

-

mgr inż. Katarzyna PAŁASZYŃSKA

***Sterowanie energooszczędne systemami ogrzewania  
i chłodzenia ze stropami aktywowanymi termicznie  
współpracującymi z wentylacją w budynkach  
edukacyjnych***

Autoreferat

Rozprawy Doktorskiej

Promotor:

dr hab. inż. Mieczysław Porowski, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Karol Bandurski

Poznań, wrzesień 2024

1

## Spis treści

1. Wprowadzenie i geneza podjęcia badań .....	3
2. Problem badawczy, cel, zakres i tezy pracy .....	4
3. Struktura rozprawy doktorskiej .....	5
4. Struktura zagadnienia, algorytm ogólny .....	6
5. Metoda rozwiązania .....	9
6. Aplikacja metody rozwiązania zagadnienia współpracy systemu HVAC z TABS i wentylacji w budynku edukacyjnym .....	11
6.1. Model symulacyjny .....	11
6.1.1. Model geometryczny .....	12
6.1.2. Walidacja modelu .....	13
6.2. Krzywe grzania i chłodzenia metoda wyznaczenia .....	14
6.3. Wyniki symulacji, wybór wariantu energooszczędnego .....	17
7. Podsumowanie .....	19
Literatura .....	21

## 1. Wprowadzenie i geneza podjęcia badań

Dążenie do zwiększenia efektywności energetycznej, wynikające z zaostrzających się przepisów dotyczących zapotrzebowania na energię pierwotną [12], przyczynia się do wzrostu popularności systemów TABS (Thermally Activated Building Systems, Systemy Aktywacji Termicznej Konstrukcji Budynku). Mają one obiecujący potencjał w kontekście przyszłych trendów w budownictwie, zwłaszcza w obliczu coraz surowszych norm energetycznych dla budynków nisko i niemal zero energetycznych [2, 13]. Systemy te opierają się na niskotemperaturowych instalacjach grzewczych i wysokotemperaturowych instalacjach chłodniczych zintegrowanych z konstrukcją budynku, wykorzystując akumulację ciepła w przegrodach budowlanych w celu efektywnego ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń przy ograniczeniu zużycia energii i kosztów eksploatacji.

Dotychczasowe zastosowania systemów TABS skupiały się głównie na budynkach biurowych. Budynki edukacyjne, w których uczniowie spędzają znaczną część swojego czasu (nawet 6-8 godzin dziennie) [9], wymagają szczególnej troski o komfort termiczny i jakość powietrza [14, 16, 20]. Aktualnie obserwuje się coraz większą liczbę tego typu budynków wykonywanych z wykorzystaniem technologii aktywacji termicznej przegród budowlanych.

W obiektach biurowych i użyteczności publicznej parametry użytkowania są dość przewidywalne. W przypadku budynków edukacyjnych pojawiają się nowe wyzwania związane ze zmienną liczbą użytkowników i dynamicznymi obciążeniami termicznymi.

W porównaniu do budynków biurowych, gdzie liczba osób w pomieszczeniu jest stosunkowo stała (8-10 m<sup>2</sup>/osobę) i godziny ich przebywania są przewidywalne, w budynkach edukacyjnych obserwuje się:

1. **Dynamiczne zmiany liczby osób w pomieszczeniach:** gwałtowny wzrost obciążeń termicznych po wejściu dużej liczby osób (np. na lekcje, zajęcia).
2. **Zmienność wartości bezwzględnych obciążeń termicznych:** w przeciwieństwie do stosunkowo niskich i stabilnych wartości w budynkach biurowych, w budynkach edukacyjnych obciążenia termiczne ulegają znacznym fluktuacjom.

Systemy TABS bazujące na akumulacji ciepła w przegrodach/stropach nie są w stanie dynamicznie kompensować gwałtownych zmian obciążeń termicznych w krótkim czasie, co stanowi problem w przypadku budynków edukacyjnych.

Literatura naukowa jednoznacznie wskazuje na znaczenie komfortu termicznego dla procesu uczenia się. Badania dowodzą, że osoby uczące się preferują chłodniejsze otoczenie [4]. Ponadto w szkołach, gdzie systemy wentylacji są niedostateczne, stężenie ditlenku węgla często przekracza dopuszczalne normy i negatywnie wpływa na samopoczucie i efektywność uczniów. Brak odpowiedniej wentylacji może prowadzić do wysokiego stężenia zanieczyszczeń powietrza, takich jak lotne związki organiczne (LZO) czy pyły zawieszone, a to zwiększa ryzyko problemów zdrowotnych, takich jak astma czy inne schorzenia układu oddechowego. [1, 8, 14, 16].

Także wynik badań ankietowych i pomiarowych przeprowadzonych przez autorkę rozprawy i opisanych w [11] pokazują, że w analizowanym pomieszczeniu warunki nie są w pełni komfortowe, zwłaszcza na kolejnych zajęciach w ciągu dnia. W okresie grzewczym, gdy strop nie może przejść w tryb chłodzenia, system wentylacyjny zapewnia właściwą jakość powietrza, ale system grzewczo-chłodzący zapewnia odpowiednią temperaturę tylko w nocy, w przypadku braku użytkowników w pomieszczeniu. Po rozpoczęcia

zajęć, z uwagi na pojawiające się zyski ciepła temperatura w pomieszczeniu wzrasta powodując dyskomfort użytkowników.

Współpraca systemów TABS i wentylacji w budynkach edukacyjnych wymaga zatem uwzględnienia specyfiki obciążeń termicznych oraz wymagań w zakresie komfortu cieplnego i jakości powietrza w tego typu obiektach. Implementacja zaawansowanych strategii sterowania i integracja z systemami BMS może zapewnić efektywne działanie obu systemów, przyczyniając się do komfortu termicznego i jakości powietrza w pomieszczeniach oraz do obniżenia zapotrzebowania na energię przez budynek.

## **2. Problem badawczy, cel, zakres i tezy pracy**

W rozprawie szczegółowo przeanalizowano aktualny stan wiedzy nad systemami HVAC ze stropami aktywowanymi termicznie w szczególności w zakresie struktury układów i algorytmów sterowania.

Analiza wyników badań naukowych nad systemami HVAC z TABS pozwala – w odniesieniu do budynków edukacyjnych o dużych i dynamicznie zmieniających się obciążeniach chłodniczych – na sformułowanie następujących nierozwiązanych problemów:

### **1. Niedostateczne wytyczne dla algorytmów sterowania TABS:**

Metoda UBB [3] (*Unknown-But-Bounded* – nieznaną, ale ograniczoną [profil obciążeń]), będąca podstawą wielu strategii sterowania TABS, nie uwzględnia w pełni dynamiki obciążeń chłodniczych w budynkach o zróżnicowanym użytkowaniu, takich jak szkoły. W rezultacie metoda ta nie zapewnia optymalnego sterowania systemem TABS w kontekście bilansu obciążeń termicznych.

### **2. Brak zintegrowanego sterowania:**

Istniejące strategie sterowania koncentrują się oddzielnie na systemie TABS i systemie wentylacyjnym, pomijając możliwość integracji obu systemów w ramach nadrzędnego systemu HVAC. Brakuje opracowań uwzględniających współdziałanie tych systemów w celu efektywnego odprowadzania obciążeń termicznych.

### **3. Wykorzystanie powietrza wentylacyjnego:**

Potencjał wykorzystania powietrza wentylacyjnego do częściowego odprowadzania obciążeń termicznych, a zwłaszcza chłodniczych w systemach HVAC z TABS nie został w pełni zbadany. Brakuje szczegółowych analiz dotyczących wpływu strategii sterowania na efektywność energetyczną i komfort w pomieszczeniach.

**Problemem badawczym podjętym w rozprawie jest zatem sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia współpracy TABS i wentylacji do odprowadzenia obciążeń termicznych w systemach HVAC w budynkach o dużych i dynamicznie zmieniających się obciążeniach chłodniczych, zwłaszcza w budynkach edukacyjnych.**

**Celem naukowym rozprawy jest opracowanie metody wyznaczenia algorytmów sterowania systemem HVAC z TABS opartych na krzywych grzania i chłodzenia oraz wykorzystaniu powietrza wentylacyjnego do odprowadzenia części obciążeń termicznych dla pomieszczeń o dynamicznie zmieniających się w czasie wewnętrznych obciążeniach chłodniczych. Zakłada się przy tym, utrzymanie parametrów komfortu cieplnego w założonych przedziałach, przy minimalnych nakładach energetycznych**

**Celem użytkowym rozprawy jest opracowanie algorytmu energooszczędnego sterowania systemem HVAC z TABS (krzywych grzania i chłodzenia) w tym systemem wentylacyjnym (DCV, VAV) w**

## **budynkach o dużych i dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych na przykładzie pomieszczenia w budynku edukacyjnym.**

Na podstawie analizy literatury i postawionego problemu badawczego sformułowano następujące tezy:

### **Teza 1:**

Systemy TABS z wentylacją mechaniczną sterowaną w funkcji higienicznej i odprowadzania części obciążeń termicznych umożliwiają - dla budynków o dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych, stanowiących duży udział w bilansie obciążeń termicznych - uzyskanie mniejszych (węższych) przedziałów zmienności parametrów komfortu cieplnego, w stosunku do sterowania wentylacją mechaniczną tylko w funkcji higienicznej – w konsekwencji zapewniają lepszy komfort cieplny.

