

6/2026
czerwiec

ISSN 0137-3676
e-ISSN 2449-9900
tom 57 (6)

Cena: 18,50 zł
(w tym VAT 8%)

COW

CIEPŁOWNICTWO OGRZEWNICTWO WENTYLACJA



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

DISTRICT HEATING • HEATING • VENTILATION

Wydawane od 1969 roku



®

ZPUM

LIDER NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII

Produkcja rur metodą Conti

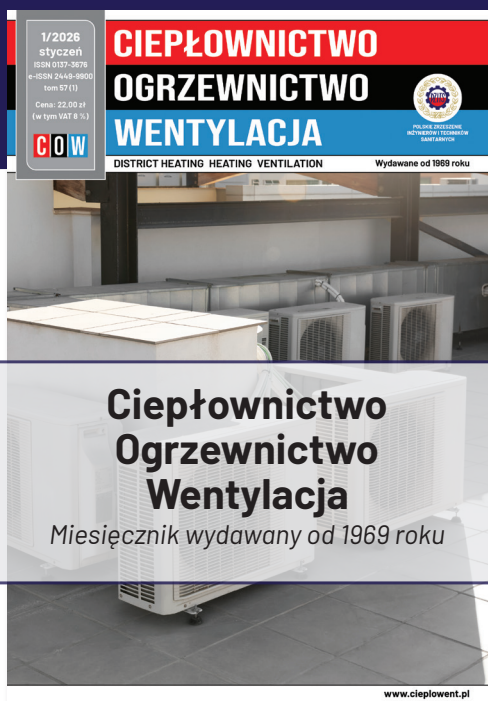
pojedyncze i podwójne, w zakresie średnic rury osłonowej
do Dz355 mm z aluminiową barierą dyfuzyjną lub bez bariery



WWW.ZPUM.PL



Czasopisma Polskiego Zrzeszenia
Inżynierów i Techników Sanitarnych
w nowej odsłonie



Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja

Miesięcznik wydawany od 1969 roku



Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Miesięcznik wydawany od 1921 roku

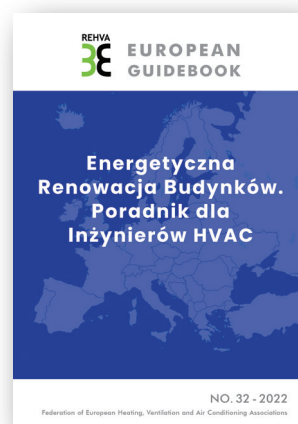
1

2026

www.gwits.pl

cena: 18,50 zł (w tym VAT 8%)

Zapisz się na **bezpłatną** prenumeratę
czasopism, a otrzymasz e-poradnik:
„REHVA GB.32: Energetyczna renowacja
budynków. Poradnik dla inżynierów HVAC”



Dołącz już dziś do grona
specjalistów i otrzymuj od bezpłatną
prenumeratę czasopism PZITS.



Więcej szczegółów na stronie:
www.pzits.pl/prenumerata



Szanowni Czytelnicy,

czerwcowy numer poświęcony jest zagadnieniom, których wspólnym mianownikiem jest transformacja energetyczna i środowiskowa sektora budynków oraz infrastruktury technicznej. Zmieniające się wymagania dotyczące efektywności energetycznej, jakości środowiska wewnętrznego, dekarbonizacji systemów ciepłowniczych oraz rosnąca potrzeba racjonalnego gospodarowania energią sprawiają, że współczesna inżynieria środowiska coraz częściej wymaga podejścia systemowego, łączącego wiedzę z wielu obszarów techniki.

Numer otwiera wywiad z prof. Robertem Sekretem zatytułowany „Ciepłownictwo w epoce transformacji: od systemów wysokotemperaturowych do inteligentnych układów hybrydowych”. Rozmowa dotyczy kierunków rozwoju współczesnego ciepłownictwa, roli systemów czwartej i piątej generacji, znaczenia pomp ciepła, magazynowania energii oraz integracji różnych nośników energii w ramach koncepcji systemów hybrydowych. Przedstawione refleksje pokazują skalę wyzwań stojących przed sektorem, ale jednocześnie wskazują ogromny potencjał innowacji, które będą kształtować przyszłość ciepłownictwa w Polsce.

Temat poprawy efektywności energetycznej budynków podejmują Aleksandra Specjał i Anna Paruzel w artykule dotyczącym możliwości termomodernizacji budynku jednorodzinnego z lat dziewięćdziesiątych do standardu niskoenergetycznego i pasywnego. Autorki pokazują, że nawet obiekty zaprojektowane według dawnych standardów mogą zostać skutecznie dostosowane do współczesnych wymagań energetycznych. Przeprowadzona analiza stanowi interesujący przykład potencjału modernizacyjnego istniejących zasobów budowlanych oraz skali możliwych do osiągnięcia oszczędności energii.

O tym, że skuteczna modernizacja budynków nie może ograniczać się wyłącznie do poprawy izolacyjności przegród, przekonują Joanna Ferdyn-Grygierek i Krzysztof Grygierek. W swoim artykule analizują wpływ różnych strategii wentylacji na jakość powietrza i zużycie energii w zmodernizowanym budynku szkoły podstawowej. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że zapewnienie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego powinno być integralnym elementem każdego procesu termomodernizacji. Szczególnie istotne jest to w budynkach edukacyjnych, gdzie warunki środowiska wewnętrznego bezpośrednio wpływają na zdrowie, samopoczucie i efektywność pracy uczniów oraz nauczycieli.

Zagadnienia związane z przepływem powietrza analizowane są również w skali infrastrukturalnej. Aleksander Król i Małgorzata Król przedstawiają wyniki badań naturalnych przepływów powietrza w tunelu drogowym w Gdańsku. Artykuł łączy pomiary wykonane w rzeczywistym obiekcie z analizą teoretyczną zjawisk odpowiedzialnych za kształtowanie przepływu powietrza. Zaprezentowane wyniki mają znaczenie nie tylko poznawcze, ale również praktyczne, wspierając projektowanie i eksploatację systemów wentylacji tunelowej.

Ważnym elementem transformacji energetycznej pozostają instrumenty finansowego wsparcia inwestycji modernizacyjnych. Tematyce tej poświęcony jest artykuł Małgorzaty Janusz i Anny Kowalczyk dotyczący zmian warunków uzyskania premii termomodernizacyjnej na przestrzeni lat obowiązywania ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów. Autorki analizują, jak ewoluowały zasady wsparcia oraz jaki wpływ miały one na opłacalność przedsięwzięć modernizacyjnych realizowanych w budynkach wielorodzinnych reprezentujących różne okresy budownictwa. Opracowanie stanowi cenne źródło wiedzy zarówno dla audytorów energetycznych, jak i inwestorów planujących działania modernizacyjne.

Coraz większe znaczenie w projektowaniu i eksploatacji bu-



dynków mają również potrzeby oraz zachowania ich użytkowników. Aleksandra Lipczyńska, Mirella Fuhrmann, Joanna Ferdyn-Grygierek, Stanisław Kocik i Krzysztof Grygierek prezentują wyniki terenowych badań sezonowej oceny komfortu cieplnego w budynkach biurowych z wentylacją naturalną i mechaniczną. Autorzy pokazują, że odczucia użytkowników zależą nie tylko od parametrów środowiska wewnętrznego, ale także od możliwości podejmowania działań adaptacyjnych oraz stopnia kontroli nad własnym otoczeniem. To kolejny głos potwierdzający, że projektowanie budynków przyszłości powinno uwzględniać nie tylko efektywność energetyczną, lecz także komfort człowieka.

Podsumowując, publikacje zamieszczone w numerze poszukują rozwiązań umożliwiających osiągnięcie wysokiej efektywności energetycznej przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu użytkowników, bezpieczeństwa eksploatacji oraz ograniczeniu wpływu na środowisko. Zarówno przedstawione wyniki badań naukowych, jak i doświadczenia praktyczne autorów pokazują, że transformacja energetyczna nie jest pojedynczym działaniem ani jedną technologią. To złożony proces obejmujący budynki, instalacje, systemy ciepłownicze, mechanizmy finansowania oraz – co najważniejsze – ludzi, którzy z tych rozwiązań korzystają. Mam nadzieję, że przygotowane artykuły dostarczą Państwu zarówno aktualnej wiedzy naukowej, jak i praktycznych inspiracji do dalszych badań, projektów oraz działań wdrożeniowych. Życzę interesującej lektury.

Joanna Ferdyn-Grygierek

Odwiedź nową stronę czasopisma

ciepłownictwoogrzewnictwowentylacja.pl

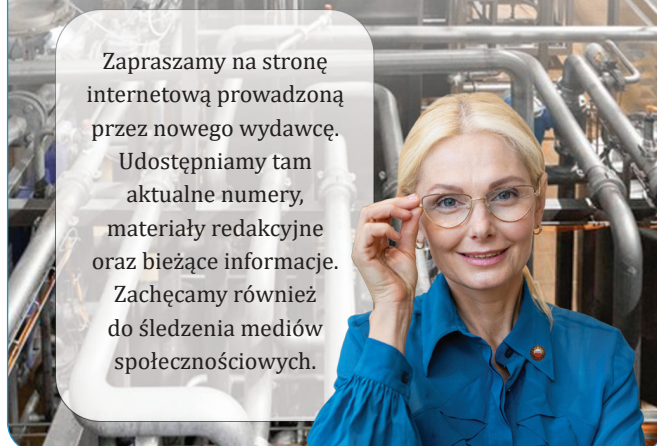


oraz nowe media społecznościowe:

- www.facebook.com/COW.PZTS
- www.linkedin.com/company/cow-
- [ciepłownictwo-ogrzewnictwo-wentylacja](https://www.instagram.com/ciepłownictwo-ogrzewnictwo-wentylacja)

Zapraszamy na stronę internetową prowadzoną przez nowego wydawcę.

Udostępniamy tam aktualne numery, materiały redakcyjne oraz bieżące informacje. Zachęcamy również do śledzenia mediów społecznościowych.



Joanna Ferdyn-Grygierek – Na pierwszy rzut oka 1

Ciepłownictwo w epoce transformacji: od systemów wysokotemperaturowych do inteligentnych układów hybrydowych – **Wywiad z Robertem Sekret** 3

Nauka i Technika

Aleksandra Specjał, Anna Paruzel – Analiza możliwości termomodernizacji wybranego budynku jednorodzinnego do standardu niskoenergetycznego oraz pasywnego / Analysis of the possibilities of thermal modernization of a selected single-family building to low-energy and passive standard 6

Joanna Ferdyn-Grygierek, Krzysztof Grygierek – Analiza wpływu systemu wentylacji na jakość powietrza i zapotrzebowanie na energię w zmodernizowanym budynku szkoły / Analysis of the impact of ventilation systems on indoor air quality and energy demand in a retrofitted school building 14

Aleksander Król, Małgorzata Król – Naturalne przepływy powietrza w tunelu drogowym / Natural airflows in a road tunnel 24

Małgorzata Janusz, Anna Kowalczyk – Analiza zmian warunków uzyskania premii termomodernizacyjnej i jej wartości na przestrzeni lat działania Ustawy termomodernizacyjnej. Część 2. Analiza wsparcia finansowego w postaci premii termomodernizacyjnej – studium przypadku / Analysis of changes in the conditions for obtaining the thermal modernization bonus and its value throughout the years of the thermal modernization act's operation. Part 2. Analysis of financial support in the form of a thermal modernization bonus – a case study 31

Aleksandra Lipczyńska, Joanna Ferdyn-Grygierek, Krzysztof Grygierek, Mirella Fuhrmann, Stanisław Kocik – Sezonowa ocena komfortu cieplnego i zachowań adaptacyjnych użytkowników w budynkach biurowych z wentylacją naturalną i mechaniczną – badania terenowe / Seasonal assessment of thermal comfort and occupants' adaptive behaviours in naturally and mechanically ventilated office buildings – a field study 47

Wydarzenia

Podsumowanie konferencji INNOBUILD 2026 59

PZITS w działaniu

Nadchodzące wydarzenia 60

Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, Miesięcznik Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Rok założenia: 1969

Czasopismo recenzowane

Wersja pierwotna czasopisma: elektroniczna

ISSN 0137-3676, e-ISSN 2449-9900

KOLEGIUM REDAKCYJNE/Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY/Editor in Chief

dr hab. inż. Anna Bogdan, prof. PW

REDAKTORZY TEMATYCZNI/Subject Editors

Ciepłownictwo/District heating

– dr hab. inż. Bożena Babiarz, prof. PRz

– mgr inż. Ewa Kręcielewska

– mgr inż. Barbara Rubik

– prof. dr hab. inż. Robert Sekret

Chłodnictwo i pompy ciepła/Refrigeration and heat pumps

– mgr inż. Paweł Lachman

– dr inż. Marian Rubik

– dr inż. Piotr Ziętek

Jakość powietrza/Air quality

– dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. PŁ

Wentylacja, klimatyzacja, ogrzewnictwo/Ventilation, air conditioning, heating

– dr hab. inż. Tomasz Cholewa, prof. PL

– dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ

– dr inż. Andrzej Górka

– mgr inż. Wojciech Ratajczak

– dr inż. Sylwia Szczęśniak

– dr hab. inż. Ewa Zender-Świercz, prof. PŚk

WYDAWNICTWO POLSKIEGO ZRZESZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH

ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

tel: 22 826 28 94

e-mail: wydawnictwo@pzits.pl, www.pzits.pl

Szczegóły prenumeraty:

www.pzits.pl/prenumerata

ADRES REDAKCJI

ul. Czackiego 3/5 pokój 217

00-043 Warszawa

redakcja@cieplownictwoogrzewnictwowentylacja.pl

www.cieplownictwoogrzewnictwowentylacja.pl

SKŁAD I OPRACOWANIE GRAFICZNE

Agnieszka Chojnacka

Polskie Zrzeszenie Inżynierów

i Techników Sanitarnych

DRUK

Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o. o.

ul. Ks. J. Popiełuszki 19/21, 01-595 Warszawa

Miejsce i data wydania: Warszawa 06/2026

Nakład: 260 egzemplarzy

INFORMACJE DODATKOWE

Czasopismo znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Czasopismo jest indeksowane w: BazTech, EBSCO, Index Copernicus ICV 2024 = 75.74

oraz w Polskiej Bibliografii Naukowej (PBN),

będącej częścią Zintegrowanego Systemu

Informacji o Szkolnictwie Wyższym i Nauce

POL-on. Artykuły są rejestrowane w bazie

danych CrossRef. Każdy artykuł ma numer

identyfikacyjny DOI.

Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść ogłoszeń.

Ciepłownictwo w epoce transformacji: od systemów wysokotemperaturowych do inteligentnych układów hybrydowych



Prof. dr hab. inż. Robert Sekret

Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska

Jak Pan Profesor ocenia aktualny etap transformacji ciepłownictwa w Polsce na tle Europy?

Na tle Europy Polska wyróżnia się istotnym udziałem systemów ciepłowniczych w sektorze komunalnym. Naszym dużym atutem jest istniejąca infrastruktura ciepłownicza. Niestety, poza nielicznymi miejskimi systemami ciepłowniczymi, pozostajemy technologicznie opóźnieni w zakresie transformacji energetycznej. Dotyczy to w szczególności źródeł ciepła oraz dostosowania sieci ciepłowniczych do coraz wyższych standardów energetycznych odbiorców.

Czy tradycyjne systemy ciepłownicze mają jeszcze długoterminową przyszłość, czy czeka nas ich fundamentalna przebudowa?

Nie ma racjonalnej alternatywy dla miejskich systemów ciepłowniczych, czyli ciepłownictwa systemowego. Zapewnienie bezpieczeństwa dostaw ciepła wymusza konieczność nie tylko dalszej bieżącej eksploatacji, ale także rozwoju tych systemów. Standardowe odtwarzanie instalacji wytwórczych oraz klasyczna wymiana sieci kanałowych na preizolowane nie oznaczają już realnego rozwoju technologicznego ani postępu w dostosowywaniu obecnych systemów do aktualnych potrzeb. Transformacja energetyczna ciepłownictwa jest koniecznością, a nie opcją. W przypadku istniejących systemów ciepłowniczych oznacza to ewolucję w kierunku systemów czwartej generacji. Natomiast w przypadku nowych, lokalnych systemów ciepłowniczych oznacza to wdrażanie standardu piątej generacji. Rozwiązania oparte na lokalnych źródłach ciepła i lokalnych sieciach ciepłowniczych to systemy autonomiczne lub współpracujące z systemami miejskimi – obecnie preferowane m.in. dla osiedli mieszkaniowych i zakładów przemysłowych.

Jakie czynniki – technologiczne, ekonomiczne czy regulacyjne – w największym stopniu determinują tempo zmian?

