pierwotną z podziałem na cele grzewcze i chłodnicze. Można zauważyć, że zapotrzebowanie na energię jest niesymetryczne rozłożone między ogrzewanie i chłodzenie. Z uwagi na dużą wartość wewnętrznych zysków ciepła udział zapotrzebowania na chłód wynosi od 80 do 90% łącznego zapotrzebowania na energię pierwotną. Z tego powodu najniższym zapotrzebowaniem na całkowitą energię pierwotną charakteryzują się warianty z większym wykorzystaniem systemu TABS,

Rys. 7
Zapotrzebowanie na energię pierwotną systemu TABS+VAV, i tylko powietrznego (AIR) Fig. 7 Primary energy demand of the TABS+VAV system, and air-only (AIR) system





Rys. 8
Zapotrzebowanie na energię pierwotną na potrzeby grzania (H) i chłodzenia (C) dla TABS+VAV
Fig. 8 Primary energy demand for heating (H) and cooling (C) for TABS+VAV



Rys. 9
Czas komfortu i dyskomfortu dla TABS+VAV
Fig. 9 Time of comfort and discomfort for TABS+VAV

który przede wszystkim odbiera obciążenia chłodnicze. Na rys. 9 można zauważyć, że zmniejszanie ΔT wpływa istotnie na ograniczenie przegrzania, a w mniejszym stopniu na ograniczenie przechłodzenia. Wydaje się, że algorytm zostałby ulepszony gdyby ΔT nie był symetryczny względem T_{sr} , wówczas należałoby określić osobno ΔT_H i ΔT_C .

Całkowity czas obciążenia pomieszczenia (czas, w którym w pomieszczeniu przebywają ludzie) wynosi 2741 h. Analizując przedstawione wyniki można stwierdzić, iż przez 99% czasu czyli ponad 2700 h temperatura powietrza mieści się w przedziale komfortowym, jednak czas, gdy temperatura odczuwalna mieści się w oczekiwanym przedziale $20 \div 24^\circ\text{C}$, zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem udziału czasu działania stropu aktywowanego.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienie sterowania systemami HVAC z TABS dla budynków edukacyjnych charakteryzujących się dużymi i zmiennymi w czasie wewnętrznymi obciążeniami chłodniczymi. Przeprowadzono analizy symulacyjne dla studium przypadku – pomieszczenia dydaktycznego, narożnego znajdującego się w budynku zlokalizowanym w Poznaniu. Założono harmonogram pracy obiektu w godzinach od 8:00 do 20:00, czas trwania lekcji 90 minut, przerwy 15 lub 30 minut oraz stałe wewnętrzne obciążenia chłodnicze równe 80% obciążenia maksy-

malnych. W analizach uwzględniono dwa warianty współpracy instalacji TABS z wentylacją. W pierwszym przypadku strumień powietrza wentylacyjnego wyznaczony był tylko w funkcji higienicznej (TABS+DCV), natomiast w drugim – oprócz funkcji higienicznej – system wentylacyjny aktywnie uczestniczył w odprowadzaniu obciążeń chłodniczych (TABS+VAV).

Podstawowym problemem badawczym było wyznaczenie takich algorytmów sterowania systemem TABS zintegrowanego z instalacją wentylacyjną, aby realizowana była funkcja użytkowa – utrzymanie temperatury odczuwalnej w dopuszczalnym przedziale komfortowym $20 \div 24^\circ\text{C}$ przy minimalnym rocznym zapotrzebowaniu na energię pierwotną.

Zaproponowano algorytmy sterowania systemem TABS oparte na krzywych grzania i chłodzenia w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Krzywe grzania i chłodzenia wyznaczono na podstawie metody UBB [6], natomiast temperatury przełączenia między trybem grzania, chłodzenia i brakiem działania TABS wyznaczono na podstawie oryginalnej autorskiej metody.

Wykazano, iż tylko współpraca systemu TABS z wentylacją działającą również na potrzeby odprowadzenia części obciążeń termicznych – (TABS+VAV), pozwala na utrzymanie wartości temperatury odczuwalnej w wymaganym przedziale komfortu cieplnego – w 83% czasu użytkowania dla najkorzystniejszego komfortowo wariantu sterowania. W przypadku, gdy wentylacja działa wyłącznie na po-

trzeby higieniczne – (TABS+DCV) czas, w którym temperatura odczuwalna mieści się w przedziale komfortowym wynosił dla najkorzystniejszego wariantu sterowania tylko 14% czasu użytkowania pomieszczenia. Występowała przede wszystkim tendencja do przegrzewania się pomieszczenia – znaczące przekroczenia temperatury odczuwalnej (do 35°C).

Na podstawie modelu symulacyjnego wyznaczono również optymalny komfortowo i energetycznie wariant – optymalne energetycznie temperatury przełączenia dla grzania i chłodzenia – dla sterowania systemem TABS+VAV. Wykazano, iż zastosowanie optymalnych algorytmów sterowania systemem TABS+VAV umożliwia – przy założeniu utrzymania temperatury odczuwalnej w wymaganym przedziale komfortu w czasie równym 77% czasu użytkowania – uzyskanie oszczędności w zapotrzebowaniu na energię pierwotną równych 10%, w stosunku do wariantu o największym rocznym zapotrzebowaniu na energię.

Dalszy rozwój autorskiej metody powinien zweryfikować symetryczność paazy w działaniu TABS względem średniej temperatury zewnętrznej dla oczekiwanego przedziału temperatury odczuwalnej.