### **Teza 2:**

Dla systemów HVAC z TABS oraz wentylacją mechaniczną odprowadzającą część obciążeń termicznych można wyznaczyć energooszczędne algorytmy sterowania, w tym takie krzywe grzania i chłodzenia, dla których roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń termicznych jest minimalne.

## **3. Struktura rozprawy doktorskiej**

Rozprawa liczy 169 stron. Składa się z sześciu rozdziałów, w tym wprowadzenie oraz podsumowanie. Następnie przedstawiono literaturę oraz dwa załączniki do pracy.

Rozprawa obejmuje następujące zagadnienia:

### 1. Analiza literatury:

- Przegląd istniejących strategii sterowania systemem HVAC z TABS.
- Ocena możliwości wykorzystania powietrza wentylacyjnego do odprowadzania obciążeń termicznych.
- Identyfikacja luk badawczych w tej dziedzinie.

### 2. Badania ankietowe i pomiarowe:

- Przeprowadzenie ankiety wśród użytkowników budynków edukacyjnych w celu poznania ich oczekiwań co do komfortu cieplnego.
- Wykonanie pomiarów temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniach edukacyjnych.

### 3. Modelowanie symulacyjne:

- Opracowanie modelu symulacyjnego działania systemu HVAC z TABS w programie TRNSYS.
- Walidacja modelu symulacyjnego na podstawie pomiarów przeprowadzonych w budynku edukacyjnym.

### 4. Opracowanie metody sterowania:

- Opracowanie algorytmu wyznaczania energooszczędnych krzywych grzania i chłodzenia dla systemu HVAC z TABS.
- Określenie strategii wykorzystania powietrza wentylacyjnego do odprowadzania obciążeń termicznych.

### 5. Implementacja metody:

- Zastosowanie opracowanej metody sterowania do budynku edukacyjnego.
- Ocena efektywności energetycznej i komfortu cieplnego w budynku.

## 6. Podsumowanie

- Przedstawienie wniosków ogólnych oraz szczegółowych.
- Wykazano, iż założone cele rozprawy zostały zrealizowane a tezy pracy potwierdzone.

Na końcu przedstawiono literaturę, która składa się z 80 pozycji oraz załączniki.

W pierwszym załączniku przedstawiono szczegółowe wyniki badań ankietowych oraz pomiarowych przeprowadzonych w obiekcie badawczym.

Drugi załącznik to tabelaryczne zestawienie wariantów symulacji wraz z syntetycznym opisem przyjętych ustawień. Ogółem przeprowadzono 152 symulacje.

## 4. Struktura zagadnienia, algorytm ogólny

Schemat blokowy algorytmu ogólnego rozwiązania problemu badawczego przedstawiono na Rys. 1.

Przedstawia on kompleksowy model optymalizacji systemu HVAC z TABS oraz procedurę optymalizacyjną. Celem optymalizacji jest wyznaczenie sterowania energooszczędnego systemem HVAC z TABS przy dopuszczalnych przedziałach tolerancji parametrów komfortu cieplnego, które są tutaj ograniczeniami. W praktyce oznacza to znalezienie najlepszego kompromisu między zużyciem energii a zapewnieniem odpowiednich warunków cieplnych w pomieszczeniach edukacyjnych.

Model optymalizacji obejmuje:

- Model systemu HVAC z TABS opisany przez parametry stałe i zmienne decyzyjne,
- Ograniczenia (warunki ograniczające) - ustalono warunki ograniczające oraz dopuszczalne wartości dla parametrów, które muszą być spełnione w trakcie procedury optymalizacyjnej,
- Funkcję celu - kryterium optymalizacyjne, którym jest minimum rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń termicznych w pomieszczeniu.

Parametry stałe definiuje się jako parametry, które są niezmiennie w procedurze optymalizacyjnej, natomiast mogą być w ogólnym przypadku funkcjami czasu. Parametrami stałymi są m.in. parametry określające:

- funkcję użytkową – tutaj dopuszczalny przedział temperatury operatywnej<sup>1</sup>,
- izolacyjność termiczną budynku,
- obciążenia termiczne (cieplne i chłodnicze), w tym profile i harmonogramy tych obciążeń

Zmienne decyzyjne definiuje się jako parametry zmienne w procedurze optymalizacyjnej. W rozważanym przypadku – poszukiwania energooszczędnych algorytmów sterowania TABS - jako zmienne decyzyjne przyjęto zbiór krzywych grzania i chłodzenia (współczynników kierunkowych oraz par temperatur przełączenia trybu pracy stropu aktywowanego termicznie na funkcję grzania lub chłodzenia).

Procedura optymalizacyjna obejmuje – po określeniu modelu optymalizacji (w tym wyznaczeniu zbioru wariantów dopuszczalnych na podstawie warunków ograniczających) – wyznaczenie funkcji celu, czyli rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń termicznych

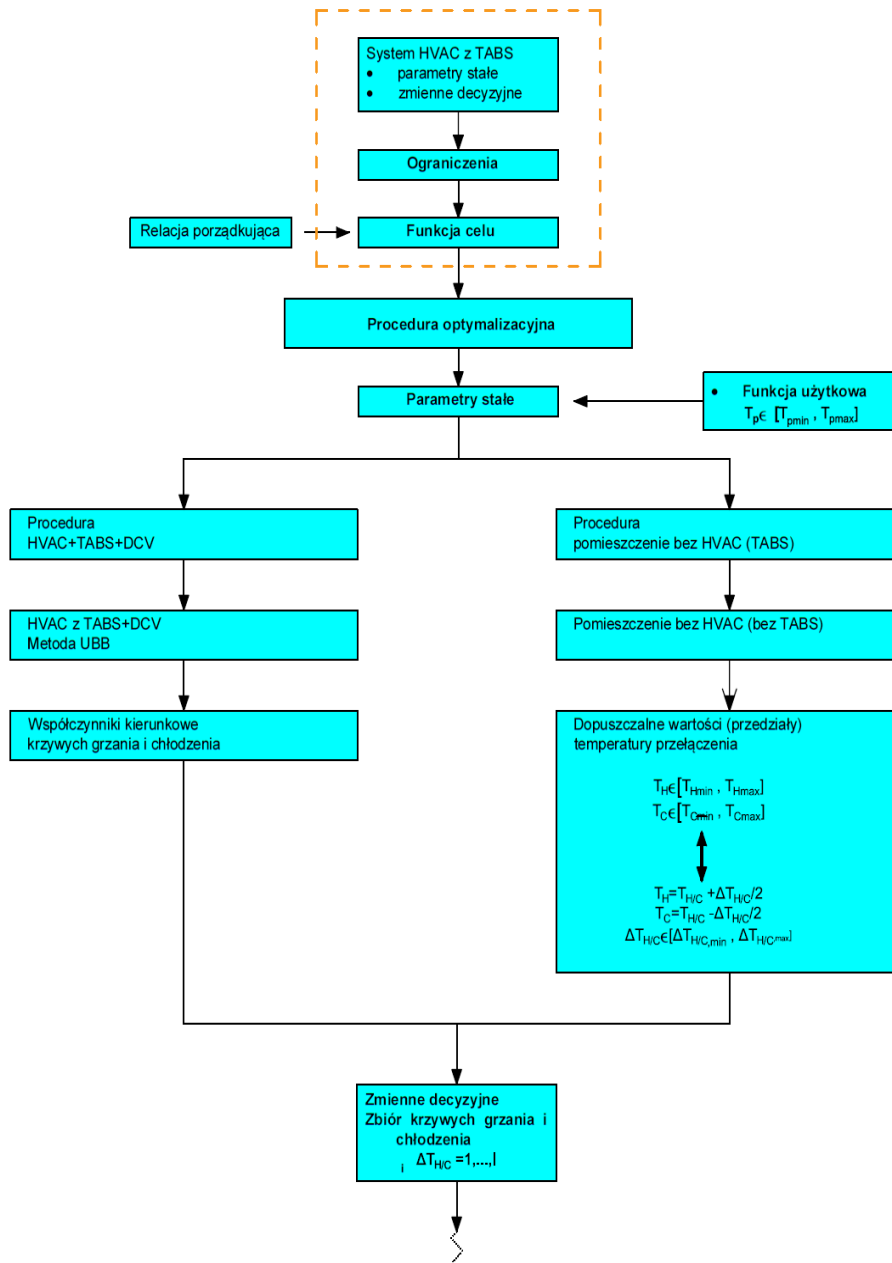
Narzędziem wyznaczenia funkcji celu są modele symulacyjne realizowane z wykorzystaniem programu TRNSYS17. Obliczenia są realizowane dwutorowo, uwzględniając zakres funkcji dla wentylacji we współpracy z TABS:

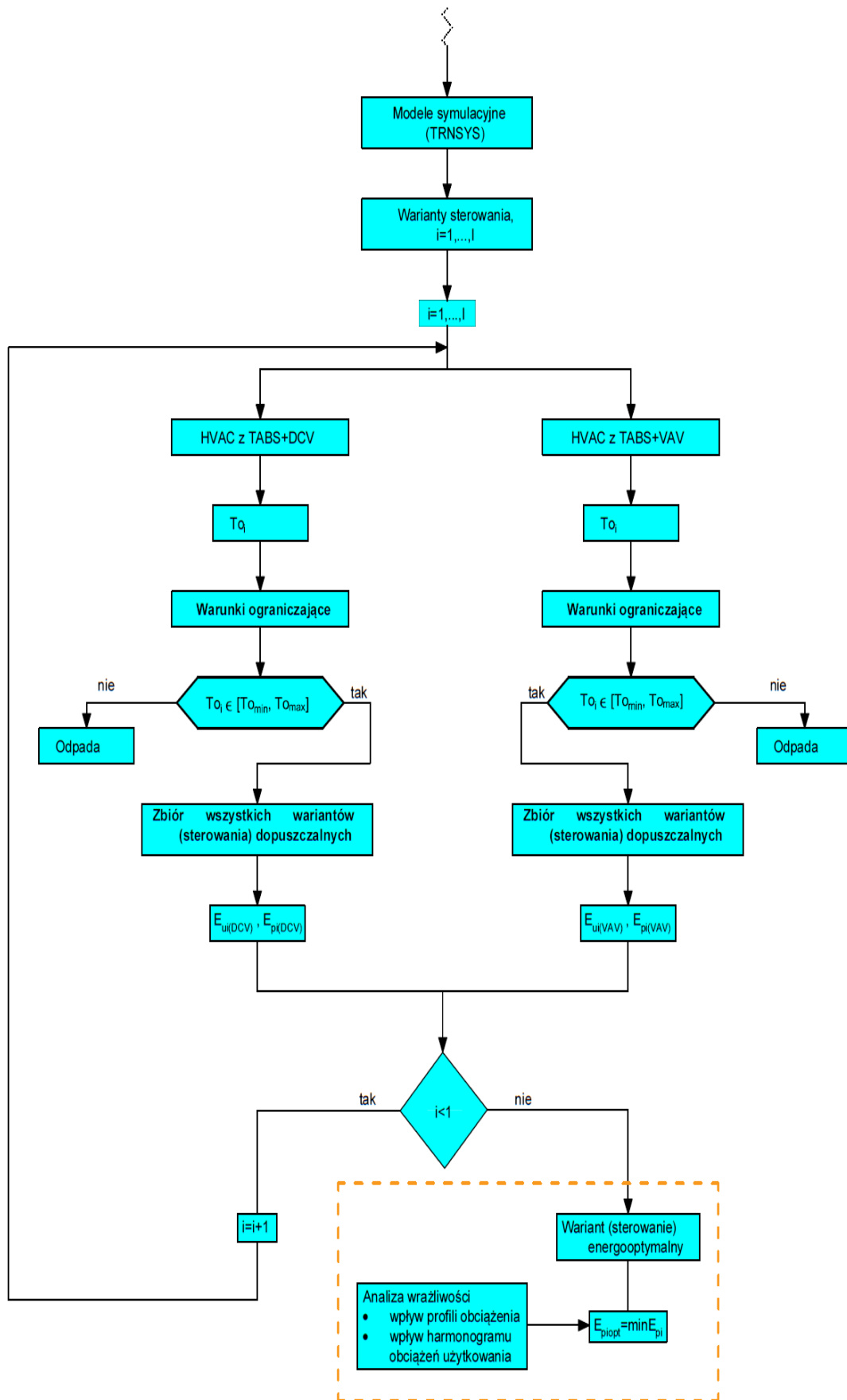
---

<sup>1</sup> Temperatura operatywna/odczuwalna [5] jest równa średniej z dwóch wartości: temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania (temperatura otaczających powierzchni).

- dla systemu HVAC z (TABS+DCV) -wentylacja tylko o funkcji higienicznej,
- dla systemu HVAC z (TABS+VAV) -wentylacja o funkcji higienicznej i częściowego odprowadzenia obciążeń termicznych

Oryginalnym i kluczowym elementem modelu symulacyjnego i procedury optymalizacyjnej jest tutaj wyznaczenie takich krzywych grzania i chłodzenia (takich współczynników kierunkowych i temperatur przełączenia), dla których zapotrzebowanie na energię pierwotną systemu HVAC z TABS+DCV lub VAV dla odprowadzenia obciążeń termicznych jest minimalne, przy założeniu dopuszczalnych przedziałów tolerancji parametrów komfortu cieplnego (tutaj temperatury operatywnej).





Rys. 1 Struktura zagadnienia energoptymalnego sterowania systemem HVAC z TABS



## 5. Metoda rozwiązania

Metoda rozwiązania przedstawionego zagadnienia energooszczędnego sterowania systemem HVAC z TABS oparta jest na metodzie UBB, w której modyfikuje się algorytm wyznaczania temperatur przełączenia dla grzania i chłodzenia (krzywych grzania i chłodzenia) według zaproponowanej oryginalnej procedury. Procedura ta polega na wyznaczeniu zbioru krzywych grzania i chłodzenia (zmiennych decyzyjnych) na podstawie hipotez badawczych, a następnie wyznaczenia funkcji celu (rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń). Sterowaniem energooszczędnym jest tutaj para krzywych grzania i chłodzenia dla której funkcja celu osiąga minimum. Krzywe grzania i chłodzenia określają temperatury przełączenia dla trybu grzania i chłodzenia oraz współczynniki kierunkowe prostych. Pośrednio parametrami są tutaj przedziały temperatury stanowiące różnicę między temperaturą przełączenia dla funkcji chłodzenia i funkcji grzania:

Narzędziem obliczeniowym jest model symulacyjny opracowany w programie TRNSYS17.

Modele symulacyjne uwzględniają różne warianty sterowania (oznaczone jako  $i=1, 2, \dots, 152$ ) systemem HVAC z TABS. Każdy wariant sterowania odpowiada określonej parze temperatur przełączenia trybu pracy systemu TABS i pośrednio parze krzywych grzania i chłodzenia.

W sytuacji, gdy występuje deficyt chłodu lub ciepła, w opcji HVAC z (TABS+VAV) wykorzystuje się system wentylacyjny w celu uzyskania parametrów funkcji użytkowej w określonym przedziale.

Wartości tych parametrów wyznacza się na podstawie modelu symulacyjnego, a dopuszczalny poziom przekroczenia wynosi 15% w ciągu roku.

Analogicznie postępujemy w przypadku współpracy systemu HVAC z (TABS+DCV).

W ten sposób powstaje zbiór dopuszczalnych wariantów sterowania. Dla elementów tego zbioru przeprowadza się obliczenia energii użytkowej oraz pierwotnej.

Oryginalnym elementem modeli symulacyjnych jest wyznaczenie zbioru dopuszczalnych krzywych grzania i chłodzenia – takich krzywych grzania i chłodzenia, dla których spełniona jest funkcja użytkowa (temperatura operatywna zawarta w dopuszczalnym przedziale). Krzywe grzania i chłodzenia wyznacza się w prezentowanej metodzie modyfikując algorytm wyznaczania temperatur przełączenia dla grzania i chłodzenia zaproponowany w metodzie UBB. Punktem wejścia jest tutaj sformułowanie definicji nowo wprowadzanych parametrów oraz sformułowanie hipotez badawczych.

Dla przedziału krzywej grzania określa się kres górny – **temperaturę przełączenia dla ogrzewania** –  $T_H$ : wartość temperatury powietrza zewnętrznego poniżej której wymagane jest ogrzewanie.