Myślę, że znajdujemy się obecnie w dość specyficznym momencie, który powinien przynieść od dawna oczekiwany impuls dla transformacji energetycznej w cie-

płownictwie. Zarówno czynniki technologiczne, takie jak przestarzała infrastruktura ciepłownicza, ekonomiczne – w tym dynamicznie rosnące i zmienne koszty nośników energii, rosnące ceny ciepła oraz koszty inwestycji – jak i regulacyjne, związane z coraz trudniejszym do uzasadnienia brakiem postępów w transformacji energetycznej, determinują konieczność zmian. Dotyczy to nie tylko ochrony środowiska i ekonomii, lecz także bezpieczeństwa dostaw ciepła do odbiorców. Na spotkaniach branżowych najczęściej podkreśla się zbyt długie i mało elastyczne procedury administracyjne, na przykład w przypadku przyłączania nowych rozproszonych źródeł energii, zagospodarowania taniej energii elektrycznej pozabilansowej czy niskotemperaturowego ciepła odpadowego. Problemem jest również brak możliwości stosowania dynamicznych taryf oraz niewystarczające wsparcie finansowe na etapie inwestycji, zwłaszcza dla małych i średnich systemów ciepłowniczych.

W jakim kierunku zmierza obniżanie parametrów pracy sieci ciepłowniczych i gdzie leży granica techniczna tej transformacji?

Obniżanie parametrów pracy sieci ciepłowniczych zmierza przede wszystkim do poprawy efektywności ekonomicznej oraz środowiskowo-energetycznej tych systemów. Im niższe temperatury w sieci ciepłowniczej, tym większe są możliwości: ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez pompy ciepła, zwiększenia wykorzystania ciepła odpadowego i źródeł odnawialnych, poprawy odzysku ciepła w procesie kondensacji spalin w źródłach wyposażonych w kotły ciepłownicze, wzrostu produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowniach, zwiększenia zdolności do magazynowania ciepła, ograniczenia strat przesyłu i dystrybucji, zastosowania rur z tworzyw sztucznych zamiast stalowych oraz wydłużenia żywotności przewodów ciepłowniczych. Granica techniczna, czyli minimalna temperatura zasilania i powrotu w systemie ciepłowniczym, nie jest jedną stałą wartością dla wszystkich systemów, jak zakładano przy projektowaniu wielu obecnie eksploatowanych układów. Wynika ona ze specyfiki danego systemu, w tym jego obecnej charakterystyki energetycznej, a także ze stop-

nia termomodernizacji po stronie odbiorców ciepła, czyli rzeczywistej charakterystyki energetycznej budynków.

Czy modernizacja istniejących sieci jest bardziej racjonalna niż budowa nowych, zdecentralizowanych źródeł ciepła?

Modernizacja istniejących sieci ciepłowniczych jest zazwyczaj korzystniejszym rozwiązaniem niż budowa nowych miejskich systemów ciepłowniczych, o ile modernizacja skierowana jest w kierunku systemu czwartej generacji. Na obszarach o niskiej gęstości mocy cieplnej zdecentralizowane rozwiązania są zwykle bardziej elastyczne i opłacalne.

Jakie technologie mają dziś największy potencjał w procesie modernizacji systemów ciepłowniczych?

Nie ma jednej technologii, którą można byłoby traktować jako uniwersalne rozwiązanie systemowe. Odpowiedzią na obecne wyzwania transformacji w ciepłownictwie jest hybrydyzacja systemów ciepłowniczych, która pozwala m.in. na maksymalizację wykorzystania lokalnych zasobów nośników energii pierwotnej. Hybrydowe układy z kogeneracją gazową, wielkoskalowymi pompami ciepła, kotłami elektrodowymi oraz kotłami na biomasę czy RDF należą dziś do najbardziej obiecujących rozwiązań ze względu na ekonomię, efektywność i uwarunkowania regulacyjne. Coraz częściej rozważa się również wykorzystanie technologii Power-to-Heat wraz z magazynami ciepła, które pozwalają zagospodarować nadwyżki energii elektrycznej z instalacji OZE. W niektórych częściach kraju analizuje się także możliwość wykorzystania źródeł geotermalnych.

Jak definiowałby Pan Profesor nowoczesny, hybrydowy system ciepłowniczy?

Nie ma jednej powszechnie przyjętej definicji hybrydowego systemu ciepłowniczego. Problematyka ta nadal pozostaje zagadnieniem rozwojowym, jednak można przyjąć, że jest to zintegrowany układ wytwarzania, przesyłu i dystrybucji ciepła, łączący co najmniej dwa różne źródła energii pierwotnej – odnawialne i konwencjonalne. Jeśli spojrzeć na to szerzej, system ciepłowniczy obejmuje źródło ciepła, przesył i dystrybucję ciepła oraz węzeł cieplny, z którego zasilani są odbiorcy. Obecnie struktura takiego systemu ma zazwyczaj charakter hierarchiczny, co oznacza, że przepływ ciepła odbywa się z jednego lub kilku centralnych źródeł do odbiorców. System hybrydowy zakłada natomiast możliwość wytwarzania ciepła nie tylko w źródłach centralnych, ale również w źródłach rozproszonych, współpracujących z klasycznym systemem ciepłowniczym. Takimi źródłami mogą być także instalacje wytwórcze zlokalizowane u samych odbiorców. W takim przypadku przepływ ciepła staje się dwukierunkowy, a sieć ciepłownicza pełni również funkcję krótkoterminowego akumulatora ciepła. Jednym z elementów takiego rozwiązania są tzw. hybrydowe węzły cieplne. Obecnie najbliższe temu modelowi jest ciepłownictwo czwartej generacji. Często układy hybrydowe są kojarzone z tzw. efektywnymi systemami ciepłowniczymi, choć w praktyce transformacja energetyczna

w tym przypadku najczęściej dotyczy przede wszystkim źródła ciepła. Hybrydyzacja zapewnia elastyczność wobec wahań cen energii, redukcję emisji oraz wzrost bezpieczeństwa dostaw ciepła do odbiorcy.

Jakie są największe wyzwania przy integracji wielu źródeł ciepła w jednym systemie?

Integracja wielu źródeł ciepła w jednym systemie ciepłowniczym wiąże się z szeregiem istotnych wyzwań technicznych, ekonomicznych i regulacyjnych. Należą do nich przede wszystkim: zróżnicowanie parametrów pracy źródeł, konieczność skutecznego sterowania i koordynacji wielu jednostek wytwórczych, dostosowanie parametrów oraz modernizacja istniejącej sieci ciepłowniczej, zapewnienie niezawodności i bezpieczeństwa dostaw ciepła, wysokie koszty inwestycyjne i uwarunkowania regulacyjno-prawne, a także integracja z sektorem elektroenergetycznym.

Czy pompy ciepła mogą stać się jednym z filarów systemów ciepłowniczych w Polsce?

Pompy ciepła mogą stać się jednym z elementów miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce, zwłaszcza w nowych lub modernizowanych układach. Trudno jednak uznać je za wiodące źródła ciepła w dużych miejskich systemach ciepłowniczych. Należy mieć świadomość, że ich zastosowanie wiąże się z koniecznością zapewnienia odpowiedniej mocy elektrycznej w systemie elektroenergetycznym, zwłaszcza w okresie zimowym, a także odpowiednich możliwości jej przesyłu lub zwiększenia lokalnego wytwarzania energii elektrycznej oraz efektywnego jej magazynowania. Najbardziej prawdopodobnym modelem dla Polski jest wykorzystanie pomp ciepła w systemach hybrydowych — jako jednego ze źródeł ciepła lub elementu poprawy efektywności energetycznej istniejących instalacji, na przykład poprzez wykorzystanie ciepła niskotemperaturowego. W ciepłownictwie lokalnym w nowych systemach piątej generacji o mocach do kilkunastu MW, instalacje pomp ciepła współpracujące z magazynem ciepła, pełniącym również funkcję źródła szczytowego, mogą stać się filarem systemu ciepłowniczego.

Jakie są ograniczenia ich stosowania w dużych systemach – techniczne i ekonomiczne?

Zastosowanie pomp ciepła w dużych systemach ciepłowniczych napotyka zarówno ograniczenia techniczne, jak i ekonomiczne. Z technicznego punktu widzenia główna bariera to wysokie temperatury zasilania i powrotu miejskich sieci ciepłowniczych. Z ekonomicznego punktu widzenia to wysoki koszt inwestycyjny wynikający m.in. z faktu niskiego standardu energetycznego systemów ciepłowniczych, tj. konieczności instalacji pomp ciepła o bardzo dużych mocach.

W jakich przypadkach integracja pomp ciepła z istniejącą infrastrukturą jest najbardziej efektywna?

Największą efektywność integracji pomp ciepła z istniejącą infrastrukturą ciepłowniczą osiąga się wtedy, gdy towarzyszy jej możliwość obniżenia temperatur zasilania i powrotu. Istotne korzyści przynosi również wyko-

rzystanie dostępnych źródeł ciepła odpadowego oraz hybrydowa współpraca z innymi źródłami i magazynami ciepła.

Jaką rolę w transformacji ciepłownictwa odegra magazynowanie energii cieplnej?

Magazynowanie ciepła odegra jedną z kluczowych ról w transformacji ciepłownictwa. Jest ono niezbędnym elementem poprawy efektywności wykorzystania odnawialnych źródeł energii, zagospodarowania niezbilansowanej energii elektrycznej z instalacji OZE z wykorzystaniem technologii Power-to-Heat, a także lepszego wykorzystania ciepła z kogeneracji. Magazynowanie ciepła zwiększa jednocześnie elastyczność zarówno systemu ciepłowniczego, jak i elektroenergetycznego.

Czy technologie takie jak materiały zmiennofazowe mają realny potencjał wdrożeniowy?

Materiały wykorzystujące ciepło przemiany fazowej (PCM) mogą wspierać magazynowanie ciepła oraz integrację systemów ciepłych ze źródłami OZE i ciepła odpadowego, zwłaszcza że rozwiązania te wymagają mniej przestrzeni do zabudowy akumulatora/magazynu ciepła niż magazyny wykorzystujące jedynie pojemność cieplną materiału magazynującego. Jest to bardzo istotny aspekt w przypadku modernizacji istniejących systemów. Wysoki potencjał wdrożeniowy PCM dotyczy obecnie małych i średnich instalacji ciepłych oraz budynków. Uzyskiwane oszczędności są od kilkunastu do kilkudziesięciu procent. W ciepłownictwie systemowym potencjał wdrożeniowy jest niski. Stan ten wynika z braku dojrzałych rozwiązań dla obecnych wysokich parametrów sieci, trudności technologicznoekonomicznego skalowania obecnych dojrzałych technologicznie rozwiązań z małej i średniej skali do bardzo dużych systemów ciepłownictwa systemowego. Dlatego też, magazynowanie z wykorzystaniem PCM dla ciepłownictwa systemowego jest nadal technologią wymagającą: dalszych prac rozwojowo-wdrożeniowych, standaryzacji i testów w skali rzeczywistej. Ciepłownictwo niskotemperaturowe czwartej generacji, a zwłaszcza piątej generacji, daje zdecydowanie większe szanse na wdrożenie tego typu magazynów ciepła.

Czy przyszłość należy do dużych magazynów systemowych czy raczej do rozwiązań rozproszonych?

Przyszłość należy zarówno do dużych, centralnych magazynów ciepła, jak i do mniejszych, rozproszonych rozwiązań w ciepłownictwie. Potrzeba operacyjnej integracji centralnych magazynów ciepła z elastycznymi magazynami rozproszonymi wynika z koncepcji systemów hybrydowych, w tym z zastosowania hybrydowych węzłów ciepłych. Kluczowe będzie ich wzajemne dopasowanie, a nie konkurowanie ze sobą, oraz uzasadnienie wyboru danego rozwiązania w oparciu o koszty ekonomiczne w całym cyklu jego życia dla konkretnego systemu ciepłowniczego.

Jak będzie wyglądał model systemu ciepłowniczego za 20–30 lat?

Nie jestem w stanie odpowiedzieć na to pytanie wprost. Gdybym cofnął się o 20–30 lat i w tamtym czasie przedstawił na spotkaniach specjalistów branży ciepłowniczej model ciepłownictwa oraz scenariusze transformacji, które dziś rozważamy, przypuszczam, że nie zostałbym potraktowany całkiem poważnie. Wracając jednak do pytania, uważam, że obecnie świadomość konieczności zmian w ciepłownictwie systemowym jest bardzo wysoka. Szczególnie interesującą ideą o dużym potencjale wdrożeniowym jest sector coupling, czyli synergiczne wykorzystanie zasobów i technologii ciepłownictwa, gazownictwa oraz elektroenergetyki w celu zwiększenia efektywności systemów i poprawy bezpieczeństwa energetycznego. To kierunek transformacji energetycznej, który pozwala uwzględnić polskie uwarunkowania gospodarcze, dynamikę rynku i oczekiwania społeczne, a także racjonalizować wysokie nakłady finansowe na transformację energetyczną. W przypadku lokalnych systemów ciepłowniczych, o których bardzo często się zapomina, mimo że stanowią istotną część sektora ciepła w Polsce, przyszłość należy do niskotemperaturowych oraz zero- i niskoemisyjnych systemów piątej generacji, współpracujących z budynkami o wysokim standardzie energetycznym. Myślę, że obszar ten, ze względu na swój duży potencjał wdrożeniowy i znaczną indywidualność, powinien być szczególnie interesujący dla obecnych studentów i absolwentów uczelni technicznych.

Jakie kompetencje będą kluczowe dla inżynierów i projektantów w nowej rzeczywistości energetycznej?

Uważam, że oprócz wiedzy technicznej dotyczącej technologii wspierających transformację energetyczną kluczowe stają się także umiejętności myślenia systemowego, analitycznego i projektowego. Myślenie systemowe pozwala dostrzegać szerszy kontekst funkcjonowania nowoczesnych układów energetycznych, myślenie analityczne umożliwia interpretację dużych zbiorów danych i wyciąganie trafnych wniosków, a myślenie projektowe sprzyja tworzeniu rozwiązań odpowiadających na rzeczywiste potrzeby użytkowników — ergonomicznych, intuicyjnych i atrakcyjnych rynkowo.

Serdecznie dziękujemy prof. Robertowi Sekretowi za rozmowę oraz podzielenie się ekspercką wiedzą i wielowymiarowym spojrzeniem na kierunki transformacji współczesnego ciepłownictwa. Wywiad pokazuje, że przyszłość sektora będzie oparta na systemach hybrydowych, integracji różnych nośników energii oraz rozwoju niskoemisyjnych i niskotemperaturowych układów ciepłowniczych. Szczególnie cenne są przedstawione przez Profesora refleksje dotyczące konieczności myślenia systemowego oraz roli innowacyjnych technologii w budowaniu bezpieczeństwa energetycznego. To ważny głos w dyskusji o przyszłości polskiego ciepłownictwa i wyzwaniach stojących przed kolejnym pokoleniem inżynierów.



Analiza możliwości termomodernizacji wybranego budynku jednorodzinnego do standardu niskoenergetycznego oraz pasywnego

Analysis of the possibilities of thermal modernization of a selected single-family building to low-energy and passive standard



Dr inż. Aleksandra Specjał

ORCID ID: 0000-0002-0028-1151
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
aleksandra.specjal@polsl.pl



Mgr inż. Anna Paruzel

Absolwentka
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska

Słowa kluczowe: termomodernizacja budynku jednorodzinnego, budynek pasywny, budynek niskoenergetyczny

Streszczenie

W artykule przedstawiono dwa warianty termomodernizacji wybranego budynku jednorodzinnego z lat 90. Celem było zmniejszenie zapotrzebowania na energię oraz sprawdzenie możliwości dostosowania istniejącego obiektu, o konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i usytuowaniu na działce, do standardu niskoenergetycznego i pasywnego. Przeprowadzono ocenę energetyczną budynku w stanie istniejącym oraz zaproponowano warianty modernizacji przegród i instalacji wewnętrznych, a także wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych. Przeanalizowano problemy, jakie mogą wystąpić w zakresie przystosowywania elementów budynku do wymagań budownictwa niskoenergetycznego oraz przedstawiono możliwe rozwiązania. W wyniku termomodernizacji wskaźniki charakterystyki energetycznej budynku zmniejszyły się o ponad 90% w stosunku do stanu istniejącego. Potwierdzono techniczną możliwość osiągnięcia założonych standardów w analizowanym budynku.

Keywords: thermal modernization of a single-family building, passive building, low-energy building

Abstract

This article presents two options of thermal modernization for a selected single-family building from the 1990s. The goal was to reduce energy demand and verify the feasibility of adapting the existing building, with specific structural solutions and location of the building, to low-energy and passive standards. An energy assessment of the existing building was conducted and proposed options of thermal modernization of the building envelope, heating and ventilation systems, and the use of renewable energy sources. There were analyzed problems which may result in adapting building components to low-energy building requirements and possible solutions were presented. As a result of the thermal modernization, the building's energy performance indicators were reduced by over 90% compared to the existing condition. The technical feasibility of achieving the assumed standards in the analyzed building was confirmed.