LITERATURA

- [1] Asanati, K. et al. 2021. Healthier schools during the COVID-19 pandemic: ventilation, testing and vaccination. *Journal of the Royal Society of Medicine*. 114, 4 (Feb. 2021), 160–163. DOI: <https://doi.org/10.1177/0141076821992449>.
- [2] Burrridge, H.C. et al. 2021. The ventilation of buildings and other mitigating measures for COVID-19: a focus on wintertime. *Proceedings of the Royal Society A*. 477, 2247 (Mar. 2021). DOI: <https://doi.org/10.1098/RSPA.2020.0855>.
- [3] Chung, W.J. and Lim, J.H. 2019. Cooling operation guidelines of thermally activated building system considering the condensation risk in hot and humid climate. *Energy and Buildings*. 193, (Jun. 2019), 226–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.049>.
- [4] Chung, W.J. and Lim, J.H. 2018. Improved Thermally Activated Building System Design Method Considering Integration of Air Systems. *Advances in Civil Engineering*. 2018, (2018). DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4928746>.
- [5] Dharmasastha, K. et al. 2020. Experimental investigation of thermally activated glass fibre reinforced gypsum roof. *Energy and Buildings*. 228, (Dec. 2020), 110424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110424>.
- [6] Gwerder, M. et al. 2008. Control of thermally-activated building systems (TABS). *Applied Energy*. 85, 7 (Jul. 2008), 565–581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>.
- [7] Gwerder, M. et al. 2007. Control Of Thermally Activated Building Systems. *Proceedings of Clima 2007 – WellBeing Indoors*. 85, June (2007). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>.

- [8] Gwerder, M. et al. 2009. Control of thermally activated building systems (TABS) in intermittent operation with pulse width modulation. *Applied Energy*. 86, 9 (Sep. 2009), 1606–1616. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.008.
- [9] International Organization for Standardization 2012. ISO 11855-4 Building Environment Design – Design, Dimensioning, Installation and Control of Embedded Radiant Heating and Cooling Systems – Part 4: Dimensioning and calculation of the dynamic heating and cooling capacity of Thermo Active Building Systems (.).
- [10] Lehmann, B. et al. 2013. Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation. *Energy and Buildings*. 58, (Mar. 2013), 250–262. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.007.
- [11] Lehmann, B. et al. 2011. Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. *Applied Energy*. 88, 1 (Jan. 2011), 180–191. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.010.
- [12] Manca, S. et al. 2020. The effect of school design on users' responses: A systematic review (2008–2017). *Sustainability (Switzerland)*. 12, 8 (Apr. 2020). DOI:https://doi.org/10.3390/SU12083453.
- [13] Meierhans, R.A. 1993. Slab Cooling and Earth Coupling. *ASHRAE Transactions*. 99(2), (1993), 511–518. DOI:https://doi.org/DE-93-02-4.
- [14] Oldewurtel, F. et al. 2012. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*. 45, (Feb. 2012), 15–27. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022.
- [15] Olesen, B.W. et al. 2002. Control of Slab Heating and Cooling Systems Studied by Dynamic Computer Simulations. *Ashrae Transactions*. (2002), 698–707.
- [16] Olesen, B.W. et al. 2006. Dynamic evaluation of the cooling capacity of thermo-active building systems. *ASHRAE Transactions*. 112 PART 1, (2006), 350–357.
- [17] Olesen, B.W. 2007. Operation and control of thermally activated slab heating and cooling systems. *IAQVEC 2007 Proceedings – 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment*. 1, (2007), 1069–1076.
- [18] Olesen, B.W. 2012. Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal*. 54, 2 (2012), 44–52.
- [19] Porowski 2011. Sterowanie energoptymalne klimatyzacją sal operacyjnych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 3, (2011), 109–114.
- [20] Porowski 2011. Strategia energoptymalnego sterowania układu klimatyzacyjnego przy dopuszczalnych przedziałach tolerancji parametrów. 2, (2011), 69–75.
- [21] Ratajczak, K. et al. 2023. Recent Achievements in Research on Thermal Comfort and Ventilation in the Aspect of Providing People with Appropriate Conditions in Different Types of Buildings—Semi-Systematic Review. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 6254. 16, 17 (Aug. 2023), 6254. DOI:https://doi.org/10.3390/EN16176254.
- [22] Schmelas, M. et al. 2015. Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm. *Energy and Buildings*. 103, (Oct. 2015), 14–28. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.012.
- [23] Sinacka, J. et al. 2019. Wpływ profilu użytkownika pomieszczenia na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia w budynku ze stropami grzewczo-chłodzącymi. *Instal. nr 10*, (2019). DOI:https://doi.org/10.36119/15.2019.10.5.
- [24] Tödtli, J. et al. 2009. Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS). *Bauphysik*. 31, 5 (Oct. 2009), 319–325. DOI:https://doi.org/10.1002/BAPI.200910042.
- [25] Yu, T. et al. 2015. Experimental investigation of cooling performance of a novel HVAC system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS. *Energy and Buildings*. 105, (2015), 165–177. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.039.
- [26] Zeiler, W. and Boxem, G. 2009. Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*. 44, 11 (2009), 2308–2317. DOI:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.005.
- [27] Pałaszynska, K. et al. 2024. Czy dynamika TABS podąża za dynamiką planu zajęć? Badania pomiarowe i ankietowe w budynku typu nZEB. *CIEPŁOWNICTWO, OGRZEWNICTWO, WENTYLACJA*. 1, 1 (2024), 18–26. DOI:https://doi.org/10.15199/9.2024.1.4.