Dla przedziału krzywej chłodzenia określa się kres dolny – **temperaturę przełączenia dla chłodzenia** –  $T_C$ : wartość temperatury powietrza zewnętrznego powyżej której wymagane jest chłodzenie.

Dla tych dwóch parametrów można określić wartość **średnią temperatur przełączenia** -  $T_{H/C}$  i **różnicę temperatur przełączenia** -  $\Delta T_{H/C}$ .

Zakłada się symetryczną odległość  $T_H$  i  $T_C$  od  $T_{H/C}$ , co można zapisać za pomocą wzorów (5.1) i (5.2):

$$T_H = T_{H/C} + \Delta T_{H/C} \quad (5.1)$$

$$T_C = T_{H/C} - \Delta T_{H/C} \quad (5.2)$$

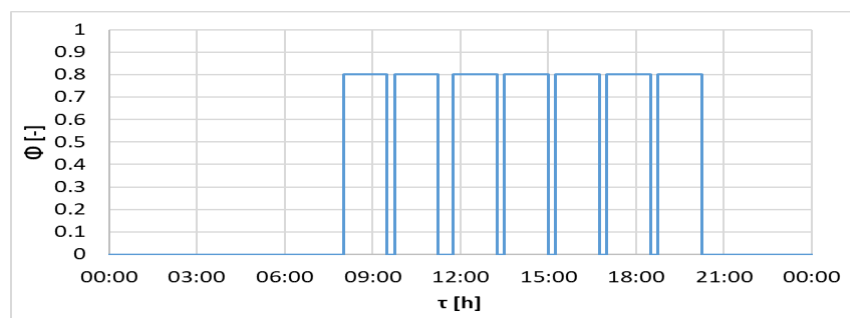
Przedział temperatury powietrza zewnętrznego pomiędzy temperaturą przełączenia dla chłodzenia (wartość większa), a temperaturą przełączenia dla ogrzewania (wartość mniejsza) określa się jako przedział **neutralny** ( $T_H$ ,  $T_C$ ) – w tym przedziale nie jest realizowane ani chłodzenie, ani ogrzewanie.

Formułuje się cztery hipotezy badawcze:

### Hipoteza I:

Przedział neutralny ( $T_H$ ,  $T_C$ ) temperatury powietrza zewnętrznego można wyznaczyć na podstawie symulacji rocznych bilansów obciążeń termicznych i odprowadzenia tych obciążeń (bilansów energii) dla pomieszczenia i dwóch stanów działania:

- **Stan 1**, założenia:
  - nie działa system HVAC,
  - harmonogram użytkowania: 8:00-20:00 (Rys. 2),
  - wartość obciążeń: **max. - 100%**



Rys. 2 Harmonogram użytkowania 8:00-20:00

### Hipoteza II:

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego dla **stanu 1**, poniżej której wynikowa temperatura odczuwalna w pomieszczeniu jest niższa od wymaganej minimalnej temperatury odczuwalnej ( $+22^{\circ}\text{C}$ ) jest **minimalną** wartością temperatury przełączenia dla **ogrzewania** -  $T_{Hmin}$

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego dla **stanu 1**, powyżej której wynikowa temperatura odczuwalna w pomieszczeniu jest wyższa od wymaganej maksymalnej temperatury odczuwalnej ( $+25^{\circ}\text{C}$ ), jest **maksymalną** wartością temperatury przełączenia dla **chłodzenia** -  $T_{Cmax}$

Uzasadnienie:

- Analiza dotyczy stanu, w którym funkcja ogrzewania ograniczona jest do minimum (czasowo i wartościowo), a funkcja chłodzenia realizowana jest w zakresie maksymalnym (czasowo i wartościowo), ponieważ obciążenia wewnętrznymi zyskami ciepła w pomieszczeniu są maksymalne.
- Zastosowanie dowolnego systemu HVAC spowoduje wynikowo poszerzenie przedziału neutralnego ( $T_H$ ,  $T_C$ ): zmniejszenie wartości temperatury przełączenia dla ogrzewania  $T_H$  i zwiększenie wartości temperatury przełączenia dla chłodzenia  $T_C$ .

Komentarz:

Wartość wynikowej temperatury przełączenia dla ogrzewania  $t_g$  i chłodzenia  $t_c$  wynika (dla przyjętych pozostałych założeń) tylko z akumulacyjności przegród budowlanych pomieszczenia.

- **Stan 2**, założenia:
  - nie działa system HVAC,
  - harmonogram użytkowania: 8:00-20:00,
  - wartość obciążeń: **około 0%** (wartość eksploatacyjnie założona i uzasadniona)

### Hipoteza III:

Sterowanie energooszczędne współpracą systemów stropów aktywowanych termicznie i wentylacji dla odprowadzenia obciążeń termicznych w budynkach edukacyjnych.

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego dla **stanu 2**, poniżej której wynikowa temperatura odczuwalna w pomieszczeniu jest niższa od wymaganej minimalnej temperatury odczuwalnej (+22°C) jest **maksymalną** wartością temperatury przełączenia **dla ogrzewania** -  $t_{gmax}$

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego dla **stanu 2**, powyżej której wynikowa temperatura odczuwalna w pomieszczeniu jest wyższa od wymaganej maksymalnej temperatury odczuwalnej (+25°C), jest **minimalną** wartością temperatury przełączenia **dla chłodzenia** -  $t_{cmin}$

Uzasadnienie:

- Analiza dotyczy stanu, w którym funkcja ogrzewania realizowana jest w zakresie maksymalnym (czasowo i wartościowo), a funkcja chłodzenia ograniczona jest do minimum (czasowo i wartościowo), ponieważ obciążenia wewnętrznymi zyskami ciepła w pomieszczeniu są minimalne.
- Zastosowanie dowolnego systemu HVAC spowoduje wynikowo poszerzenie przedziału neutralnego ( $T_H$ ,  $T_C$ ): zmniejszenie wartości temperatury przełączenia dla ogrzewania  $T_H$  i zwiększenie wartości temperatury przełączenia dla chłodzenia  $T_C$ .

Komentarz:

Wartość wynikowej temperatury przełączenia dla ogrzewania  $T_H$  i chłodzenia  $T_C$  wynika (dla przyjętych pozostałych założeń) tylko z akumulacyjności przegród budowlanych pomieszczenia

#### Hipoteza IV:

Dopuszczalne wartości temperatury przełączenia dla ogrzewania mieszczą się w przedziale  $T_{Hdop} \in (T_{Hmin}, T_{Hmax})$ , natomiast dopuszczalne wartości temperatury przełączenia dla chłodzenia mieszczą się w przedziale  $T_{C,dop} \in (T_{Cmin}, T_{Cmax})$ .

## 6. Aplikacja metody rozwiązania zagadnienia współpracy systemu HVAC z TABS i wentylacji w budynku edukacyjnym

W analizie wykorzystano program TRNSYS17, który umożliwia dynamiczną analizę systemów energetycznych, w tym budynków. Jest on powszechnie znanym narzędziem, szeroko stosowanym w pracach naukowych oraz badawczo-rozwojowych.

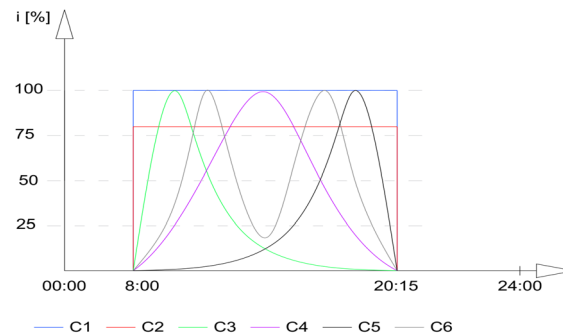
Model budynku w TRNSYS 17 wyposażono w bardzo dokładny moduł analizy promieniowania słonecznego i zaawansowane modelowanie promieniowania długofalowego między powierzchniami wewnętrznymi oparte na współczynnikach konfiguracji. Uwzględniono również model wymiany ciepła na drodze konwekcji, który bierze pod uwagę różnicę temperatur między powierzchnią a powietrzem oraz kierunek przepływu ciepła dla powierzchni wewnętrznych.

Program posiada wbudowany model przegród aktywowanych termicznie. Pomimo że model jest dwuwymiarowy, uwzględnia nieliniowy spadek temperatury czynnika roboczego w przewodach. [7, 18]

### 6.1. Model symulacyjny

Przedmiotem analizy jest pojedyncze pomieszczenie dydaktyczne z osłoną bilansową. Opracowany model uwzględnia wpływ różnych warunków otoczenia, orientacji ścian zewnętrznych oraz dwa warianty pracy wentylacji: DCV (Demand-Controlled Ventilation – wentylacja sterowana zapotrzebowaniem) i VAV (Variable Air Volume – wentylacja o zmiennym strumieniu powietrza).