Wstęp

W Unii Europejskiej sektor budownictwa generuje około 40% całkowitego zużycia energii i około 36% emisji gazów cieplarnianych, związanych z energią wykorzystywaną w budynkach. Prawie 75% budynków jest nieefektywnych energetycznie. Aktualne i nadchodzące regulacje unijne nakładają wymagania, by budynki zarówno nowe jak i istniejące poddawane termomodernizacji osiągały lepsze standardy efektywności energetycznej oraz charakteryzowały się niską emisją zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych. Z termomodernizacją związana jest strategia unijna: „Fala renowacji”, która ma na celu transformację sektora budowlanego w kierunku zrównoważonego rozwoju, poprawy efektywności energetycznej oraz walki ze zmianami klimatycznymi. Zakłada się podwojenie tempa renowacji budynków do 2030 roku. Planuje się zmniejszenie emisji z sektora budynków o 60% w porównaniu do poziomu z 2015 roku, co jest wsparciem celów klimatycznych

czyli osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r. (Dyrektywa, 2023)

Lepsza izolacja, bardziej efektywne systemy ogrzewania i wentylacji przekładają się na niższe koszty, a obniżenie rachunków za energię to ulga dla gospodarstw domowych i złagodzenie ubóstwa energetycznego. Zastosowanie odnawialnych źródeł energii zmniejsza zależność od gazu czy ropy naftowej i zwiększa bezpieczeństwo energetyczne kraju. W wyniku działań termomodernizacyjnych zwiększają się również wartości nieruchomości.

W Polsce znajduje się około 6,8 miliona budynków mieszkalnych, w tym ok. 5 milionów budynków jednorodzinnych. Budynki jednorodzinne stanowią aż 81,1% wszystkich zamieszkałych obiektów w miastach oraz 97,5% na terenach wiejskich. Spośród niemal 6,5 milionów mieszkań w budownictwie jednorodzinnym 35% stanowią mieszkania ogrzewane źródłami, które kwalifikują się do wymiany (GUS, 2024). W polskich gospodarstwach domowych wciąż działa około 2,5 mln przestarzałych ko-

tłów na paliwa stałe, które odpowiadają za dużą część niskiej emisji, czyli smogu.

Według raportu przygotowanego na zlecenie Instytutu Ekonomii Środowiska (Instytut Energii Odnawialnej, 2025) znaczna część polskich budynków jednorodzinnych znajduje się w złym stanie technicznym. Co trzeci budynek nie posiada ocieplenia wszystkich ścian zewnętrznych. Około 30% budynków jednorodzinnych nadal nie posiada żadnej warstwy termoizolacyjnej, a w 25% budynków ściany lub fundamenty są zawilgocone. W 10% budynków modernizacja wymaga ciekący dach, a w 20% budynków konieczna jest wymiana lub naprawa nieszczelnej stolarki okiennej. Ponad 80% właścicieli domów jednorodzinnych uważa, że w aktualnej sytuacji warto zainwestować fundusze w ocieplenie budynku. Należy też zwrócić uwagę, że około 50% badanych deklaruje chęć ogrzewania kotłami na paliwo stałe, ze względów ekonomicznych.

Na poziomie europejskim kluczową rolę odgrywa Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, tzw. Dyrektywa EPBD z 2010 roku (Dyrektywa, 2010), a szczególnie najnowsza przekształcona wersja z 2024 roku, która ma zostać implementowana do końca maja 2026 roku (Dyrektywa, 2024). Nakłada ona na państwa członkowskie obowiązek poprawy efektywności energetycznej istniejących zasobów budowlanych oraz promowania budynków o niemal zerowym zużyciu energii i budynków zeroemisyjnych. W praktyce oznacza to systematyczne zastrzeganie wymagań, do których istniejące budynki powinny być dostosowywane przez termomodernizację. Państwa członkowskie mają również zapewnić montaż instalacji wykorzystujących energię słoneczną (kolektory słoneczne i panele fotowoltaiczne), jeżeli jest to technicznie możliwe i ekonomicznie uzasadnione. W Dyrektywie podane są daty obowiązywania tego wymagania dla budynków nowych i istniejących, w zależności od ich rodzaju i wielkości powierzchni. Modernizowane budynki jednorodzinne nie są objęte tym harmonogramem.

W ostatnich latach, w związku z wymaganiami prawnymi, programami dofinansowującymi termomodernizację oraz rosnącymi kosztami energii, coraz większą popularność zyskuje budownictwo niskoenergetyczne, a nawet pasywne. Na ten trend wpływa również coraz powszechniejsze przekonanie, że w niedalekiej przyszłości tradycyjne domy będą tracić na wartości w porównaniu z budynkami energooszczędnymi i pasywnymi.

Podstawy i założenia standardu pasywnego zostały opracowane w 1988 roku przez Wolfganga Feista – założyciela Instytutu Domów Pasywnych w Niemczech. Budynek pasywny, wg definicji, łączy wysoki komfort użytkownika z bardzo niskim zapotrzebowaniem energii na potrzeby ogrzewania i wentylacji, nie wyższym niż $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Pierwszy na świecie eksperymentalny dom pasywny powstał w 1991 roku, w Darmstadt. Pierwszy dom pasywny w Polsce powstał w roku 2007 w miejscowości Smolec pod Wrocławiem (Juchniewicz-Lipińska, 2008). W badaniach przeprowadzonych w Kanadzie w budynku jednorodzinnym pasywnym oddanym do użytkowania oszacowano, że redukcja emisji gazów cieplarnianych może wynieść nawet 39% w porównaniu do zwykłego budynku (Mach i in., 2025).

W Polsce wymagania dotyczące ochrony cieplnej w za-

kresie budynków niskoenergetycznych oraz pasywnych nie są sformułowane w przepisach prawnych. W latach 2013–2018 realizowany był program przewidujący dotacje do budowy domów pasywnych i energooszczędnych przy wsparciu NFOŚiGW. W wytycznych do tego programu sformułowano parametry, jakie powinny spełniać budynki energooszczędne NF40 i pasywne i NF15 (KAPE, 2012). Wytyczne określono na podstawie serii obliczeń komputerowych, w celu określenia minimalnych wymagań w zakresie ochrony cieplnej budynku, systemu wentylacji i szczelności powietrznej, gwarantujących osiągnięcie wskaźnika zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji na poziomie $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ dla budynku niskoenergetycznego i $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ dla pasywnego. W budynku pasywnym maksymalne współczynniki przenikania ciepła U wyrażone w $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ wynoszą: 0,10 dla ścian zewnętrznych, dachów i stropodachów, 0,12 dla stropów nad nieogrzewanymi piwnicami, 0,8 dla okien i drzwi zewnętrznych.

Jednym z podstawowych założeń standardu pasywnego jest rygorystyczna izolacja przegród budowlanych, w tym stropów i fundamentów. W opracowaniu (Godlewski i in., 2021) przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy efektywności energetycznej projektowanych fundamentów. Badania wykazały, że w warunkach klimatycznych Polski najbardziej efektywnym rozwiązaniem dla budynków pasywnych jest zastosowanie płyty fundamentowej.

Przeprowadzono wiele analiz dostosowania do standardu pasywnego budynków zarówno wielorodzinnych jak i jednorodzinnych wybudowanych w różnych latach, a więc charakteryzujących się różną izolacyjnością przegród, zgodnie ze zmieniającymi się wymaganiami Warunków Technicznych (WT) (Minister Rozwoju i Technologii, 2022).

Porównawczą analizę energetyczną dla budynku jednorodzinnego, parterowego, niepodpiwniczonego, spełniającego wymagania WT w 2011 roku (współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych wynosił $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), dostosowywanego do standardu niskoenergetycznego i pasywnego, dla różnych systemów grzewczych przeprowadzono też w opracowaniu (Siuta-Oлча i in., 2011). Do analizy wykorzystano pakiet do projektowania budynków pasywnych (PHPP). Dla rozpatrywanych wariantów określono również koszty zużycia energii. Z kolei analizę ekonomiczną opłacalności dostosowania budynku jednorodzinnego do standardu budynku pasywnego przedstawiono w pracy (Marciniak & Ujma, 2018). Analizowano budynek parterowy z poddaszem użytkowym, spełniający wymagania WT w roku 2017, a więc budynek o dość dobrym stanie ochrony cieplnej (np. współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych wynosił $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Zaproponowano kilka wariantów ocieplenia przegród zewnętrznych, wymianę okien, zastosowanie wentylacji mechanicznej z rekuperacją ciepła. Do obliczeń wykorzystano metodologię wykonywania audytu energetycznego. Stwierdzono, że termomodernizacja badanego budynku do standardu pasywnego jest nieopłacalna, nie zwróci się w okresie czasu życia budynku, założonym jako 30 lat.

W artykule (Ksit & Sarnowska, 2017) przedstawiono analizę możliwości modernizacji przegród zewnętrznych budynku mieszkalnego w celu dostosowania go do stan-

andardu budynku pasywnego NF15. Zaproponowano konkretne rozwiązania materiałowe, przeprowadzono analizę wilgotnościową przegród oraz oszacowano koszty zastosowanych rozwiązań.

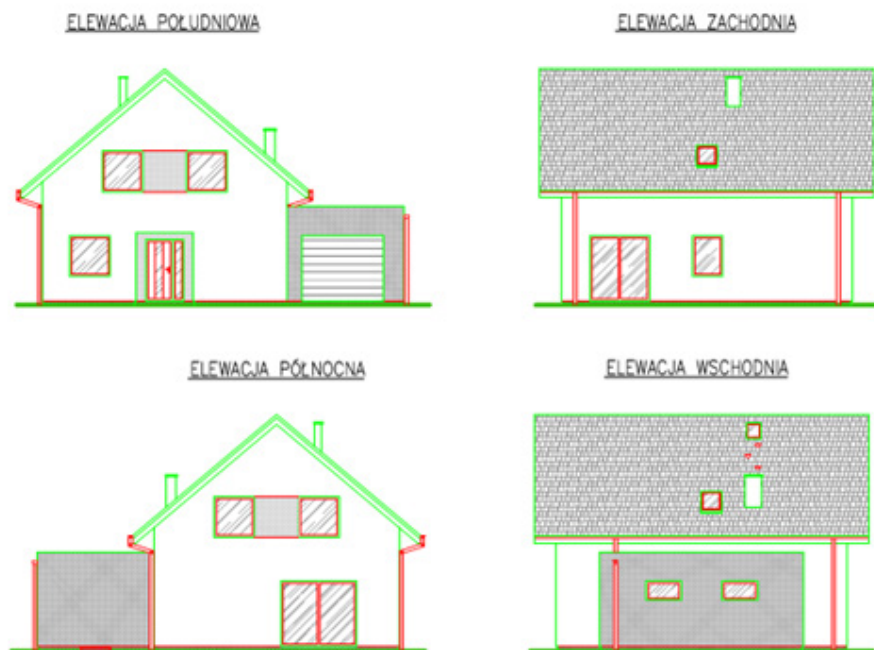
Osiągnięcie standardu budynku pasywnego w przypadku modernizacji istniejących obiektów nie zawsze jest możliwe, ze względu na warunki konstrukcyjne oraz usytuowanie budynku. Często w ścianach piwnic trudno uniknąć mostków cieplnych, nawet po gruntownym remoncie. W przypadku takich budynków w Instytucie Domów Pasywnych (PHI) opracowano standard pośredni EnerPHit. Jest to standard energooszczędnej termomodernizacji istniejących budynków z wykorzystaniem elementów domu pasywnego, który dopuszcza nieco wyższe zużycie energii, pod warunkiem spełnienia wszystkich kryteriów komfortu cieplnego (Passive House Institute, 2026). Szczegółowy opis renowacji istniejącego budynku wielorodzinnego w Danii pod tym kątem przedstawiono w opracowaniu (Rose i in., 2022). Wyniki zużycia energii przed i po renowacji porównano za pomocą metody sygnatury energetycznej, w której wykorzystano wyniki pomiarów. Zużycie energii grzewczej spadło o ponad 50%. Okazało się, że osiągnięcie standardu pasywnego nie było możliwe, ale budynek spełnił wymagania certyfikacji renowacji budynków pasywnych EnerPHit.

Na podstawie przedstawionych przykładów można założyć, że możliwość uzyskania standardu pasywnego dla istniejącego budynku zależy od rozwiązań konstrukcyjnych oraz usytuowania konkretnego budynku, a opłacalność ekonomiczna od wyjściowego stanu ochrony cieplnej oraz zastosowanych rozwiązań termomodernizacyjnych. Każdy budynek wymaga indywidualnej analizy, w celu uzyskania wiarygodnych danych dotyczących modernizacji obiektu.

Założenia przyjęte do analizy

Rozpatrywany budynek

Analizę przeprowadzono dla budynku mieszkalnego jednorodzinnego, usytuowanego w okolicy Gliwic (Rysunek 1), który został wzniesiony w latach 90. XX wieku na osiedlu domów jednorodzinnych. Budynek o powierzchni użytkowej/ogrzewanej równej 168,4 m², częściowo podpiwniczony, z poddaszem użytkowym i nieogrzewanym garażem wyposażony jest w wentylację naturalną. Konstrukcja tradycyjna – murowana (z pustaków typu Max z izolacją ze styropianu o grubości 3 cm), stropy żelbetowe monolityczne, więźba dachowa drewniana pokryta dachówką ceramiczną. Obecny stan techniczny budynku można określić jako dobry. Przegrody zewnętrzne budynku spełniały wymagania ochrony cieplnej w momencie wznoszenia budynku, czyli wymagania zawarte w normie (PNB, 1991). Współczynniki przenikania ciepła U w W/(m²·K) wynoszą: 0,70 dla ścian zewnętrznych, 0,30



Rysunek 1. Analizowany budynek jednorodzinny. Źródło: opracowanie własne
Figure 1. Analyzed single-family Building. Source: authors' own study

dla dachu i stropodachu, 0,55 dla stropu nad nieogrzewaną piwnicą, 2,6 dla okien i drzwi zewnętrznych.

Należy zwrócić uwagę, że rozmieszczenie pomieszczeń w budynku względem stron świata jest nietypowe. Od północy na parterze zlokalizowano salon z otwartą przestrzenią na hol i kuchnię, a na piętrze główną sypialnię wraz z gabinetem. Od strony południowej na parterze zlokalizowano sypialnię gościnną, wiatrołap oraz garderobę bez okna, a na piętrze dwie sypialnie. Udział przeszklenia w ścianie zewnętrznej od strony północnej wynosi 38%, południowej 25%, zachodniej 28%, wschodniej 8%.

Istniejącym źródłem ciepła jest kocioł olejowy dwufunkcyjny z otwartą komorą spalania i dwustawną regulacją procesu spalania. Kocioł olejowy wraz z zasobnikiem c.w.u. umieszczone są w piwnicy nieogrzewanej, przewody armatura i urządzenia znajdują się również w przestrzeni nieogrzewanej i nie posiadają izolacji. W budynku zainstalowane są grzejniki bez automatycznej regulacji miejscowej. Instalacja centralnego ogrzewania od momentu oddania budynku do użytkowania nie była modernizowana. Instalacja c.w.u. nie jest wyposażona w układ cyrkulacyjny.

W ramach planowanych prac modernizacyjnych, przeznaczenie stref mieszkalnych oraz usytuowanie okien i drzwi nie ulegną zmianie. Z uwagi na wstępne założenia zakresu termomodernizacji (nie przewidziano zmiany funkcji pomieszczeń, ani powierzchni przeszklenia), nie jest możliwa modyfikacja powierzchni przeszklenia ani ich usytuowania. Pozostawienie przeszkleń na istniejącym poziomie może utrudnić osiągnięcie założeń standardu pasywnego, w którym to usytuowanie budynku i przeszklenia względem stron świata odgrywają znaczącą rolę.

Założenia do termomodernizacji budynku

Przy wyborze ulepszeń termomodernizacyjnych zwrócono uwagę na możliwość i zasadność zastosowania każdego zaproponowanego rozwiązania. Zwrócono szczególną uwagę na ocieplenie przegród i likwidację mostków cieplnych oraz wykorzystanie odnawialnych źródeł ener-

gii. Nie przewidziano systemu chłodzenia budynku. Rozpatrywane są dwa warianty termomodernizacji: do standardu niskoenergetycznego oraz pasywnego. Przewidziano zastosowanie instalacji fotowoltaicznej, bez magazynu energii, zlokalizowanej na dachu budynku od strony zachodniej. Założono, że instalacja fotowoltaiczna pokrywa zużycie energii elektrycznej w systemach c.o i c.w.u. w ciągu roku w ilości: 40% w budynku niskoenergetycznym, a 50% w budynku pasywnym. W budynku pasywnym zapotrzebowanie na ciepło dla systemu ogrzewania i wentylacji jest niewielkie w porównaniu do zapotrzebowania na ciepło na potrzeby ciepłej wody użytkowej. Ciepła woda może być podgrzewana w okresie, gdy instalacja PV wytwarza prąd elektryczny, co pozwala zwiększyć bieżące wykorzystanie energii produkowanej przez instalację fotowoltaiczną.