Założono sześć wariantów harmonogramów użytkowania pomieszczenia (Rys. 3), w których średnie dobowe obciążenie pomieszczenia stanowi 80% maksymalnej wartości. Przyjęte harmonogramy różnią się godzinami występowania maksymalnych obciążeń wewnętrznych od ludzi.



Rys. 3 Warianty symulacji obciążeń

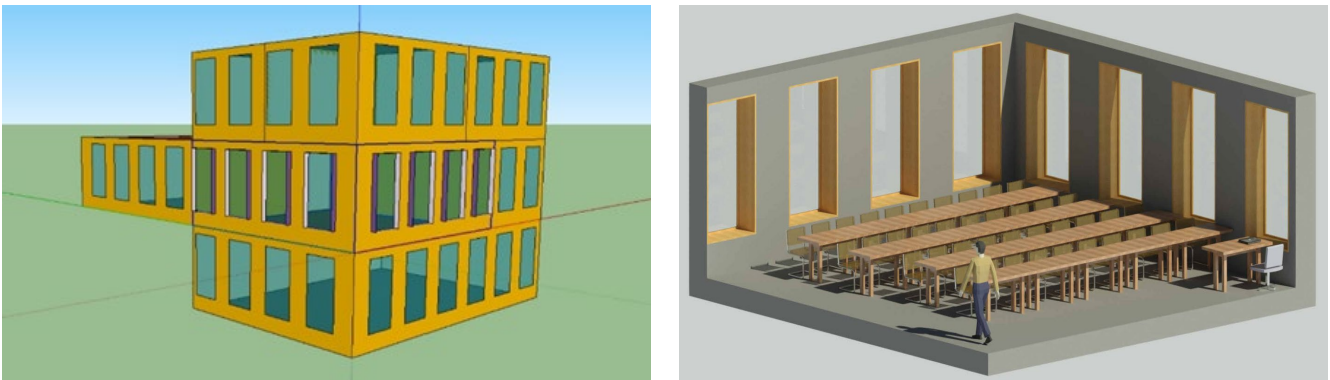
Gdzie:

- C1 – obciążenie maksymalne, stałe w godzinach 8:00-20:15
- C2 – obciążenie 80%, stałe w godzinach 8:00-20:15
- C3 - rozkład prawostronny, szczyt w godzinach 8:00-11:15
- C4- rozkład normalny, szczyt w godzinach 11:45-15:00
- C5 - rozkład lewostronny, szczyt w godzinach 15:15- 18:30
- C6 - rozkład bimodalny, dwa szczyty w godzinach 9:45-11:15 i 15:15-16:45

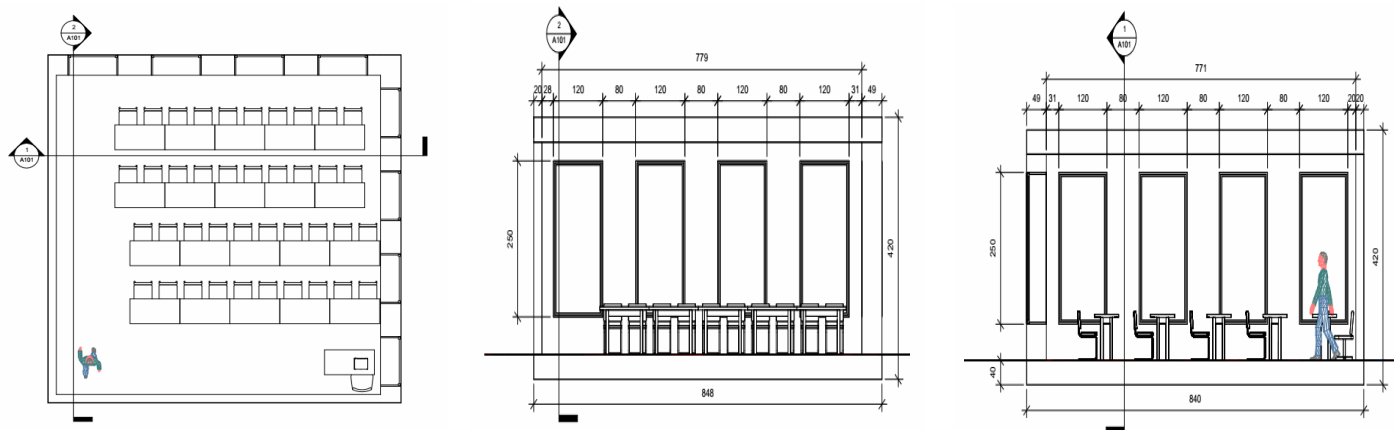
#### 6.1.1. Model geometryczny

Utworzono komputerowy model sali dydaktyczno-wykładowej zlokalizowanej w budynku Wydziału Architektury i Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej.

Graficzne zobrazowanie modelu 3D wprowadzonego do programu TRNSYS17 przedstawiają Rys. 4 i Rys. 5. Model ten uwzględnia, poza analizowanym pomieszczeniem, wszystkie przestrzenie sąsiadujące z nim. Łącznie jest to osiem stref.



Rys. 4 Model pomieszczenia (3D)



Rys. 5 Rzut i przekroje geometrii modelu

Główne parametry fizyczne istniejącego pomieszczenia dydaktycznego oraz modelu zostały zestawione w Tab 6.1.

Tab. 6.1 Porównanie parametrów fizycznych w obiekcie istniejącym oraz w modelu

Parametr	Jednostka	Istniejące pomieszczenie	Model
Orientacja		NE;	NE; SW
Powierzchnia	$m^2$	62,45	67,9
Wysokość	$m$	3,3	3,3
Kubatura	$m^3$	206,09	230,85
Powierzchnia ściany zewnętrznej		52,89	56,03
Współczynnik przenikania ciepła przez ścianę zewnętrzną	$W/m^2K$	0,14	0,133
Liczba okien		8	8
Powierzchnia pojedynczego okna	$m^2$	3	3
Powierzchnia okien	$m^2$	24	24
Powierzchnia ściany zewnętrznej pomniejszona o powierzchnię okien	$m^2$	28,89	32,03
Współczynnik przenikania ciepła przez okno	$W/m^2K$	0,8	0,76
Współczynnik całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego		0,53	0,585

Przegrodą podlegającą aktywacji jest strop pomiędzy kondygnacjami. Jego wysokość to 30cm. Na głębokości 15cm znajdują się przewody, w których przepływa czynnik. Czynnikiem grzewczo– chłodzącym jest woda. Wartość strumienia wody przepływającej w SGC przyjęto, według dokumentacji technicznej (Projekt Wykonawczy) odpowiedniej dla wzorcowego pomieszczenia i wynosi ona 10,5kg/h/m<sup>2</sup>.

### 6.1.2. Walidacja modelu

Na podstawie danych pozyskanych z systemu BMS (Building Management System, System zarządzania budynkiem) wykonano walidację modelu obliczeniowego. W tym celu do programu TRNSYS17 wprowadzono dane:

- Type 99 (Data Reader and Radiation Processor , odczyt danych i obliczenia promieniowania) - wprowadzono dane meteorologiczne pobrane na terenie kampusu Politechniki Poznańskiej przy wykorzystaniu CMP6 Pyranometer: temperatura powietrza zewnętrznego, wilgotność względna powietrza, promieniowanie całkowite i rozproszone [6]

- Type 62, (TRNSYS / Excel Coupling, Współpraca pomiędzy programami TRNSYS/Excel), wykorzystano dane pochodzące z systemu BMS w modułach:

- HVAC z TABS - Temperatura nastawy powietrza wentylacyjnego i strumień, temperatura wody zasilającej TABS oraz strumień
- WINDOW – stopień zacielenia okien

Te dane wprowadzono do Typu 56 będącego narzędziem do symulacji wielostrefowych budynków.

Dane wykorzystane do walidacji pochodzą z lutego 2021, był to okres pandemii SARS-COV19 i budynek w tym okresie pozostawał przez większość czasu pusty, jednakże okresowo zarejestrowano obecność ludzi w pomieszczeniu.

Z uwagi na brak szczegółowych informacji dotyczących liczby osób przyjęto, że liczba ta będzie stanowiła iloraz strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wartości jednostkowego strumienia powietrza przyjętego w projekcie dla wentylacji higienicznej. Analizy wykonano dla dwóch wariantów:

- bez uwzględnienia obciążeń wewnętrznych,
- z uwzględnieniem obciążeń wewnętrznych.

Model obliczeniowy wykazuje mniej gwałtowne zmiany temperatury powietrza i operatywnej w porównaniu do rzeczywistych danych. Rzeczywista temperatura powietrza w pomieszczeniu pokazuje większe i częstsze fluktuacje.

Wynika to z dynamicznych warunków środowiskowych oraz zewnętrznych czynników, których model nie uwzględnia w pełni, gdyż brak w nim informacji o temperaturach w sąsiednich pomieszczeniach, wielkości ewentualnych zysków ciepła w analizowanym pomieszczeniu oraz faktycznym promieniowaniu słonecznym padającym na ściany zewnętrzne.

Model uwzględniający obciążenia wewnętrzne lepiej odwzorowuje rzeczywiste warunki, jest to widoczne w mniejszych różnicach między przewidywanymi, a rzeczywistymi temperaturami powietrza.

Wynik walidacji modelu obliczeniowego można uznać za pozytywny, ponieważ zmiany temperatury powietrza w pomieszczeniu są dobrze odwzorowane. Występują różnice w amplitudzie i częstotliwości fluktuacji, ale ogólny przebieg jest zbieżny z rzeczywistymi danymi.

## 6.2. Krzywe grzania i chłodzenia metoda wyznaczenia

Krzywe grzania i chłodzenia są wyznaczone w oparciu o metodę UBB [3, 17].

Zestawienie współczynników kierunkowych dla krzywych grzania i chłodzenia przedstawiono w *Tab. 6.2* i *Tab. 6.3*.

*Tab. 6.2 Współczynniki kierunkowe krzywych grzania i chłodzenia dla pomieszczenia o orientacji NE*

Obciążenie	$y=ax+b$	Tryb	a	x	b
80%	$T_{sw\_80\%}$	Chłodzenie (C)	-0,0733	$T_{ex}$	20,709
		Grzanie (H)	-0,0852	$T_{ex}$	22,789

*Tab. 6.3 Współczynniki kierunkowe krzywych grzania i chłodzenia dla pomieszczenia orientacji SW*

Obciążenie	$y=ax+b$	Tryb	a	x	b
80%	$T_{sw\_80\%}$	Chłodzenie (C)	-0,0733	$T_{ex}$	20,016
		Grzanie (H)	-0,0852	$T_{ex}$	22,922

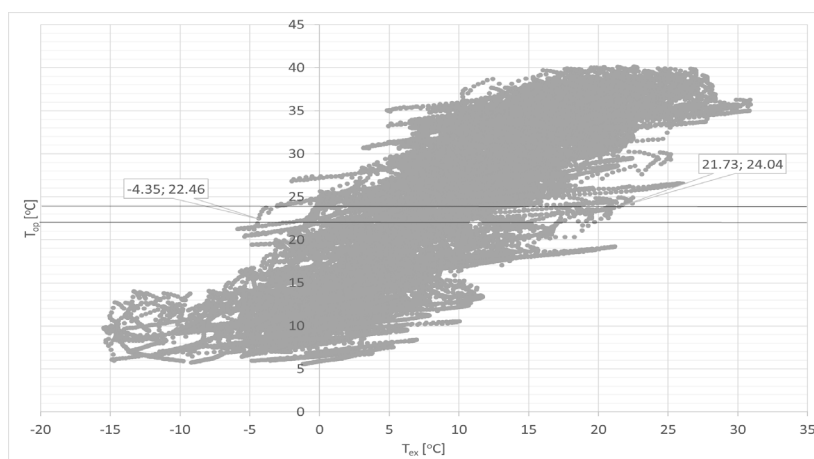
**Temperatura przełączenia, jest to wartość temperatury powietrza zewnętrznego po osiągnięciu której następuje zmiana trybu pracy stropu grzewczo chłodzącego pomiędzy grzaniem, pauzą i chłodzeniem.**

Wyznaczając, w oparciu o metodę Unknown-But-Bounded, temperaturę rozpoczęcia trybu chłodzenia w wariantach z dużym obciążeniem (powyżej 60%) znajduje się ona poniżej temperatury zakończenia trybu grzania, dlatego nie można wyznaczyć temperatury przełączenia trybu pracy TABS.

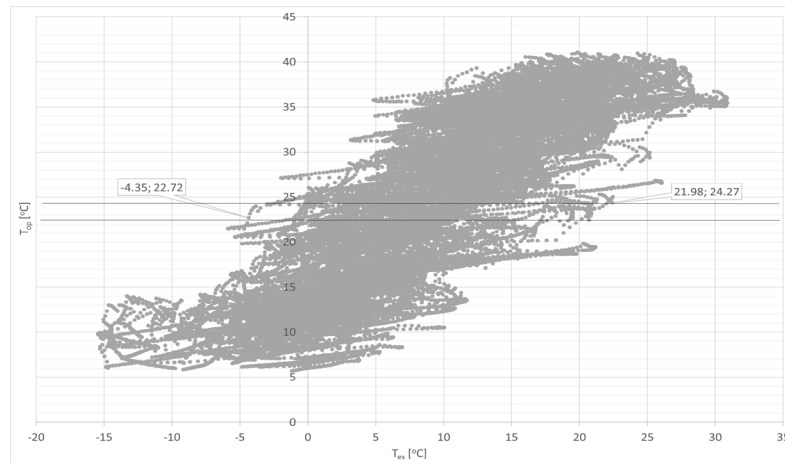
Metoda UBB dedykowana jest dla przypadków, w których wewnętrzne obciążenia chłodnicze nie zmieniają się w szerokim przedziale. W przypadku budynków edukacyjnych o dużych i dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych (dużych różnicach między obciążeniem minimalnym i maksymalnym), metoda UBB nie daje możliwości wyznaczenia temperatury przełączenia trybu działania stropu (grzanie-pauza - chłodzenie). W związku z brakiem możliwości wyznaczenia temperatury przełączenia w oparciu o algorytm metody UBB, proponuje się autorskie rozwiązanie. Kroki postępowania:

**Wyznaczenie temperatury przełączenia trybu działania TABS na podstawie zbioru przyporządkowanych wartości temperatury**

1. Symulacja obciążeń termicznych pomieszczenia w ciągu całego roku, przy założeniu wyłączonego 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 funkcji temperatury powietrza zewnętrznego ( $T_e$ ) – wynikowo w formie chmury punktów w układzie współrzędnych  $T_{op} = f(T_e)$ .
3. Wyznaczenie kresów dolnych -  $T_{e,min}$  i kresów górnych -  $T_{e,max}$  przedziałów temperatury powietrza zewnętrznego  $T_e$  w obszarze chmury punktów  $T_{op} = f(T_e)$ , dla  $T_{op}$  w przedziale oczekiwanej temperatury odczuwalnej (22, 24)°C.
4. Na podstawie otrzymanej chmury punktów (Rys. 6, Rys. 7) dla oczekiwanego przedziału temperatury odczuwalnej (22÷24 °C) określenie odpowiadającej mu średniej temperatury zewnętrznej  $T_{e,śr}$ .



Rys. 6 Zbiór punktów temperatury dla wariantu 80% obciążenia w pomieszczeniu o orientacji NE



Rys. 7 Zbiór punktów temperatury dla wariantu 80% obciążenia w pomieszczeniu o orientacji SW

5. Utworzenie zbioru par parametrów: temperatury przełączenia dla grzania –  $T_H$  i chłodzenia –  $T_C$  z przedziału  $(T_{\min}, T_{\max})$  – wynikowo  $T_H, T_C \in (T_{\min}, T_{\max})$ .

Szerokość przedziału wyłączenia stropu (pauzy)  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ . Obliczeniowo definiuje się we wzorach (6.1) i (6.2):

$$T_{e,H} = T_{e,\text{sr}} - \Delta T \quad (6.1)$$

$$T_{e,C} = T_{e,\text{sr}} + \Delta T \quad (6.2)$$

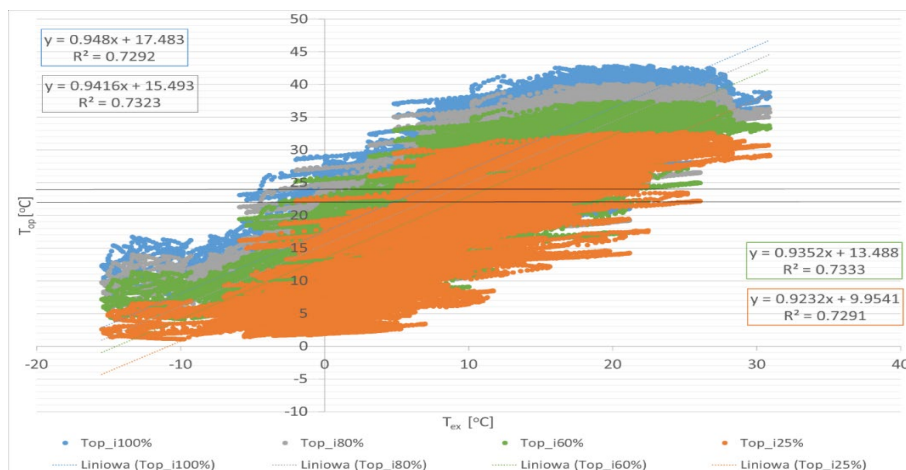
Pauza w działaniu wynosi  $2\Delta T$ .