W przypadku termomodernizacji budynku do standardu niskoenergetycznego/pasywnego przewidziano taką izolację przegród, że wszystkie współczynniki przenikania ciepła są niewiele mniejsze lub równe od wymaganych w przepisach dla budynków NF40/NF15 (KAPE, 2012).

Założono, że szczelność budynku odpowiada wymaganiom dla budynków niskoenergetycznych ($n_{50} \leq 1 \text{ h}^{-1}$) i pasywnych ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) (KAPE, 2012).

Poniżej przedstawiono wprowadzone ulepszenia termomodernizacyjne dla wariantu niskoenergetycznego/pasywnego, spełniające wymagania wg (KAPE, 2012):

- izolacja ścian zewnętrznych (płyty izolacyjne EPS gr. 20/30 cm, $U = 0,14/0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja ścian zewnętrznych w piwnicy (płyty izolacyjne EPS gr. 16/25 cm, $U = 0,14/0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja ścian wewnętrznych pomiędzy strefą nieogrzewaną (garażem) a strefą ogrzewaną (płyty izolacyjne EPS gr. 20/30 cm, $U = 0,14/0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja podłogi w posadzce parteru (płyty izolacyjne EPS gr. 10/25 cm, $U = 0,20/0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja podłogi w piwnicy (płyty izolacyjne EPS gr. 8/22 cm, $U = 0,21/0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja dachu nad garażem (płyty izolacyjne EPS gr. 18/22 cm, $U = 0,12/0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- izolacja stropodachu pomiędzy strefą ogrzewaną

i nieogrzewaną, skosów w powierzchni ogrzewanej poddasza (płyty ISOVER Multimax – wełna mineralna 15/22 cm, $U = 0,12/0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),

- wymiana stolarki okiennej i drzwiowej na przeznaczoną do budownictwa energooszczędnego/pasywnego z ciepłym montażem (okna z energooszczędnym pakietem 3-szybowym z ciepłą ramką dystansową, szkłem niskoemisyjnym oraz wypełnieniem przestrzeni międzyszybowej argonem, okna połaciowe trzykomorowe z wypełnieniem przestrzeni międzyszybowej kryptonem, drzwi drewniano-aluminiowe o wielowarstwowej konstrukcji płytowej z rdzeniem izolacyjnym z pianki termoizolacyjnej; współczynnik przenikania ciepła: $U = 1,00/0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- wymiana bramy garażowej (z blachy stalowej ocynkowanej, wypełnionej sztywną pianką poliuretanową, z uszczelkami obwodowymi i międzypanelowymi, grubość paneli 0,40/0,65 cm, $U = 1,00/0,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- zastosowanie mechanicznej wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła (rekuperator z odzyskiem ciepła o projektowanej sprawności 85/93%, a w budynku pasywnym zastosowano dodatkowo gruntowy wymiennik ciepła),
- wymiana instalacji centralnego ogrzewania (izolacja przewodów, armatury i urządzeń w przestrzeni nieogrzewanej, zastosowanie wysokosprawnej pompy obiegowej ze sterowaniem PWM, ogrzewanie niskotemperaturowe podłogowe, sprężarkowa powietrzna pompa ciepła, napędzana elektrycznie, 35/28°C, zasobnik ciepła w systemie ogrzewania w przestrzeni nieogrzewanej),
- wymiana instalacji ciepłej wody użytkowej (izolacja przewodów, zastosowanie układu cyrkulacyjnego z ograniczeniem czasu pracy, nowy zasobnik ciepłej wody użytkowej),
- zastosowanie instalacji fotowoltaicznej (11/9 szt.) paneli fotowoltaicznych o wymiarach 1700×1100×35 mm),
- likwidacja mostków cieplnych w ścianach zewnętrznych oraz zmniejszenie współczynnika liniowego przenikania mostków cieplnych dla stolarki okiennej, drzwiowej oraz bramy garażowej.

Tabela 1. Sprawności instalacji dla rozpatrywanych wariantów. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Installation efficiencies for the considered variants. Source: authors' own study

Wariant	Stan istniejący	Standard niskoenergetyczny	Standard pasywny
Ciepła woda użytkowa			
Sprawność wytwarzania ciepła η_{wg}	0,65	2,6	2,6
Sprawność akumulacji ciepła η_{ws}	0,60	0,85	0,85
Sprawność przesyłu ciepłej wody η_{wd}	0,60	0,80	0,80
Sprawność wykorzystania η_{we}	1	1	1
Sprawność całkowita η_{wtot}	0,23	1,77	1,77
Centralne ogrzewanie			
Sprawność wytwarzania ciepła η_{Hg}	0,86	3,00	3,00
Sprawność akumulacji ciepła η_{Hs}	1	0,93	0,93
Sprawność przesyłu ciepłej wody η_{Hd}	0,80	0,90	0,90
Sprawność regulacji i wykorzystania η_{He}	0,77	0,85	0,85
Sprawność całkowita η_{Htot}	0,53	2,13	2,13

Sprawności w instalacjach c.o i c.w.u. przyjęto zgodnie z rozporządzeniem w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku (Minister Infrastruktury, 2015) i przedstawiono w Tabeli 1.

Metody obliczeniowe

Obliczenia projektowego obciążenia cieplnego oraz rocznego zapotrzebowania na ciepło (na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji) przeprowadzono przy zastosowaniu inżynierskiego programu obliczeniowego Purmo OZC Basic 6,7 (SANKOM,), zgodnie z normami (PN, 2006, 2008). Zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody użytkowej, roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku,

zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemów technicznych w budynku oraz wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użytkową EU , końcową EK i nieodnawialną pierwotną EP obliczano zgodnie z rozporządzeniem w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku (Minister Infrastruktury, 2015).

Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP (wyrażony w $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$) stanowi ważne kryterium oceny energetycznej budynku. Określa ilość energii niezbędnej do pokrycia zapotrzebowania budynku na jego ogrzewanie, wentylację, chłodzenie oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej, a w budynkach niemieszkalnych dodatkowo ilość energii na cele oświetlenia wbudowanego. Wskaźnik ten jest wyliczany w audytach i świadectwach charakterystyki energetycznej, zgodnie z rozporządzeniem (Minister Infrastruktury, 2015). Maksymalne dopuszczalne wartości tego wskaźnika dla

różnych typów budynków nowowznoszonych są podane w Warunkach Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022). W niektórych programach dofinansowania termomodernizacji, za uzyskanie po termomodernizacji budynku wskaźnika EP takiego jak wymagany w nowym budynku lub nawet mniejszego, przyznawana jest dodatkowa premia, a w niektórych przypadkach wymagane jest uzyskanie EP niższego od wymaganego w przepisach.

Do obliczeń w programie obliczeniowym założono odpowiednio następujące wartości szczelności powietrznej n_{50} : budynek istniejący/niskoenergetyczny/pasywny 4,0/1,0/0,4 h^{-1} .

Wyniki obliczeń

W Tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń potrzeb ciepłych budynku dla trzech wariantów: stanu istniejącego oraz po modernizacji do standardu niskoenergetycznego i pasywnego.

Wartości strat ciepła przez przenikanie Q_{str} oraz wentylację Q_{ve} w poszczególnych miesiącach roku dla trzech wariantów przedstawiono na Rysunku 2.

Straty ciepła przez przenikanie po termomodernizacji zmniejszyły się kilkukrotnie w stosunku do stanu istniejącego, co jest wynikiem ocieplenia przegród, minimalizacji mostków cieplnych i wymiany okien. Straty ciepła przez wentylację po termomodernizacji zmniejszyły się również kilkukrotnie w stosunku do stanu istniejącego, co jest wynikiem zastosowania wysokosprawnej wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła. Straty ciepła w miesiącach letnich wynikają z przyjętej metody obliczeń metodą bilansów średniomiesięcznych, w której średnie miesięczne temperatury powietrza zewnętrznego (dla referencyjnych danych klimatycznych) są w zakresie 17–18 °C – są niższe od przyjętej w pomieszczeniu temperatury równej 20 °C.

W Tabeli 3 przedstawiono wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użytkową EU , końcową EK , nieodnawialną pierwotną EP do ogrzewania, wentylacji i przygotowania c.w.u. Wskaźnik EP wyliczono w przypadku częściowego pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną z instalacji fotowoltaicznej: 40% niskoenergetyczny, 50% pasywny. Wyliczono również dodatkowe wskaźniki: wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji EU_{co} (bez przygotowania ciepłej wody użytkowej), wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną bez zastosowania instalacji fotowoltaicznej (przy zasilaniu prądem elektrycznym z sieci) EP_{bezPV} , a także wyodrębnioną wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowania na końcową energię pomocniczą końcową (elektryczną) EK_{el} dla instalacji c.o., wentylacji i c.w.u. w budynku.

Dla budynków niskoenergetycznego i pasywnego w nawiasach w tabelce podano wartości przyjmowane jako kryteria dla poszczególnych standardów. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, po termomodernizacji analizowanego budynku, możliwe jest uzyskanie wskaźników energetycz-

Tabela 2. Wyniki obliczeń potrzeb ciepłych budynku. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Results of the building's thermal needs calculations. Source: authors' own study

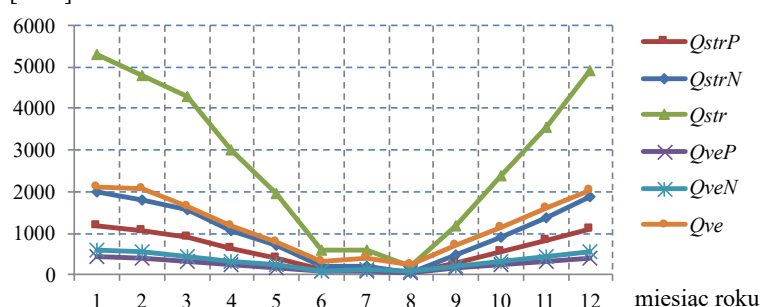
Wariant	Projektowe obciążenie cieplne	Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji
	kW	kWh/rok
Stan istniejący	15	29 188
Standard niskoenergetyczny	5,5	5 625
Standard pasywny	3,3	1 807

Tabela 3. Zestawienie wskaźników energetycznych dla rozpatrywanych wariantów. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Summary of energy indicators for the considered variants. Source: authors' own study

Wariant	EU	EK	EP	EPbez-PV	EUCO	EKel
	kWh/(m ² ·rok)					
Istniejący	197	433	–	481	173	3,2
Niskoenergetyczny	57	43	64	107	33 (≤40)	13,4
Pasywny	35	31 (≤42)	39	78	11 (≤15)	12,7

Q_{str} , Q_{ve}
[kWh]



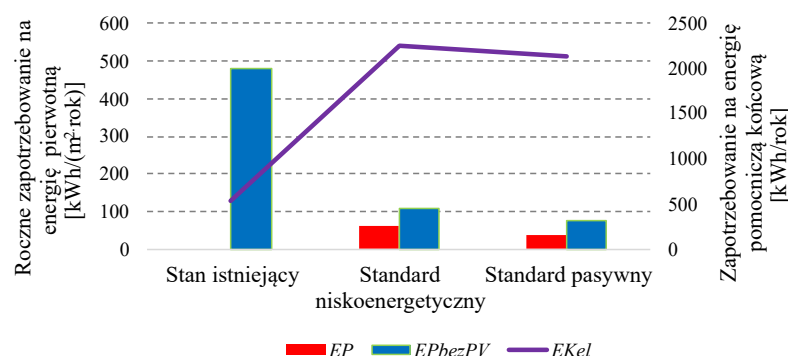
Rysunek 2. Straty ciepła przez przenikanie oraz wentylację w poszczególnych miesiącach roku. Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Heat losses through heat transfer and ventilation in subsequent months of the year. Source: authors' own study

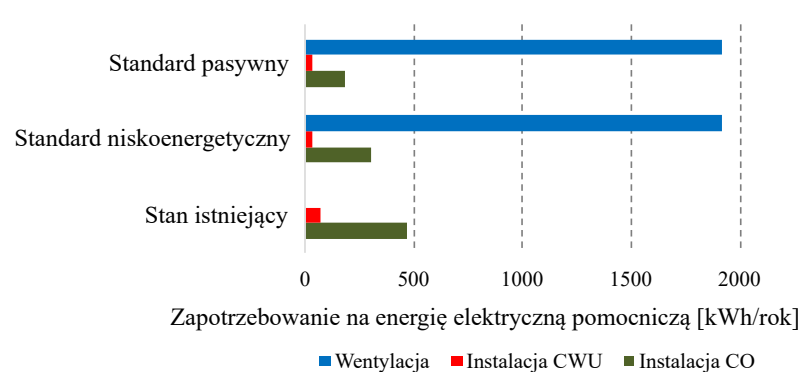
nych charakteryzujących budynki niskoenergetyczne i pasywne. Wskaźniki *EU*, *EK* i *EP* znacznie się obniżyły. Poprzez ocieplenie przegród, minimalizację mostków cieplnych oraz zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła uzyskano wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użytkową dla ogrzewania i wentylacji na poziomie przyjmowanym dla budynków niskoenergetycznych i pasywnych. Zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji *EU_{co}* obniżyło się o 81% dla budynku niskoenergetycznego oraz o 94% dla budynku pasywnego. Po modernizacji systemów: ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i wentylacji zapotrzebowanie na energię końcową dla budynku obniżyło się o 90% dla budynku niskoenergetycznego oraz o 93% dla budynku pasywnego.

Należy zwrócić uwagę, że nawet w przypadku zastosowania źródła ciepła wykorzystującego energię odnawialną – pompy ciepła do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, w przypadku zasilania sprężarki prądem elektrycznym z sieci, nie jest możliwe uzyskanie wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną *EP* wymaganego dla nowych budynków jednorodzinnych zgodnie z WT (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), wynoszącego 70 kWh/(m²·rok). Zastosowanie instalacji fotowoltaicznej w budynku, pokrywającej część zapotrzebowania na energię elektryczną umożliwia uzyskanie wskaźnika *EP* spełniającego takie wymagania.

Na Rysunku 3 przedstawiono porównanie wskaźników rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną dla budynku w stanie istniejącym i po prze-



Rysunek 3. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną oraz na energię pomocniczą końcową. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Indicators of annual demand for non-renewable primary energy and final auxiliary energy. Source: authors' own study



Rysunek 4. Zapotrzebowanie na energię elektryczną pomocniczą. Źródło: opracowanie własne
Figure 4. Auxiliary electricity demand. Source: authors' own study

prowadzonych pracach termomodernizacjach dla obydwu wariantów. Przedstawiono dwie wartości wskaźnika: z zainstalowaną instalacją fotowoltaiczną oraz bez instalacji fotowoltaicznej (przy zasilaniu budynku w energię elektryczną z sieci). Na wykresie zobrazowano również zmianę rocznego zapotrzebowania na energię pomocniczą końcową (energię elektryczną do zasilania instalacji wyposażenia technicznego w budynku).

Widoczne jest znaczne obniżenie wskaźników rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną po modernizacji w stosunku do stanu istniejącego. Zauważalny jest również wzrost wartości wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię pomocniczą końcową. Po termomodernizacji zapotrzebowanie na końcową energię elektryczną do napędu urządzeń pomocniczych wzrosło czterokrotnie w stosunku do wartości w stanie istniejącym. Wzrost ten jest skutkiem zmiany systemu wentylacji budynku – wprowadzeniu dodatkowych elektrycznych urządzeń pomocniczych w układzie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła.

Na Rysunku 4 zestawiono zapotrzebowanie na energię elektryczną pomocniczą w podziale na instalację ogrzewania, wentylacji i ciepłej wody użytkowej w każdym z analizowanych wariantów.

W analizowanych wariantach niskoenergetycznym oraz pasywnym, wartość zapotrzebowania na energię elektryczną pomocniczą dla układów wentylacji i ciepłej wody użytkowej jest jednakowa, natomiast w systemie ogrzewania jest różna. Wynika to z czasu użytkowania urządzeń pomocniczych, czyli długości trwania sezonu grzewczego.

Zaproponowane działania termomodernizacyjne w znaczący sposób wpływają na długość trwania sezonu grzewczego, czyli czasu pracy urządzeń pomocniczych w systemie ogrzewania. Długość sezonu grzewczego zmniejszyła się z ok. 7 miesięcy (5088 godzin) dla budynku istniejącego do ok. 5 miesięcy (3624 godzin) dla standardu niskoenergetycznego i ok. 3 miesięcy (2160 godzin) dla standardu pasywnego.

Dyskusja dotycząca możliwości dostosowania istniejących budynków do standardu niskoenergetycznego i pasywnego

Termomodernizacja budynków, mająca na celu poprawę efektywności energetycznej, wiąże się z szeregiem technicznych ograniczeń, które mogą wpływać na skuteczność działań oraz prowadzić do czasowych problemów eksploatacyjnych. W trakcie przeprowadzanej analizy rozpatrywanego budynku sprawdzano ewentualne techniczne ograniczenia, które mogłyby uniemożliwić część działań termomodernizacyjnych. Poniżej wymieniono najczęściej spotykane ograniczenia w budownictwie jednorodzinnych:

1. Mała wysokość kondygnacji uniemożliwiająca docieplenie posadzki – w budynkach o wysokości pomieszczeń mniejszej

niż 2,50 m zastosowanie warstwy izolacji termicznej w posadzce prowadziłoby do zmniejszenia wysokości użytkowej poniżej wymaganych norm budowlanych; ogranicza to możliwość ułożenia warstw izolacyjnych i nowej wylewki, szczególnie przy zachowaniu istniejących poziomów progów, schodów i okien. Skutkiem ograniczenia jest konieczność pozostania przy istniejącej podłodze lub wykonania kosztownej przebudowy (np. obniżenie stropu nad piwnicą lub podniesienie dachu).

2. Brak możliwości docieplenia ściany zewnętrznej z uwagi na usytuowanie budynku przy granicy działki – budynki posadowione bezpośrednio przy granicy działki lub w odległości mniejszej niż 0,5 m od niej nie pozwalają na zastosowanie zewnętrznej izolacji (np. styropian, wełna mineralna) bez naruszenia prawa budowlanego i przepisów dotyczących odległości od granicy działki.
3. Słaba nośność stropu uniemożliwiająca zastosowanie ciężkich systemów dociepleniowych dachu lub stropodachu – w przypadku stropów drewnianych lub płyt kanałowych o niewielkiej nośności, dodanie ciężkiej warstwy izolacyjnej (np. grubych płyt wełny mineralnej z obciążeniem balastowym) może przekroczyć dopuszczalne obciążenie użytkowe konstrukcji. Skutkiem ograniczenia jest konieczność zastosowania lżejszych, często mniej efektywnych materiałów izolacyjnych lub wykonania wzmocnień konstrukcyjnych, co zwiększa koszty modernizacji.
4. Brak możliwości poprawnego wykonania ciągłości izolacji termicznej w strefie fundamentowej – w starszych budynkach fundamenty często są płytkie, bez izolacji przeciwwilgociowej i termicznej; docieplenie strefy cokołowej i przejścia fundament-ściana zewnętrzna może być technicznie utrudnione (np. brak dostępu, obecność schodów, tarasów). Skutkiem ograniczenia jest powstawanie liniowych mostków termicznych na styku ściany z gruntem, co powoduje zwiększone straty ciepła oraz możliwość kondensacji pary wodnej i zawilgocenia przegrody.
5. Problemy z instalacją stolarki energooszczędnej w istniejących otworach okiennych – istniejące ściany mogą mieć niestandardowe grubości, niską nośność lub niewłaściwe ościeża, co utrudnia montaż nowoczesnych, głębokich okien z potrójnymi szybami; dodatkowo, montaż w warstwie ocieplenia może nie być możliwy bez ingerencji w konstrukcję ściany. Skutkiem ograniczenia jest konieczność stosowania okien o mniejszych gabarytach lub rezygnacja z optymalnego osadzenia w warstwie izolacji.
6. Brak możliwości modernizacji systemu wentylacji przy ociepleniu przegród; termomodernizacja zmniejsza infiltrację powietrza, co przy istniejącej wentylacji grawitacyjnej może skutkować jej niewydolnością; brak kanałów wentylacyjnych lub trudność w ich wykonaniu (np. w stropach prefabrykowanych) może uniemożliwić montaż wentylacji mechanicznej. Skutkiem ograniczenia jest wzrost wilgotności wewnętrznej, ryzyko rozwoju pleśni i pogorszenie jakości powietrza w budynku.
7. Brak przestrzeni technicznej dla instalacji systemów OZE lub nowoczesnych źródeł ciepła; kotłownie w sta-

rych budynkach często nie spełniają wymaganych parametrów (np. wysokości, wentylacji, dostępu serwisowego); dach może mieć niewłaściwe nachylenie lub orientację dla instalacji fotowoltaicznej. Skutkiem ograniczenia może być brak możliwości zastosowania rozwiązań wykorzystujących OZE, lub konieczność gruntownej przebudowy pomieszczeń technicznych.

Podsumowanie

Po gruntownej analizie technicznych możliwości rozwiązań modernizacyjnych w wybranym budynku jednorodzinnym zaproponowano kompleksową termomodernizację, obejmującą: ocieplenie przegród, wymianę stolarki okiennej i drzwiowej, instalację pompy ciepła, układu wentylacyjnego z rekuperacją oraz instalacji fotowoltaicznej. Zaprezentowane koncepcje rozwiązań w analizowanym budynku jednorodzinnym z lat 90. XX wieku umożliwiły osiągnięcie standardu niskoenergetycznego i pasywnego. Pomimo nieoptymalnego rozmieszczenia przeszklenia, okazało się możliwe spełnienie wymagań nawet standardu pasywnego. Po termomodernizacji zapotrzebowanie na energię użytkową dla ogrzewania i wentylacji obniżyło się o 81% dla budynku niskoenergetycznego oraz o 94% dla budynku pasywnego, a zapotrzebowanie na energię końcową obniżyło się o 90% dla budynku niskoenergetycznego oraz o 93% dla budynku pasywnego, ze względu na zastosowanie wysokosprawnych, efektywnych energetycznie instalacji wyposażenia technicznego budynku.

Ważnym czynnikiem determinującym przyjmowane rozwiązania dostosowania istniejącego budynku do standardu pasywnego jest na pewno koszt przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. Teoretycznie termomodernizację można przeprowadzić, ale należałoby przeanalizować, czy inwestycja jest opłacalna dla inwestora. Możliwe jest też otrzymanie dofinansowania czy dotacji do termomodernizacji w różnych programach wspierających termomodernizację lub rozliczenie ulg podatkowych. Niniejsze opracowanie nie obejmowało analizy opłacalności ekonomicznej przeprowadzonej termomodernizacji.

Należy też zwrócić uwagę, że zakres przedstawionych niezbędnych prac termomodernizacyjnych wiąże się dla mieszkańców nie tylko z dużymi kosztami finansowymi, ale i z koniecznością wyprowadzki na czas realizacji inwestycji, co nie zawsze jest możliwe. Natomiast końcowym efektem będą nie tylko niższe koszty eksploatacji budynku, ale też lepszy komfort cieplny i jakość powietrza wewnętrznego, co zapewni: lepsza izolacja przegród oraz bardziej efektywne systemy ogrzewania i wentylacji. Tym samym nastąpi poprawa warunków życia mieszkańców.

Podziękowania

Praca była wspierana w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Politechniki Śląskiej w 2026 roku.

Bibliografia

Dyrektywa. (2010). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w spra-

- wie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona). (2010). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L, 153/13. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj> (Dostęp z 05.05.2026)
- Dyrektywa. (2023). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej oraz zmiany rozporządzenia (UE) 2023/955 (wersja przekształcona). (2023). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L, 231/1. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj> (Dostęp z 05.05.2026)
- Dyrektywa. (2024). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona). (2024). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L, 2024/1275. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj> (Dostęp z 05.05.2026)
- Godlewski, T., Mazur, Ł., Szlachetka, O., Witowski, M., Łukasik, S., & Koda, E. (2021). Design of passive building foundations in the Polish climatic conditions. *Energies*, 14(23), 7855. <https://doi.org/10.3390/en14237855>
- GUS. (2024). Warunki mieszkaniowe w Polsce w świetle wyników Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań 2021. *Urząd Statystyczny w Lublinie – Ośrodek Statystyki Gospodarki Mieszkaniowej i Komunalnej*, pod kierunkiem K. Markowskiego, 2024. <https://stat.gov.pl/spisy-powszechne/nsp-2021/nsp-2021-wyniki-ostateczne/warunki-mieszkaniowe-w-polsce-w-swietle-wynikow-narodowego-spisu-powszechnego-ludnosci-i-mieszkan-2021,5,2.html> (Dostęp z 05.05.2026)
- Instytut Energii Odnawialnej. (2025). Domy jednorodzinne 2025: Źródła grzewcze, stan energetyczny, plany inwestycyjne. https://iee.org.pl/wp-content/uploads/2025/07/Domy-jednorodzinne-2025-raport_final.pdf (Dostęp z 05.05.2026)
- Juchniewicz-Lipińska, L. (2008). The First Certified Passive House in Poland. *Architectus*, 2, 75-79.
- KAPE. (2012). Określenie podstawowych wymogów, niezbędnych do osiągnięcia oczekiwanych standardów energetycznych dla budynków mieszkalnych oraz sposobu weryfikacji projektów i sprawdzenia wykonanych domów energetycznych, *Krajowa Agencja Poszanowania Energii*. https://www.cire.pl/pliki/1/wytyczne_do_programu_domow_energooszczednych.pdf (Dostęp z 05.05.2026)
- Ksit, B., & Sarnowska, R. (2017). Modernizacja projektu budynku mieszkalnego do standardu NF15 z analizą kosztorysową ścian zewnętrznych. *Przegląd Budowlany*, 88.
- Mach, A., Parra, M., & Teamah, H. (2025). Post-Occupancy evaluation of a passive Multi-Unit residential building and a Single-Family passive house. *Sustainability*, 17(9), 3799. <https://doi.org/10.3390/su17093799>
- Marciniak, M., & Ujma, A. (2019). Ocena opłacalności dostosowania obiektu mieszkalnego do standardu budynku pasywnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Budownictwo*, 174(24), 232-238. <https://doi.org/10.17512/znb.2018.1.36>
- Minister Infrastruktury. (2015). Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 roku w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. z 2015 roku poz. 376 ze zmianami).
- Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225).
- Passive House Institute. (2026). <https://passivehouse.com/en/home/building-certification/#certification> (Dostęp z 05.05.2026)
- PKN. (1991). PN-B-02020:1991 Ochrona cieplna budynków: Wymagania i obliczenia. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2006). PN-EN 12831:2006. Instalacje grzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2008). PN-EN ISO 13790: 2008. Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- Rose, J., Kragh, J., & Nielsen, K. F. (2021). Passive house renovation of a block of flats – Measured performance and energy signature analysis. *Energy and Buildings*, 256, 111679. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111679>
- SANKOM. Program Purmo OZC Basic 6.7 do obliczania projektowego obciążenia cieplnego budynku i sezonowego zużycia energii. Pobrano z Purmo: <https://www.purmo.com/pl-pl/pliki-do-pobrania/programy-komputerowe> (Dostęp z 05.05.2026)
- Siuta-Oлча, A., Cholewa, T., & Guz, Ł. (2011). *Analiza porównawcza potrzeb energetycznych jednorodzinnych budynków mieszkalnych o różnym standardzie wykonania*. Proceedings of ECOpole - Tom Vol. 5, No. 1 (2011)

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.



Analiza wpływu systemu wentylacji na jakość powietrza i zapotrzebowanie na energię w zmodernizowanym budynku szkoły

Analysis of the impact of ventilation systems on indoor air quality and energy demand in a retrofitted school building



Dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-4742-5263](https://orcid.org/0000-0002-4742-5263)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska

joanna.ferdyn-grygierek@polsl.pl



Dr hab. inż. Krzysztof Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-7049-1939](https://orcid.org/0000-0002-7049-1939)

Wydział Budownictwa

Politechnika Śląska

Słowa kluczowe: szkoła, wentylacja, zużycie energii, efektywność energetyczna, jakość powietrza, symulacja energetyczna

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę efektywności energetycznej i jakości powietrza w budynku szkoły podstawowej po termomodernizacji w zależności od przyjętej strategii wentylacji. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sprzężonej symulacji dynamicznej (EnergyPlus-CONTAM), uwzględniającej rzeczywiste warunki użytkowania obiektu, emisję zanieczyszczeń oraz zmienność warunków zewnętrznych. Rozpatrzono cztery warianty wentylacji: grawitacyjną, hybrydową z wietrzeniem, mechaniczną o stałym strumieniu powietrza oraz mechaniczną ze zmiennym strumieniem sterowanym stężeniem CO₂. Wykazano, że wentylacja grawitacyjna nie zapewnia wymaganej jakości powietrza, ponad 80% czasu użytkowania sal lekcyjnych przypada na najniższą kategorię jakości (stężenie CO₂ > 1750 ppm), mimo bardzo niskiego zużycia energii. Wprowadzenie wietrzenia poprawia warunki środowiska (udział kategorii IV spada do 16%), jednak ponad 50% czasu nadal nie spełnia wymagań normowych, a zużycie energii wzrasta o ok. 170%. Zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła pozwala na utrzymanie wysokiej jakości powietrza (ponad 95% czasu w kategoriach I–II) przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii o ok. 35% względem wariantu z wietrzeniem. Dodatkowe zastosowanie regulacji wydajności central wentylacyjnych (VAV) umożliwia dalszą redukcję zużycia energii o ok. 6% w skali budynku oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej do napędu wentylatorów o ok. 45%. Wyniki wskazują, że kompleksowa modernizacja budynków szkolnych powinna obejmować nie tylko poprawę izolacyjności przegród, lecz również modernizację systemu wentylacji.

Keywords: school, ventilation, energy consumption, energy efficiency, air quality, energy simulation

Abstract

This paper presents an assessment of energy performance and indoor air quality in a primary school building after thermal retrofitting, depending on the applied ventilation strategy. The analysis was carried out using coupled dynamic simulation (EnergyPlus-CONTAM), taking into account actual occupancy patterns, pollutant emissions, and varying outdoor conditions. Four ventilation scenarios were considered: natural (gravity) ventilation, hybrid ventilation with window airing, mechanical ventilation with constant airflow, and mechanical ventilation with variable airflow controlled by CO₂ concentration. The results show that natural ventilation does not ensure the required indoor air quality, with over 80% of occupied classroom time falling into the lowest quality Category (CO₂ > 1750 ppm), despite very low energy consumption. The introduction of window airing improves indoor conditions (the share of Category IV decreases to 16%); however, for more than 50% of the time, the conditions still do not meet standard requirements, while energy consumption increases by approximately 170%. The use of mechanical ventilation with heat recovery enables maintaining high indoor air quality (over 95% of the time in Categories I–II) while reducing energy consumption by approximately 35% compared to the window airing scenario. The additional application of variable air volume ventilation (VAV) allows for further reduction of energy consumption by about 6% at the building scale and decreases fan electricity use by approximately 45%. The results indicate that comprehensive retrofitting of school buildings should include not only improvements to the thermal envelope but also modernization of the ventilation system.

Wstęp

Zapewnienie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego w budynkach edukacyjnych stanowi jedno z kluczowych zagadnień współczesnej inżynierii środowiska. W ostatnich latach działania modernizacyjne w istniejących obiektach koncentrują się przede wszystkim na poprawie efektywności energetycznej przez docieplenie

przegród zewnętrznych oraz wymianę stolarki okiennej. Prowadzi to jednak do istotnego ograniczenia infiltracji powietrza, co w przypadku braku równoczesnej modernizacji systemu wentylacji skutkuje pogorszeniem jakości środowiska wewnętrznego. Problem ten ma szczególne znaczenie w budynkach szkolnych, gdzie występuje duże zagęszczenie użytkowników oraz znaczna zmienność obciążenia pomieszczeń w ciągu dnia.

Zgodnie z §147 ust. 2 rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), wentylację należy zapewnić w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. Jednocześnie §154 ust. 1 wskazuje, że system wentylacji powinien umożliwiać uzyskanie wymaganej jakości środowiska wewnętrznego przy racjonalnym zużyciu energii. W praktyce oznacza to konieczność poszukiwania rozwiązań zapewniających jednocześnie odpowiednią jakość powietrza oraz wysoką efektywność energetyczną.

W literaturze przedmiotu wielokrotnie wskazywano, że niewystarczająca intensywność wentylacji prowadzi do pogorszenia jakości powietrza wewnętrznego, natomiast jej nadmiar powoduje wzrost zapotrzebowania na energię (Zhang i in., 2021; Fix i in. 2022). Badania prowadzone w różnych warunkach klimatycznych wykazały, że w budynkach wentylowanych naturalnie obserwuje się wyższe stężenia zanieczyszczeń, w tym CO₂, w porównaniu z obiektami wyposażonymi w wentylację mechaniczną (Wallner i in., 2015; Stabile i in., 2019; Rizzo i in., 2024). Jednocześnie podkreśla się istotny wpływ sposobu użytkowania budynku oraz zachowań użytkowników, w szczególności w zakresie wietrzenia pomieszczeń (McGill i in., 2015; Park & Kim, 2012; Pereira i in., 2017).

Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w kontekście termomodernizacji istniejących budynków. Jak wskazują liczne badania, poprawa izolacyjności cieplnej oraz zwiększenie szczelności powłoki zewnętrznej bez modernizacji systemu wentylacji prowadzi do obniżenia intensywności wymiany powietrza i wzrostu stężeń zanieczyszczeń (Măgurean & Petran, 2023; Calama-González i in., 2021; Coggins i in. 2022; Calama-González i in., 2019). Zjawisko to dotyczy zarówno budynków mieszkalnych, jak i użyteczności publicznej, w tym szkół.

W praktyce eksploatacyjnej niedostateczna wentylacja kompensowana jest często przez okresowe otwieranie okien. Rozwiązanie to jest jednak trudne do kontrolowania, zależne od warunków zewnętrznych oraz zachowań użytkowników, a w okresie zimowym prowadzi do znacznych strat energii i dużych wahań warunków cieplnych (Heebøll i in., 2018; Calama-González i in., 2019; Grygierek i in., 2023). Alternatywę stanowią systemy wentylacji mechanicznej, w tym systemy o zmiennej wydajności, w których strumień powietrza dostosowywany jest do aktualnego zapotrzebowania na podstawie pomiarów parametrów jakości powietrza, najczęściej stężenia CO₂ (Li i in., 2022; Ye i in., 2021; Zhuang i in., 2021). Zastosowanie takich systemów umożliwia ograniczenie zużycia energii przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej jakości środowiska wewnętrznego (Zhang i in., 2021; Merema i in. 2018), co potwierdzają również badania prowadzone w budynkach szkolnych (Amanowicz i in., 2019; Rizzo i in., 2024). W praktyce projektowej konieczne jest zatem poszukiwanie rozwiązań zapewniających jednocześnie wysoką jakość powietrza i racjonalne zużycie energii. W ostatnich latach zwraca się uwa-

gę na rozwiązania hybrydowe (mixed-mode ventilation), które łączą zalety wentylacji naturalnej i mechanicznej, umożliwiając poprawę jakości powietrza przy ograniczeniu zużycia energii (Otoo i in., 2024).

W związku z powyższym celem niniejszej pracy jest analiza wpływu różnych strategii wentylacji na jakość powietrza wewnętrznego oraz zapotrzebowanie na energię w budynku polskiej szkoły podstawowej po termomodernizacji. Analizy oparto na wynikach symulacji wydajności budynku z wykorzystaniem programów EnergyPlus i CONTAM, przeprowadzonych w dynamicznych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych z małym krokiem czasowym dla całego sezonu grzewczego.

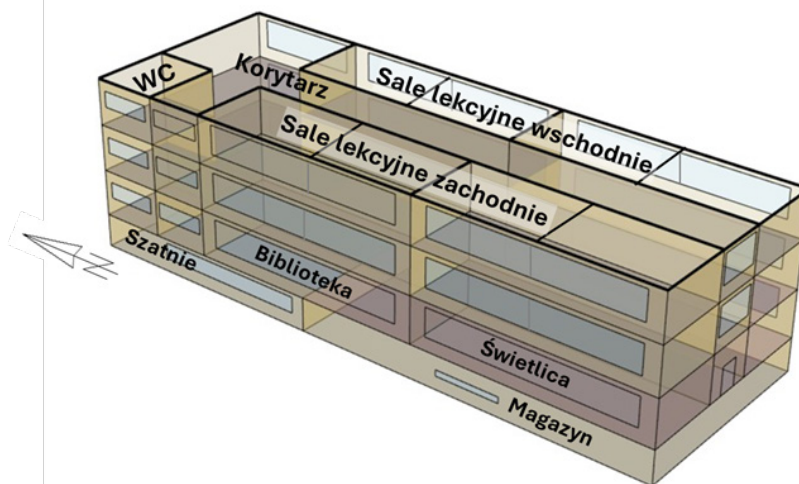
Metodyka

Opis budynku

Obiekt badań stanowi budynek szkoły podstawowej zbudowany w latach 60.–70. XX wieku (tzw. „tysiąclatka”). Budynek jest czterokondygnacyjny (powierzchnia 2912 m² i kubatura 9464 m³), wolnostojący, o zwartej bryle i układzie korytarzowym (Rysunek 1). Posiada 16 typowych sal lekcyjnych o powierzchni 54 m² każda i jedną salę specjalną o powierzchni 108 m², w których uczy się 25 lub 30 uczniów oraz pomieszczenia pomocnicze, takie jak świetlica, biblioteka, toalety (WC), biuro, szatnie (całkowita liczba użytkowników to 440 osób).

Po termomodernizacji przegrody zewnętrzne spełniają aktualne wymagania cieplne ($U \approx 0,15\text{--}0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), a okna ($U_{\text{szyba}} = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) charakteryzują się wysoką szczelnością. Budynek wyposażony jest w instalację ogrzewania wodnego z regulacją miejscową oraz wentylację grawitacyjną (wszystkie pomieszczenia, oprócz korytarzy, wyposażone są w przewody grawitacyjne).

Szkoła użytkowana jest w dni robocze w godzinach 7:00–16:15. Zajęcia dydaktyczne odbywają się w godzinach 8:00–14:35 (45-minutowe lekcje z przerwami 10- i 20-minutowymi), z możliwością zajęć dodatkowych do godz. 16:15. W czasie przerw uczniowie przebywają na korytarzach. Praca administracji odbywa się w godzinach 7:00–15:00.



Rysunek 1. Widok szkoły od strony południowo-zachodniej. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. View of the school from the southwest. Source: authors' own study

Tabela 1. Warianty obliczeniowe. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Calculation variants. Source: authors' own study

Wariant	Rodzaj wentylacji	Opis
1	Naturalna	Wszystkie okna zamknięte; wentylacja wyłącznie grawitacyjna
2	Naturalna z dodatkowym przewietrzaniem	Okna wyposażone w nawiewniki powietrza (pełne otwarcie w godz. 7:00–17:00, w pozostałym czasie przymknięte do ok. 20% wydajności). Sale lekcyjne: wietrzenie przez otwieranie okien (0,8×1,4 m) podczas przerw. WC: wentylacja mechaniczna wywiewna w godzinach użytkowania szkoły (WC damskie 200 m ³ /h, WC męskie 160 m ³ /h), w pozostałym czasie wentylacja grawitacyjna – wentylatory dachowe działają jak wywietrzaki. Pozostałe pomieszczenia: wentylacja grawitacyjna; okna zamknięte.
3	Mechaniczna nawiewno-wywiewna (stały strumień)	Sale lekcyjne: wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna ze stałym strumieniem powietrza 7020 m ³ /h, z odzyskiem ciepła ($\eta_c = 82\%$). Strumień powietrza (ok. 2 h ⁻¹): 390 m ³ /h w salach standardowych oraz 780 m ³ /h w sali specjalnej. System pracuje w godz. 8:00–16:30. W pozostałym czasie: wentylacja grawitacyjna ¹⁾ . WC i pozostałe pomieszczenia: jak w wariantcie 2. Okna zamknięte.
4	Mechaniczna nawiewno-wywiewna (zmienny strumień, VAV)	Sale lekcyjne: wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna ze zmiennym strumieniem powietrza, z odzyskiem ciepła ($\eta_c = 82\%$), sterowana stężeniem CO ₂ (400 ppm → 80 m ³ /h; 1800 ppm → 800 m ³ /h). System pracuje w godz. 8:00–16:30. W pozostałym czasie: wentylacja grawitacyjna ¹⁾ . WC i pozostałe pomieszczenia: jak w wariantcie 2. Okna zamknięte.

¹⁾ Zgodnie z §154 ust. 1 rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022) w godzinach użytkowania zastosowano wentylację mechaniczną, natomiast poza nimi – wentylację grawitacyjną. Oba systemy są dopuszczone (§147 ust. 2), jednak zgodnie z §148 ust. 2 nie mogą pracować jednocześnie, dlatego podczas pracy wentylacji mechanicznej kratki grawitacyjne są zamykane.

Model symulacyjny – dane ogólne

Do analizy zastosowano sprzężoną symulację dynamiczną z wykorzystaniem programów EnergyPlus i CONTAM. EnergyPlus 9.4 (US Department of Energy, Washington, DC, USA) wykorzystano do obliczeń bilansu cieplnego budynku, natomiast CONTAM 3.4 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA) do modelowania przepływów powietrza oraz transportu zanieczyszczeń. Sprzężenie modeli było konieczne ze względu na brak w EnergyPlus dokładnego modelu działania kominów grawitacyjnych, które mają kluczowe znaczenie w analizowanym przypadku.

Model uwzględnił:

- zmienne warunki klimatyczne (Typowe lata meteorologiczne dla Warszawy),
- zyski ciepła od użytkowników (zgodnie z ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017); dla uczniów przyjęto 75% wartości) i oświetlenia (uruchamiane w godzinach użytkowania jeśli natężenie oświetlenia spadnie poniżej 300 lx, moc maksymalna to 5 W/m²),
- emisję CO₂ (0,0032 dm³/s na osobę zgodnie z (Persily & de Jonge, 2017)); stężenie w powietrzu zewnętrznym to 400 ppm,
- harmonogram użytkowania budynku (uwzględniono dni wolne od nauki tj. weekendy, przerwy świąteczne (grudzień i kwiecień), ferie zimowe (2 tygodnie w lutym)).

Budynek podzielono na 21 stref obliczeniowych. Dwie sale lekcyjne leżące obok siebie połączono w jedną strefę (co dało w sumie 8 wersji sal o różnym obciążeniu plus sala specjalna), zakładając w tych salach identyczny plan lekcji. W jedną strefę połączono również WC chłopców i dziewcząt w obrębie jednej kondygnacji.

Model wentylacji

W obliczeniach uwzględniono: infiltrację, przepływy międzystrefowe, działanie kominów grawitacyjnych, wpływ wiatru i wyporu termicznego. Przepływ powietrza przez nieszczelności opisano zależnością potęgową:

$$\dot{V} = a \times l \times (\Delta p)^n, \text{ m}^3/\text{h}$$

gdzie:

- a – współczynnik szczelności, m³/(m·h·Pa ^{n})
- l – długość szczeliny, m
- n – wykładnik charakterystyki potęgowej,
- Δp – różnica ciśnienia, Pa

Na podstawie literatury (Popiołek, 2013; Ferdyn-Grygier i in., 2019) przyjęto następujące wartości a i n :

- dla okien $a = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,67})$, $n = 0,67$,
- dla drzwi wejściowych zewnętrznych $a = 0,14 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,5})$, $n = 0,5$,
- dla drzwi wewnętrznych $a = 2,8 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,5})$, $n = 0,5$.

Założono, że drzwi są zamknięte cały czas. Przewody grawitacyjne przyjęto jako murowane o wymiarach 27×14 cm, chropowatości 3 mm i sumie współczynników strat miejscowych wynoszącej 3,4. Kminy są wysunięte ponad dach na wysokość 1,5 m.

Model ogrzewania

Temperatury obliczeniowe przyjęto następująco: 21°C w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi oraz na korytarzach, 18°C w szatni i 8°C w magazynie. Uwzględniono harmonogram regulacji temperatury – w dni robocze w godzinach 17:00–6:00 oraz w weekendy przyjęto obniżenie temperatury do 18°C. Źródłem ciepła do ogrzania pomieszczeń jest gazowy kocioł o sezonowej sprawności wytwarzania ciepła 94%. Sprawność całego systemu na podstawie rozporządzenie Ministra Infra-

struktury i Rozwoju w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015) określono jako 75%.

Warianty obliczeniowe

Program wykonanych analiz opisano w Tabeli 1. Wszystkie obliczenia przeprowadzono z krokiem czasowym 5 minut dla okresu grzewczego od października do kwietnia.

Jako wskaźnik jakości powietrza przyjęto stężenie CO₂ w salach lekcyjnych. Przyjęto kryteria jakości środowiska zgodne z PN-EN 16798-1 (PKN, 2019): I kategoria – 550 ppm ponad tło, II kategoria – 800 ppm ponad tło, III kategoria – 1350 ppm ponad tło.

Jako wskaźnik efektywności cieplnej przyjęto wskaźnik energii końcowej (E_k) dla całego budynku oraz dla porównania tylko dla sal lekcyjnych. Rozpatrywano dwa okresy uśredniania wyników:

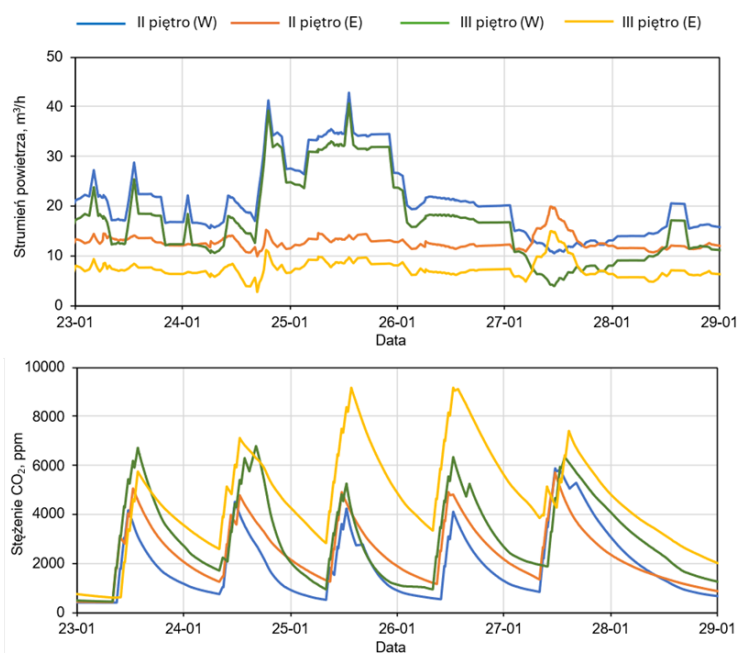
- czas trwania lekcji (netto) – dla określania przeciętnego stężenia CO₂ w salach lekcyjnych,
- cała doba bez względu na rodzaj dnia – dla określania przeciętnej liczby wymian powietrza w pomieszczeniach i zapotrzebowania na energię budynku.

Wyniki

Wentylacja i jakość powietrza

W przypadku wentylacji naturalnej (wariant 1) wymiana powietrza w salach lekcyjnych jest mocno zróżnicowana (Rysunek 2a). Strumień powietrza wywołany siłą wiatru i wyporem hydrostatycznym zależy od usytuowania pomieszczeń w zależności od strony świata i kondygnacji. Pomieszczenia o ekspozycji zachodniej charakteryzuje większa średnia wymiana powietrza. Z kolei najmniejszy przepływ powietrza występuje w pomieszczeniach na ostatniej kondygnacji o ekspozycji wschodniej. Szkołę w tym wariantie charakteryzuje bardzo słaba wentylacja. Przeciętna liczba wymian powietrza świeżego w salach szkolnych jest na poziomie 0,1 h⁻¹ (Tabela 2) i zmienia się w zakresie od 0,09 h⁻¹ w kwietniu do 0,13 h⁻¹ w lutym. W przeliczeniu na strumień powietrza wartość jest rażąco niska, średnio w sezonie nie przekracza 23 m³/h w salach typowych (czyli poniżej 1 m³/h na osobę). Maksymalna obliczona wartość to 122 m³/h w salach na przedostatniej kondygnacji po stronie zachodniej, co daje tylko 5 m³/h na osobę. Jest to wartość zdecydowanie poniżej wartości wymaganej normą PN EN 16798-1 (PKN, 2019) oraz rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022). Następstwem niskiej wymiany powietrza jest wysokie stężenie CO₂ które chwilowo przekracza nawet 6000 ppm (Rysunek 2b).

Na Rysunku 3a przedstawiono skumulowany rozkład stężenia CO₂ we wszystkich salach typowych w czasie ich użytkowania zgodnie z planem lekcji. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych na II piętrze tylko przez 20% czasu można zakwalifikować do III lub lepszej kategorii; w sali bardziej obciążonej tylko przez 10% czasu. W salach na ostatniej kondygnacji, gdzie długość ko-



Rysunek 2. Przebieg zmienności strumienia powietrza i stężenia CO₂ dla wybranego tygodnia w styczniu dla czterech przykładowych sal lekcyjnych o różnej ekspozycji. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Variation of airflow and CO₂ concentration for a selected week in January for four classrooms with different exposures. Source: authors' own study

mina grawitacyjnego jest mała, środowisko można zaklasyfikować do III lub lepszej kategorii przez mniej niż 10% czasu użytkowania sal. Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom średnio przez mniej niż 5% czasu ich użytkowania.