#### **Wyznaczenie temperatury przełączenia trybu działania TABS na podstawie równania aproksymującego zbiór temperatur**

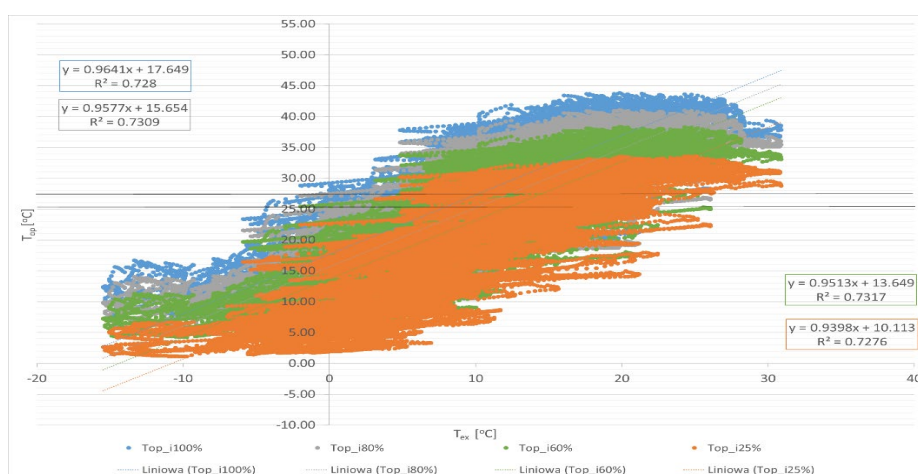
Kroki postępowania:

1. Symulacja obciążeń termicznych pomieszczenia w ciągu całego roku przy założeniu wyłączonego 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 funkcji temperatury powietrza zewnętrznego ( $T_e$ ) – wynikowo w formie chmury punktów (Rys. 8, Rys. 9) w układzie współrzędnych  $T_{op} = f(T_e)$ .
3. Na podstawie otrzymanej chmury punktów wyznacza się równanie aproksymujące zbiór i dla oczekiwanego przedziału temperatury odczuwalnej (przedział tolerancji:  $22 \div 24^\circ\text{C}$ ), wyznacza się wartości temperatury powietrza zewnętrznego, przy których wartość temperatury operatywnej osiąga minimalną i maksymalną wartość założonej temperatury komfortu.





Rys. 8 Aproksymacja zbioru punktów dla pomieszczenia o orientacji NE z różnymi poziomami obciążenia



Rys. 9 Aproksymacja zbioru punktów dla pomieszczenia o orientacji SW z różnymi poziomami obciążenia

4. Wartości temperatury powietrza zewnętrznego, przy których równanie aproksymujące osiąga wartości temperatury operatywnej równej końcom przedziału tolerancji, stanowią temperatury przełączenia dla trybu grzania i chłodzenia.

### 6.3. Wyniki symulacji, wybór wariantu energoptymalnego

Analiza obejmowała różne scenariusze pracy systemu wentylacyjnego dla pomieszczeń o orientacji NE oraz SW, uwzględniając różne wartości  $\Delta T_{H/C}$  oraz rodzaje (DCV, VAV) i tryby działania wentylacji:

- **Warianty A:** Wentylacja działająca w godzinach 8:00 - 20:15;
- **Warianty B:** Wentylacja działająca tylko podczas obecności ludzi;
- **0:** Brak kontroli temperatury w pomieszczeniach sąsiednich;
- **1:** Temperatura w pomieszczeniach sąsiednich utrzymywana w przedziale 22-24°C;

Wykonano 152 symulacje. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono zbiór wariantów dopuszczalnych (Tab. 6.4 Tab. 6.5), czyli takich, które wykazują minimalne zużycie energii przy jednoczesnym utrzymaniu komfortu przez wymagany procent czasu – minimum 85%.

Najpierw przeprowadzono analizy dla systemu HVAC z (TABS+DCV). W żadnym z rozważanych scenariuszy nie otrzymano zadowalającej długości czasu, gdy temperatura w pomieszczeniu utrzymywała się w

przedziale komfortowym. Najdłużej oczekiwany przedział temperatury operatywnej utrzymywał się przez 14% czasu. Przez około 80% całkowitego czasu, pomieszczenia pozostawały przegrzane.

Następnie przeprowadzono analizy dla systemu HVAC z (TABS+VAV). Otrzymane wyniki badań symulacyjnych potwierdziły, że sterowanie systemem HVAC z (TABS+VAV) z wykorzystaniem wyznaczonych dopuszczalnych krzywych grzania i chłodzenia pozwala na znaczną redukcję czasu przechłodzenia lub przegrzania pomieszczenia, oraz eliminację gwałtownych zmian temperatury. Czas, w którym temperatura operatywna mieści się w przedziale komfortowym wynosi nawet 94%.

Tab. 6.4 Warianty systemu wentylacyjnego spełniające kryteria minimalnego zapotrzebowania na energię pierwotną (Ep) i utrzymania komfortu temperaturowego (Top ∈ [22, 24]) przez co najmniej 85% czasu. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych, dla różnych warunków pracy, harmonogram C2

	VAV_NE_A_1_C2		VAV_NE_A_0_C2		VAV_NE_B_1_C2		VAV_NE_B_0_C2		VAV_SW_A_1_C2		VAV_SW_A_0_C2		VAV_SW_B_1_C2		VAV_SW_B_0_C2	
	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	V Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]
ΔT <sub>H/C</sub> =0	230	92%	248	94%	230	92%	248	94%	231	89%	249	91%	231	89%	249	91%
ΔT <sub>H/C</sub> =1	225	91%	242	93%	225	91%	242	93%	226	87%	243	90%	227	87%	243	90%
ΔT <sub>H/C</sub> =2	<b>224</b>	<b>89%</b>	<b>240</b>	<b>93%</b>	<b>224</b>	<b>89%</b>	<b>240</b>	<b>93%</b>	<b>225</b>	<b>85%</b>	<b>241</b>	<b>89%</b>	<b>226</b>	<b>85%</b>	<b>241</b>	<b>89%</b>
ΔT <sub>H/C</sub> =3	244	88%	237	92%	224	88%	237	92%	-	-	239	88%	-	-	239	88%
ΔT <sub>H/C</sub> =4	226	85%	237	91%	226	85%	237	91%	-	-	239	87%	-	-	239	87%
ΔT <sub>H/C</sub> =5	-	-	239	88%	-	-	239	88%	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T <sub>av</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	224	89%	241	91%	224	89%	241	91%

Tab. 6.5 Warianty systemu wentylacyjnego spełniające kryteria minimalnego zapotrzebowania na energię pierwotną (Ep) i utrzymania komfortu temperaturowego (Top ∈ [22, 24]) przez co najmniej 85% czasu. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych, dla różnych wariantów harmonogramu obciążeń

	VAV_SW_B_0_C3		VAV_SW_B_0_C4		VAV_SW_B_0_C5		VAV_SW_B_0_C6	
	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	V Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]	Ep [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Top ∈ [22, 24]
ΔT <sub>H/C</sub> =0	248	92%	251	89%	249	89%	251	90%
ΔT <sub>H/C</sub> =1	242	91%	245	88%	243	89%	245	90%
ΔT <sub>H/C</sub> =2	240	90%	243	87%	241	87%	243	88%
ΔT <sub>H/C</sub> =3	238	90%	241	86%	239	87%	241	88%
ΔT <sub>H/C</sub> =4	238	88%	251	85%	239	85%	240	86%
ΔT <sub>H/C</sub> =5	248	85%	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =6	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =9	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =12	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔT <sub>H/C</sub> =∞	-	-	-	-	-	-	-	-
T <sub>av</sub>	240	93%	243	89%	241	90%	243	91%

Minimalnym zapotrzebowaniem na energię pierwotną oraz wysokim procentowym czasem utrzymania komfortu temperaturowego wspólnym dla wszystkich analizowanych scenariuszy jest wariant ΔT<sub>H/C</sub>=2K. Może

stanowić rozwiązanie uniwersalne, pozwalające na utrzymanie wysokiego komfortu przy dość niskim zapotrzebowaniu na energię (o 3% niższym niż w wariancie z najwyższym zapotrzebowaniem Ep).