Powszechną praktyką stosowaną w szkołach jest przewietrzanie sal lekcyjnych w czasie przerw, dlatego w wariantie 2 przetestowano wpływ regularnego otwierania okna (pełne otwarcie) o wymiarach 0,8×1,4 m na każdej przerwie między lekcjami wg planu lekcji. Jest to założenie najbliższe rzeczywistości. Otwieranie okna w czasie lekcji w okresie zimowym jest rzadko stosowane i niezalecane, ponieważ powoduje dyskomfort cieplny uczniów, szczególnie tych siedzących blisko okna. Dodatkowo ten zabieg generuje duży hałas z zewnątrz (dotyczy szkół zlokalizowanych w centrach miast).

W wariantie 2 średnia liczba wymian w typowych salach lekcyjnych wzrosła, w stosunku do przypadku bez otwierania okien, o 280–400% w zależności od usytuowania pomieszczenia (Tabela 2). Tak znaczący wzrost wymiany powietrza jest spowodowany nie tylko otwieraniem okien w czasie przerw lekcyjnych, ale również rozszczelnieniem wszystkich okien za pomocą nawiewników okiennych oraz zastosowania wentylacji mechanicznej wywiewnej w toaletach. W toaletach liczba wymian powietrza zewnętrznego wzrosła z rażąco niskiej wartości poniżej 0,1 h⁻¹ do 0,5 h⁻¹ przy systemie wentylacji mechanicznej wywiewnej. Średnio tylko połowa powietrza wywiewanego przez wentylatory jest powietrzem zewnętrznym zasysanym przez okna w toaletach, reszta pochodzi z korytarzy oraz innych pomieszczeń sąsiadujących z korytarzami, w tym sal lekcyjnych. Dzięki temu poprawia się również znacząco wentylacja w strefach korytarzy szkolnych, które graniczą przez drzwi z toaletami, a które przy braku kanałów grawitacyjnych mają słabą wymianę powietrza.

Tabela 2. Średnie (C_{avg}) i maksymalne (C_{max}) w sezonie stężenie CO_2 oraz średnia liczba wymian powietrza (N_{avg}) w salach lekcyjnych.

Źródło: opracowanie własne

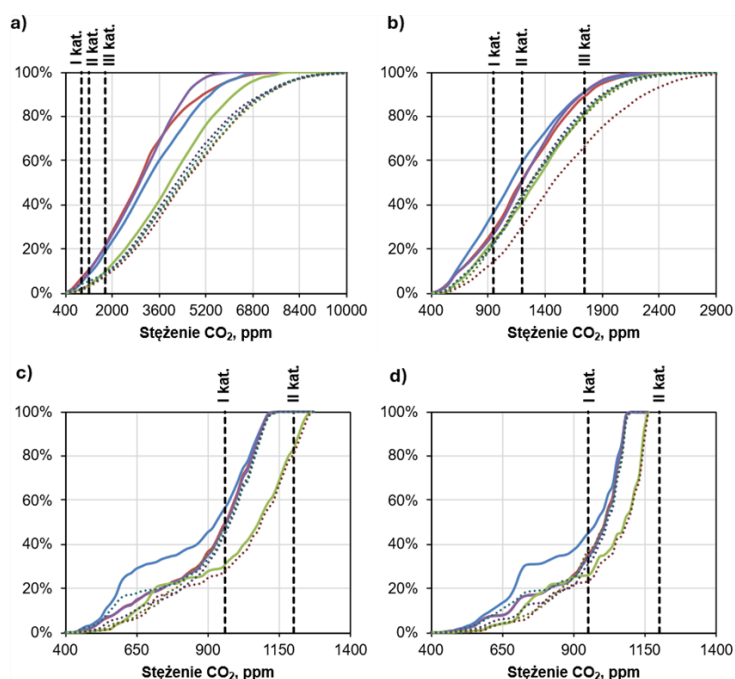
Table 2. Average (C_{avg}) and maximum (C_{max}) CO_2 concentrations during the season and the average air change rates (N_{avg}) in classrooms. Source: authors' own study

Wariant	Kond.	I piętro	II piętro				III piętro			
	Ekspoz.	E	E	E	W	W	E	E	W	W
	Liczba uczniów	25/30 sala specjalna	30	25	25	25	25	25	30	25
1	C_{avg} , ppm	1542	3976	2921	3014	3268	4429	4372	4570	4529
	C_{max} , ppm	3420	8150	6260	7970	7080	11000	11000	11400	10700
	N_{avg} , h ⁻¹	0,13	0,11	0,11	0,12	0,12	0,08	0,08	0,10	0,10
2	C_{avg} , ppm	888	1325	1202	1211	1143	1318	1303	1533	1332
	C_{max} , ppm	1910	3740	2950	3060	2990	3670	3160	3930	3380
	N_{avg} , h ⁻¹	0,31	0,45	0,42	0,43	0,44	0,39	0,40	0,37	0,42
3	C_{avg} , ppm	647	1001	904	901	849	907	927	1021	924
	C_{max} , ppm	817	1270	1130	1130	1130	1130	1130	1270	1130
	N_{avg} , h ⁻¹	0,55	0,53	0,53	0,54	0,54	0,52	0,52	0,53	0,53
4	C_{avg} , ppm	737	1001	941	939	893	941	962	1018	959
	C_{max} , ppm	903	1160	1090	1090	1090	1090	1090	1160	1090
	N_{avg} , h ⁻¹	0,30	0,38	0,33	0,34	0,35	0,37	0,37	0,38	0,39

Na I piętrze średniosezonowy strumień powietrza świeżego wzrósł 2,5-krotnie, natomiast na II i III piętrze aż 4-krotnie. Zastosowanie nawiewników okiennych w pozostałych pomieszczeniach bez wentylacji mechanicznej spowodowało zwiększenie strumienia powietrza świeżego blisko 2-krotnie. Stosowanie nawiewników okiennych jako dodatkowego rozszczelnienia powłoki budynku ma również tą zaletę, że można regulować strumień powietrza wentylacyjnego zmniejszając go w czasie nieużytkowania pomieszczeń, codziennie w godzinach nocnych strumień powietrza jest zredukowany kilkukrotnie.

Na wzrost średniej wartości strumienia powietrza ma wpływ nie tylko rozszczelnienie okien ale przede wszystkim ich otwieranie w czasie przerw. Podczas wietrzenia strumień powietrza przekracza 1200 m³/h, osiągając maksymalną wartość 1765 m³/h, co stanowi ponad 9 wymian powietrza na godzinę. Pomimo, że przerwy stanowią tylko niewielką część doby, wietrzenie zwiększyło średniosezonowy strumień powietrza w salach lekcyjnych 2-krotnie. Liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na średnim poziomie 0,4 h⁻¹. Regularne wietrzenie sal poprawia zdecydowanie jakość powietrza w czasie lekcji. Maksymalne stężenie CO_2 jest mniejsze od 4000 ppm, średnio jednak przekracza w salach typowych 1200 ppm. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych na II piętrze aż przez 90% czasu można zakwalifikować do III lub lepszej kategorii (Rysunek 3b); w sali bardziej obciążonej przez 80% czasu. W salach na ostatniej kondygnacji, gdzie długość komina grawitacyjnego jest mała, środowisko można zaklasyfikować do III lub lepszej kategorii przez około 80% czasu użytkowania sal mniej obciążonych i przez ok. 65% czasu użytkowania sali 30-osobowej. Najwyższą I kategorię środowiska

można przypisać pomieszczeniom średnio przez mniej niż 30% czasu ich użytkowania. Należy też pamiętać, że stosowanie wietrzenia wymaga dużej dyscypliny i w praktyce, niestety, wykonywane jest bardzo nieregularnie. Strumień powietrza zewnętrznego sięgający w czasie wietrzenia 1500–1700 m³/h może powodować w okresach niskich



Rysunek 3. Dystrybucja stężenia CO_2 dla sal lekcyjnych typowych usytuowanych na przedostatniej kondygnacji (linie ciągłe) i ostatniej kondygnacji (linie przerywane) dla wariantu 1 (a), wariantu 2 (b), wariantu 3 (c) i wariantu 4 (d). Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Distribution of CO_2 concentration for typical classrooms located on the penultimate floor (continuous lines) and the last floor (dashed lines) for variant 1 (a), variant 2 (b), variant 3 (c) and variant 4 (d). Source: authors' own study

Tabela 3. Wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania i wentylacji oraz wskaźniki jakości powietrza. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Final energy demand indicators for heating and ventilation and air quality indicators. Source: authors' own study

Wskaźnik	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
	Wentylacja naturalna	Wentylacja naturalna dodatkowym wietrzeniem sal	Wentylacja mechaniczna ze stałym strumieniem powietrza	Wentylacja mechaniczna ze zmiennym strumieniem powietrza
$E_{k, ogrz+went (sale)}$, kWh/m ² ¹⁾	14,4	49,9	21,1	17,9
Zmiana $E_{k(sale)}$ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	+ 247%	– 58%	– 15%
$E_{k, ogrz+went (budynek)}$, kWh/m ² ²⁾	10,9	29,2	19,1	18,0
$E_{elektryczna}$, kWh/m ² ²⁾	–	0,3	1,6	1,0
Zmiana $E_{k(budynek)}$ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	+ 169%	– 35%	– 6%
Średnia liczba wymian powietrza w budynku, h ⁻¹	0,1	0,3	0,4	0,3
Średnie stężenie CO ₂ w salach lekcyjnych, ppm	3747	1265	905	938
Zmiana średniego stężenia CO ₂ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	– 66%	– 28%	+ 4%
¹⁾ w odniesieniu do powierzchni sal lekcyjnych ²⁾ w odniesieniu do powierzchni całego budynku				

temperatur zewnętrznych znaczne lokalne obniżenia temperatury wewnętrznej, co może być źródłem dużego dyskomfortu w początkowych okresach lekcji.

Po wprowadzeniu systemu wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej (wariant 3) średniosezonowa liczba wymian w typowych salach lekcyjnych wzrosła, w stosunku do przypadku z otwieraniem okien, średnio o ok. 30%. W toaletach i innych pomieszczeniach nielekcyjnych liczba wymian powietrza zewnętrznego jest na tym samym poziomie co w wariantie 2 (system pozostał niezmienny). Maksymalna liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na poziomie 2,1 h⁻¹, co wynika z projektowego strumienia powietrza wentylacyjnego. Można również zauważyć spadek średniej liczby wymian w grudniu, lutym i kwietniu, co jest spowodowane przerwami świątecznymi lub feriami (w tych okresach system wentylacji mechanicznej nie był uruchamiany). W miesiącach, z wszystkimi tygodniami „pracującymi” liczba wymian jest praktycznie na stałym poziomie 0,6 h⁻¹.

W salach 30-osobowych stężenie CO₂ tylko nieznacznie przekracza 1200 ppm; w salach 25-osobowych maksymalna wartość nie przekracza 1200 ppm. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych przez 100% czasu można zakwalifikować do co najmniej II kategorii środowiska; w sali bardziej obciążonej przez 85% czasu (Rysunek 3c). Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom mniej obciążonym przez ok. 50% czasu ich użytkowania, bardziej obciążonym przez 30% czasu. Jakość powietrza w czasie lekcji jest na zdecydowanie lepszym poziomie niż w przypadku wietrzenia sal w czasie przerw (wariant II).

Po wprowadzeniu zmiennego strumienia powietrza w systemie wentylacji mechanicznej (wariant 4) średniosezonowa liczba wymian powietrza w typowych salach lekcyjnych zmniejszyła się, w stosunku do przypadku ze stałym strumieniem powietrza, o 26–38% w zależności od sali. Największy efekt (–45%) uzyskano w dużej kubatu-

rowo sali specjalnej, przy zapewnieniu jakości powietrza na podobnym poziomie. W godzinach użytkowania pomieszczeń przebieg zmienności strumienia powietrza pokrywa się z przebiegiem zmienności stężenia CO₂. W tym wariantie maksymalna liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na poziomie 2,5 h⁻¹, czyli jest większa od projektowego strumienia powietrza dla wariantu 3. Średni strumień powietrza dostarczany przez system wentylacji mechanicznej do sal typowych jest natomiast aż o 36% mniejszy od wartości projektowej wariantu 3 i wynosi 250 m³/h (1,3 h⁻¹). Dlatego też średniosezonowa liczba wymian w salach lekcyjnych jest zdecydowanie mniejsza w stosunku do wariantu 3, średnio o 32%.

W wariantie 4 jakość powietrza w salach lekcyjnych jest na bardzo dobrym poziomie. W żadnej z sal maksymalna wartość stężenia CO₂ nie przekracza poziomu II kategorii środowiska (1200 ppm) wg normy PN EN 16798-1 (PKN, 2019). Stężenia CO₂ w poszczególnych salach są do siebie bardzo zbliżone i ich wartości średnie różnią się w typowych salach o maksymalnie 125 ppm. W wariantie 3 różnice te były większe i wynosiły 175 ppm. System sterowania dostosowuje strumień powietrza do potrzeb, co daje korzyści zwłaszcza w salach bardziej obciążonych.

Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom mniej obciążonym przez prawie 40% czasu ich użytkowania, bardziej obciążonym przez 25% czasu (Rysunek 3d). To kryterium wypadło nieco gorzej w porównaniu z wariantem 3. Jednak jakość środowiska we wszystkich salach zawsze spełnia kryteria kategorii II. Średnio jakość powietrza w czasie lekcji jest na podobnym poziomie jak w wariantie 3.

Zapotrzebowanie na ciepło

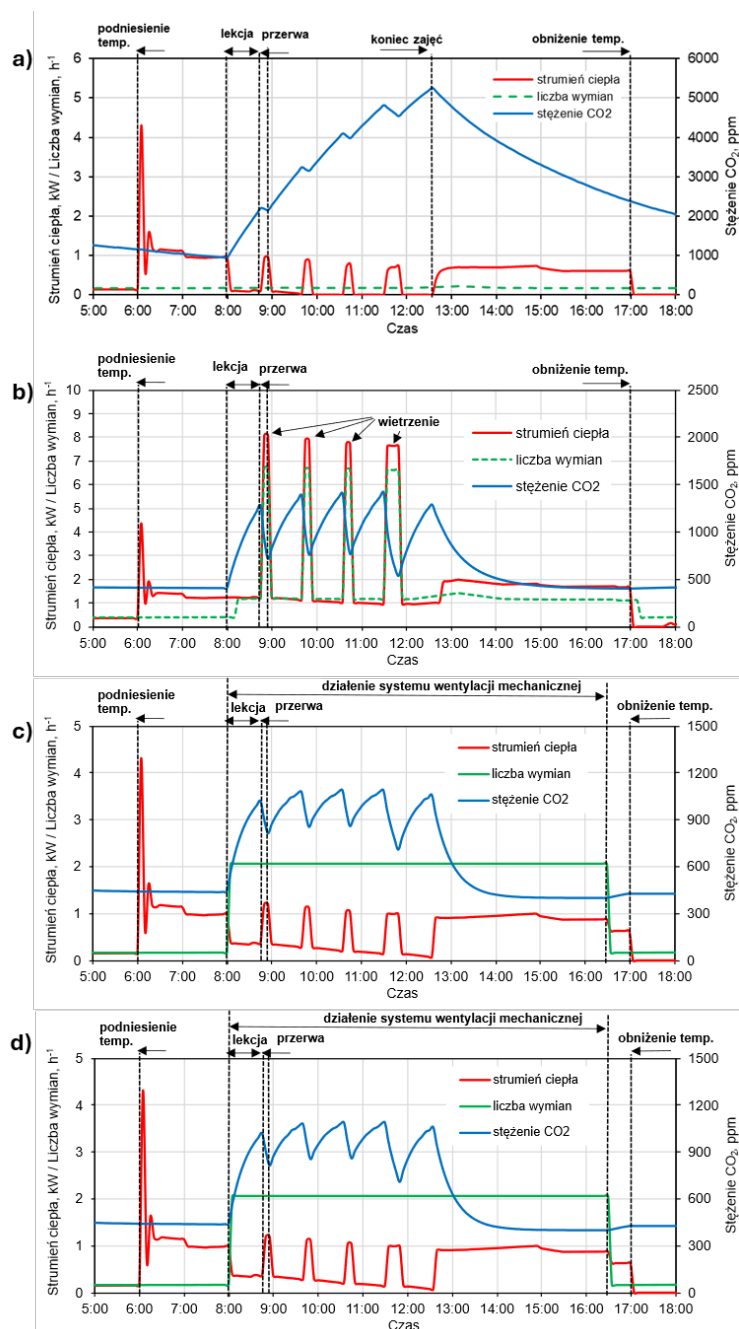
Tabela 3 zawiera wskaźniki energii końcowej oraz średniosezonową liczbę wymian powietrza w budynku. Z kolei, na Rysunku 4 zobrazowano chwilowy strumień powietrza, stężenie CO₂ i strumień ciepła dla rozpatrywa-

nych wariantów w jednym dniu stycznia w sali na ostatniej kondygnacji w której uczy się 25 uczniów.