Analiza wykonana dla harmonogramu ze stałym obciążeniem w ciągu dnia wykazała, że w przypadku orientacji południowo-zachodniej, dla wariantu T\_av otrzymuje się niższe zapotrzebowanie na energię pierwotną (różnica nie przekracza 1%) i dłuższy o około 3 punkty procentowe czas utrzymywania się komfortowych warunków w pomieszczeniu niż w przypadku,  $\Delta T_{H/C}=2$ , ale dla orientacji północno-wschodniej takie podejście do wyznaczenia temperatury zmiany trybu pracy stropu nie mieści się w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych.

Chociaż wariant T\_av może wykazywać przewagę w określonych scenariuszach, takich jak orientacja południowo-zachodnia, jego skuteczność nie jest uniwersalna, a zatem nie zawsze będzie najlepszym wyborem.

Przeprowadzona analiza wrażliwości (Tab. 6.5) zastosowanego podejścia na zmienne obciążenia wewnętrzne występujące w pomieszczeniu wykazała, że na zapotrzebowanie na energię pierwotną dominujący wpływ ma wartość różnicy temperatury przełączenia, a nie zmienność obciążeń. Podobny wniosek można wyciągnąć dla analizy warunków komfortu w pomieszczeniu.

Wykazano, iż opracowany algorytm sterowania umożliwia kontrolowanie temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach z uwzględnieniem dynamicznych zmian obciążenia wewnętrznego. Dzięki czemu systemy HVAC z (TABS+VAV), w których wentylacja odprowadza część obciążeń termicznych mogą w bardziej efektywny sposób reagować na zmiany warunków, co przekłada się na lepszy komfort wewnętrzny.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono ponadto, iż dla sterowania optymalnego (optymalnej pary krzywych grzania i chłodzenia) zapotrzebowanie na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń termicznych (funkcja celu) jest mniejsze o 3÷5% w stosunku do pozostałych sterowań dopuszczalnych, w zależności od przyjętego wariantu przełączenia trybu pracy stropu aktywowanego termicznie.

Wykazano również, że nie istnieje jedno optymalne sterowanie (para krzywych grzania i chłodzenia) odpowiednie dla całego budynku, ale opracowana metoda pozwala na wyznaczenie sterowań optymalnych indywidualnie dla poszczególnych stref budynku.

## 7. Podsumowanie

Zastosowane w rozprawie narzędzia badawcze obejmowały:

- modele symulacyjny z wykorzystaniem narzędzia TRNSYS17 dla całorocznych symulacji działania systemów HVAC z (TABS +DCV) lub HVAC z (TABS +VAV),
- badania ankietowe wykonane w istniejącym budynku edukacyjnym w celu identyfikacji i uzasadnienia podjęcia problemu badawczego,
- rejestrację i analizę danych empirycznych, z BMS (Building Management System) oraz czujników NEMo XT Mini (Ethera, Francja) w istniejącym budynku edukacyjnym z systemem HVAC z TABS+DCV, które następnie wykorzystano do walidacji algorytmów modeli symulacyjnych

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

### 1. Tezy zostały udowodnione:

**Teza 1** zakładała, iż systemy TABS z wentylacją mechaniczną sterowaną w funkcji higienicznej i odprowadzania części obciążeń termicznych umożliwiają - dla budynków o dynamicznie zmieniających się wewnętrznych obciążeniach chłodniczych, stanowiących duży udział w bilansie obciążeń termicznych - uzyskanie mniejszych (węższych) przedziałów zmienności parametrów komfortu

ciepłego, w stosunku do sterowania wentylacją mechaniczną tylko w funkcji higienicznej – w konsekwencji zapewniają lepszy komfort cieplny

- **wykazano, na podstawie wyników badań symulacyjnych, iż system HVAC z (TABS+DCV) nie mieści się w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych.**
- **badania symulacyjne potwierdziły, że systemy HVAC z (TABS+VAV), pozwalają na uzyskanie bardziej stabilnych warunków komfortu cieplnego w budynkach o dynamicznie zmieniających się obciążeniach wewnętrznych- uzyskanie mniejszych (węższych) przedziałów zmienności parametrów komfortu cieplnego (temperatury operatywnej), w stosunku do systemu HVAC z (TABS+DCV).**

**TEZA 2** zakładała, iż dla systemów HVAC z TABS oraz wentylacją mechaniczną odprowadzającą część obciążeń termicznych można wyznaczyć energooszczędne algorytmy sterowania, w tym takie krzywe grzania i chłodzenia, dla których roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną dla odprowadzenia obciążeń termicznych jest minimalne

- Wyniki przeprowadzonych symulacji potwierdziły tę tezę, chociaż różnice są nie są tutaj spektakularne. Stwierdzono, iż dla sterowania optymalnego (optymalnej pary krzywych grzania i chłodzenia) zapotrzebowanie na energię pierwotną do odprowadzenia obciążeń termicznych (funkcja celu) jest mniejsze o 3÷5% w stosunku do pozostałych sterowań dopuszczalnych, w zależności od przyjętego wariantu przełączenia trybu pracy stropu aktywowanego termicznie.
2. Ważnym, zwłaszcza aplikacyjnie wnioskiem z badań symulacyjnych jest stwierdzenie, że nie istnieje jedno optymalne sterowanie (para krzywych grzania i chłodzenia) odpowiednie dla całego budynku, ale opracowana metoda pozwala na wyznaczenie sterowań optymalnych indywidualnie dla poszczególnych stref budynku.
  3. Istotnym oryginalnym osiągnięciem rozprawy jest opracowanie metody sterowania systemem HVAC z TABS, będącej rozwinięciem metody sterowania UBB (*Unknown-But-Bounded* – nieznaną, ale ograniczoną [profil obciążeń]), która pozwala na wyznaczenie zbioru dopuszczalnych krzywych grzania i chłodzenia dla TABS w procedurze optymalizacyjnej bezpośredniego wyszukiwania optymalnej energetycznie pary krzywych grzania i chłodzenia.

## Literatura

- [1] Basińska, M. et al. 2019. Impact of physical and microbiological parameters on proper indoor air quality in nursery. *Environment International*. 132, March (Nov. 2019), 105098. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105098>.
- [2] Europejski, P. and Unii, I.R. 2018. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 201031UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 201227UE. *Official Journal of the European Union*. 844, (2018), 75–91.
- [3] 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>.
- [4] Haddad, S. et al. 2021. On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms. *Energy and Buildings*. 238, (May 2021). DOI:<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110838>.
- [5] Hermann, R. et al. 2008. *Kompendium wiedzy - ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo 08/09*. Omni Scala.
- [6] Kipp & Zonen 2023. CMP21 spectrally flat Class A pyranometer - Kipp & Zonen.
- [7] Klein, S.A. et al. 2009. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Wisconsin, USA: University of Wisconsin.
- [8] Ludwiczak, A. et al. 2018. Jakość powietrza w żłobku - monitoring, ocena i rozwiązania problemów. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. T. 49, nr, 9 (Sep. 2018), 36–42. DOI:<https://doi.org/10.15199/9.2018.9.7>.
- [9] 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>.
- [10] Nageler, P. et al. 2018. Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS). *Energy and Buildings*. 168, (Jun. 2018), 42–55. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.025>.
- [11] Pałaszyska, 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 (Jan. 2024), 18–26. DOI:<https://doi.org/10.15199/9.2024.1.4>.
- [12] Parlament Europejski i Rada 2023. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej oraz zmieniająca rozporządzenie (UE) 2023/955 (wersja przekształcona). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*. 231, 1 (2023), 1–111.
- [13] Parlament Europejski i Rada 2010. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*. 153, (2010), 13–35.
- [14] 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>.
- [15] Rijksen, D.O. et al. 2010. Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems. *Energy and Buildings*. 42, 3 (2010), 298–304.

- DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.007>.
- [16] Sadrizadeh, S. et al. 2022. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 57, (Oct. 2022), 104908. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104908>.
- [17] Tödli, 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>.
- [18] TRNSYS 2012. TRNSYS 17 Documentation. (2012), 3.
- [19] Venko, S. et al. 2015. An experimental study of mixed convection over various thermal activation lengths of vertical TABS. *Energy and Buildings*. 98, (2015), 151–160. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.036>.
- [20] Wargocki, P.; et al. 2020. General rights The relationships between classroom air quality and children's performance in school. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. (2020). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749>.
- [21] Weber, T. et al. 2005. Validation of a FEM-program (frequency-domain) and a simplified RC-model (time-domain) for thermally activated building component systems (TABS) using measurement data. *Energy and Buildings*. 37, 7 (2005), 707–724. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.005>.