W wariantcie 1 (wentylacja grawitacyjna, szczelne okna) sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku wynosi 23,7 MWh, co po uwzględnieniu sprawności systemu ogrzewania odpowiada wskaźnikowi energii końcowej na poziomie 11 kWh/m² w skali budynku. Należy jednak podkreślić, że tak niska energochłonność jest wynikiem bardzo małej intensywności wymiany powietrza (ok. 0,1 h⁻¹), a nie wysokiej efektywności energetycznej budynku. Chwilowe zapotrzebowanie na ciepło w salach lekcyjnych charakteryzuje się dużą zmiennością, wynikającą zarówno ze zmiennego obciążenia pomieszczeń, jak i zmian strumienia powietrza wentylacyjnego. Jak pokazano na Rysunku 4a, największe zapotrzebowanie występuje w godzinach porannych (ok. 6:00), po zakończeniu obniżenia nocnego, kiedy wymagane jest szybkie podniesienie temperatury wewnętrznej. Wprowadzenie obniżen nocnych i weekendowych temperatury do 18°C pozwala na uzyskanie ok. 22% oszczędności energii użytkowej. W okresach przejściowych (październik, kwiecień) umożliwia to nawet całkowite wyłączenie ogrzewania przez znaczną część czasu. Należy jednak uwzględnić zwiększone zapotrzebowanie na moc szczytową oraz możliwość chwilowego niedogrzenia pomieszczeń w godzinach porannych, które w przypadku sal lekcyjnych jest kompensowane przez zyski ciepła od użytkowników. W ciągu dnia obserwuje się spadki zapotrzebowania na ciepło związane z zyskami wewnętrznymi od użytkowników, natomiast w czasie przerw następuje jego ponowny wzrost. Zmienność ta jest skorelowana ze zmianami stężenia CO₂, które w warunkach szczelnej powłoki budynku nie obniża się do poziomu tła w godzinach nocnych, co powoduje pogorszenie jakości powietrza już na początku dnia użytkowania. Sytuacja pogarsza się na każdej kolejnej lekcji.

W wariantcie 2 (wietrzenie i nawiewniki) obserwuje się istotny wzrost chwilowego zapotrzebowania na ciepło w okresach otwierania okien (Rysunek 4b). Napływ zimnego powietrza powoduje wzrost chwilowej mocy grzewczej nawet do ośmiokrotności wartości bazowej. W skali sezonu prowadzi to do około 2,5-krotnego wzrostu zużycia energii – wskaźnik energii końcowej jest na poziomie 29,2 kWh/m². Ta zmienność jest skorelowana ze zmianami stężenia CO₂. W czasie przerwy stężenie CO₂ spada znacząco, jednak cały czas pozostaje powyżej poziomu tła. Przy rozszczelnionych oknach stężenie CO₂ spada do poziomu tła w nocy, co nie było możliwe przy szczelnych oknach w wariantcie 1. Wzrost zużycia energii jest bardziej znaczący w salach lekcyjnych i sięga prawie 50 kWh/m² na skutek konieczności podgrzania dużej ilości powietrza zewnętrznego. Dodatkowo w tym wariantcie pojawia się zużycie energii elektrycznej związane z pracą wentylatorów wywiewnych (ok. 0,8 MWh). Należy podkreślić, że poprawa jakości powietrza w tym wariantcie odbywa się kosztem bardzo wysokiej energochłonności oraz pogorszenia stabilności warunków cieplnych.

Zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (wariant 3) prowadzi do istotnej poprawy efektywno-



Rysunek 4. Przebieg zmienności chwilowego zapotrzebowania na ciepło, stężenia CO₂ i wymiany powietrza w przykładowej sali lekcyjnej (sala zachodnia na ostatniej kondygnacji – 25 osób) we wtorek 25.01 dla wariantów: 1 (a), 2 (b), 3 (c) i 4 (d). Źródło: opracowanie własne
Figure 4. Variation of instantaneous heat demand, CO₂ concentration and air change rates in an example classroom (western room on the top floor – 25 people) on Tuesday, January 25, for variants: 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d). Source: authors' own study

ści energetycznej przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej jakości powietrza. Pomimo zwiększenia strumienia powietrza wentylacyjnego, sezonowe zapotrzebowanie na ciepło sal lekcyjnych spada o ok. 55%. Odzysk ciepła stosowano tylko w salach lekcyjnych, natomiast inne usprawnienia wpływające na zwiększenie strumienia powietrza wprowadzono w budynku pozostały niezmienione w stosunku do wariantu 2, w związku z czym całkowite zapotrzebowanie na ciepło budynku spadło o 35%. W salach lekcyjnych redukcja zapotrzebowania na ciepło sięga ok. 55%. W okresach przejściowych możliwe jest okresowe wyłączenie ogrzewania. Wzrost zużycia energii elektrycz-

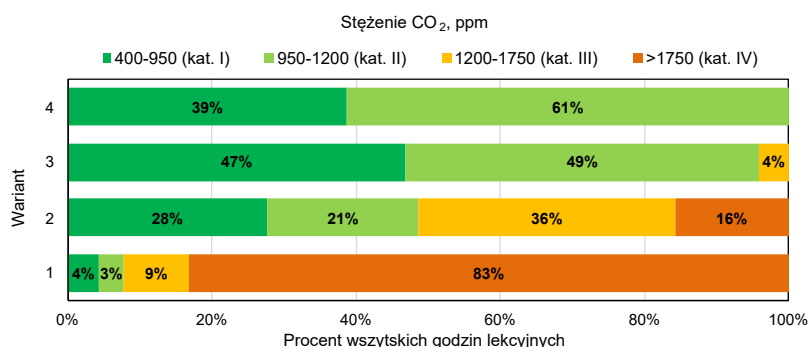
nej związany z pracą central wentylacyjnych i wentylatorów wywiewnych wynosi ok. 4,6 MWh w sezonie.

W wariancie 4 zastosowanie regulacji wydajności wentylacji w funkcji stężenia CO₂ pozwala na dalszą optymalizację zużycia energii. Średni strumień powietrza wentylacyjnego jest niższy niż w wariancie ze stałym przepływem, co przekłada się na redukcję zapotrzebowania na ciepło w salach lekcyjnych o ok. 16%. W skali całego budynku efekt ten wynosi ok. 6%, a wskaźnik sezonowe zapotrzebowania na ciepło wynosi około 18,0 kWh/m². Jednocześnie zużycie energii elektrycznej przez wentylatory zmniejsza się o ok. 45% i wynosi 2,8 MWh w sezonie.

Dyskusja

Czyste powietrze jest podstawowym wymaganiem dla ludzkiego zdrowia i samopoczucia. Kluczem dla ochrony zdrowia przed negatywnym wpływem zanieczyszczeń powietrza jest polepszenie działania wentylacji. Niestety aby ograniczyć zużycie energii często rozważa się możliwość zmniejszenia ilości powietrza, dlatego ważnym problemem jest znalezienie kompromisu między jakością powietrza wewnętrznego i zużyciem energii.

Na Rysunku 5 przedstawiono częstość występowania stężenia CO₂ w zakresach I, II i III kategorii jakości środowiska wewnętrznego jako procent sumarycznej liczby godzin z wszystkich 17 sal lekcyjnych w czasie ich użytkowania (tylko czas lekcji netto) w całym sezonie grzewczym od października do kwietnia. Wyniki wskazują wyraźnie na istotny wpływ przyjętej strategii wentylacji na jakość powietrza w salach lekcyjnych. W wariancie 1 (wentylacja grawitacyjna) zdecydowana większość czasu użytkowania pomieszczeń (ok. 83%) przypada na najniższą kategorię jakości powietrza (kat. IV >1750 ppm), co świadczy o bardzo złych warunkach środowiska wewnętrznego. Udział czasu, w którym spełnione są wymagania wyższych kategorii (I–II), jest znikomy (łącznie poniżej 10%). Szkoły podstawowe to zazwyczaj budynki niskie, a większość sal znajduje się na ostatnich kondygnacjach, gdzie długość przewodów wentylacji grawitacyjnej jest bardzo mała. W związku z czym stosowane w salach szkolnych systemy wentylacji naturalnej (szczególnie w okresach bezwietrznych) nie są w stanie zapewnić żądanej wymiany powietrza. Rozszczelnienie okien i wprowadzenie wietrzenia (wariant 2) prowadzi do istotnej poprawy jakości powietrza – udział czasu w kategorii IV spada do ok. 16%, jednak nadal przez ponad połowę czasu (ok. 52%) warunki odpowiadają kategoriom III i IV, co oznacza, że wymagania normowe nie są spełnione w sposób stabilny. Ponadto przewietrzanie powoduje znaczny wzrost chwilowej mocy grzewczej w pomieszczeniach, a w okresach niskich wartości temperatury zewnętrznej może powodować lokalne obniżenie temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach. Zastosowanie wentylacji mechanicznej (warianty 3 i 4) prowadzi do zdecydowanej poprawy jakości powietrza. W wariancie 3 ponad 95% czasu użytkowania przypada na kategorie I i II, przy czym niemal połowę stanowi najwyższa kategoria jakości powietrza. W wariancie 4 uży-



Rysunek 5. Rozkład stężenia CO₂ w różnych kategoriach środowiska wewnętrznego (łączna wartość ze wszystkich 17 sal lekcyjnych w trakcie ich użytkowania w sezonie grzewczym). Źródło: opracowanie własne
Figure 5. Distribution of CO₂ concentration in various indoor environment Categories (total value from all 17 classrooms during their use throughout the heating season). Source: authors' own study

skano jeszcze bardziej stabilne warunki – przez 100% czasu spełnione są wymagania co najmniej II kategorii, a dominującą część stanowi kategoria II (ok. 61%) oraz I (ok. 39%).

Jednak projektowanie systemów wentylacyjnych mechanicznej dla budynków szkolnych ma spore ograniczenia. Podstawowym problemem w wielu, nawet wysokorozwiniętych krajach, jest ograniczenie środków finansowych na ich realizację. Z reguły dofinansowanie można otrzymać na wymianę okien i docieplenie przegród zewnętrznych; pozostała część inwestycji – modernizacja systemu wentylacji musi zostać pokryta ze środków własnych (Duda, 2021; NFOŚiGW, 2024). Inwestycję pozwalającą na utrzymanie wysokiej jakości powietrza w istniejących budynkach szkolnych należy traktować jako konieczną dla zdrowia i dobrego samopoczucia uczniów. Taka modernizacja, dzięki możliwości stosowania odzysku ciepła z powietrza usuwanego w salach lekcyjnych, spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania na energię końcową o ok. 35% w stosunku do przypadku z wietrzeniem. W czasie dnia sale charakteryzują się zmiennym obciążeniem, dlatego zastosowanie wentylacji mechanicznej ze zmiennym strumieniem powietrza dało dobre wyniki i pozwoliło w przypadku pojedynczych sal zaoszczędzić ok. 15% ciepła, przy utrzymaniu tak samo wysokiej jakości powietrza. Ponieważ powierzchnia sal lekcyjnych stanowi jedynie 33% powierzchni całego budynku, a czas użytkowania systemu wentylacji mechanicznej stanowi tylko 35% doby od poniedziałku do piątku, dlatego uzyskane oszczędności na ogrzewanie i wentylację całego budynku są na poziomie 6%.

Należy też podkreślić, że dodatkowa energia elektryczna związana z działaniem wentylatorów w bardzo małym stopniu wpływa na koszt utrzymania budynku; przy stałym strumieniu powietrza stanowi 10%, przy zmiennym 7% energii końcowej na ogrzewanie i wentylację. System wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła, stosowany wymiennie z wentylacją naturalną w okresach wolnych od zajęć, jest obecnie najlepszym sposobem zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w szkołach. System taki można stosować w salach lekcyjnych (i ze względów higienicznych w toaletach), w pozostałych pomieszczeniach wystarczająca jest wentylacja naturalna przy zastosowaniu nawiewników okiennych.

Dodatkowym źródłem oszczędności energii jest stosowa-

nie obniżen temperatury w godzinach nocnych i w weekendy. Ze względu na specyfikę użytkowania budynków szkolnych, charakteryzujących się wyraźnie określonymi godzinami eksploatacji oraz długimi okresami nieużytkowania, rozwiązanie to należy uznać za w pełni uzasadnione energetycznie. W analizowanym przypadku wykazano, że pozwala ono na redukcję zużycia energii przekraczającą 20%. W okresach, w których budynek pozostaje nieużytkowany (po godzinach popołudniowych oraz w dni wolne), utrzymywanie temperatury komfortu nie jest konieczne, co uzasadnia wprowadzenie harmonogramów regulacji temperatury.

Wnioski

1. Wentylacja grawitacyjna w budynkach szkolnych po termomodernizacji nie zapewnia wymaganej jakości powietrza wewnętrznego. Zastosowanie szczelnej stolarki okiennej prowadzi do istotnego ograniczenia infiltracji, co skutkuje bardzo niską intensywnością wymiany powietrza oraz przekroczeniami dopuszczalnych stężeń CO₂. Uzyskiwane w takich warunkach niskie zużycie energii ma charakter pozorny i nie powinno być traktowane jako miara efektywności energetycznej budynku.
2. Wietrzenie pomieszczeń nie stanowi efektywnej alternatywy dla systemowej wentylacji. Praktyka polegająca na okresowym otwieraniu okien prowadzi do znacznych, krótkotrwałych wzrostów mocy grzewczej (nawet kilkukrotnych), pogorszenia komfortu cieplnego oraz wysokiego zużycia energii. Jednocześnie nie zapewnia stabilnej jakości powietrza – stężenie CO₂ w dalszym ciągu przekracza wartości zalecane.
3. Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła jest rozwiązaniem optymalnym z punktu widzenia projektowego. Umożliwia ona utrzymanie stężenia CO₂ na poziomie ok. 1000 ppm przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii w porównaniu z wariantem opartym na wietrzeniu. Dodatkowe zużycie energii elektrycznej przez wentylatory ma niewielki udział w bilansie energetycznym i nie stanowi istotnej bariery eksploatacyjnej.
4. Zastosowanie regulacji wydajności wentylacji (np. w funkcji stężenia CO₂) oraz harmonogramów temperatury stanowi kluczowy element optymalizacji energetycznej. Systemy o zmiennym strumieniu powietrza pozwalają na dalsze ograniczenie zużycia energii przy zachowaniu wymaganej jakości powietrza, natomiast stosowanie obniżen temperatury w okresach nieużytkowania budynku umożliwia redukcję zapotrzebowania na energię przekraczającą 20%. W związku z tym kompleksowa modernizacja budynków szkolnych powinna obejmować zarówno poprawę izolacyjności przegród, jak i wdrożenie zaawansowanych systemów wentylacji i sterowania.

Podziękowania

Praca była wspierana w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Politechniki Śląskiej w 2026 roku.

Bibliografia

- Amanowicz, Ł., Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2019). Analiza możliwości stosowania systemu wentylacji zdecentralizowanej w budynkach edukacyjnych. *Instal*, (10), 20–26. <https://doi.org/10.36119/15.2019.10.3>
- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): Atlanta, GA, USA.
- Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment: Comparison of ventilation scenarios for retrofitting classrooms in a hot climate. *Energies*, 12(24), 4607. <https://doi.org/10.3390/en12244607>
- Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2021). Indoor environmental assessment: Comparing ventilation scenarios in pre- and post-retrofitted dwellings through test cells. *Journal of Building Engineering*, 43, 103148. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103148>
- Coggins, A. M., Wemken, N., Mishra, A. K., Sharkey, M., Horgan, L., Cowie, H., Bourdin, E., & McIntyre, B. (2022). Indoor air quality, thermal comfort and ventilation in deep energy retrofitted Irish dwellings. *Building and Environment*, 219, 109236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109236>
- Duda, L. (2021). Wentylacja szkół – warunek konieczny dla rozwoju Polski. Rynek Instalacyjny, 1–2.
- Ferdyn-Grygierek, J., Baranowski, A., Blaszczyk, M., & Kaczmarczyk, J. (2019). Thermal Diagnostics of natural ventilation in Buildings: an Integrated approach. *Energies*, 12(23), 4556. <https://doi.org/10.3390/en12234556>
- Fix, A. J., Pamintuan, B. C., Braun, J. E., & Warsinger, D. M. (2022). Vapor-selective active membrane energy exchanger with mechanical ventilation and indoor air recirculation. *Applied Energy*, 312, 118768. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118768>
- Grygierek, K., Nateghi, S., Ferdyn-Grygierek, J., & Kaczmarczyk, J. (2023). Controlling and Limiting Infection Risk, Thermal Discomfort, and Low Indoor Air Quality in a Classroom through Natural Ventilation Controlled by Smart Windows. *Energies*, 16(2), 592. <https://doi.org/10.3390/en16020592>
- Heebøll, A., Wargocki, P., & Toftum, J. (2018). Window and door opening behavior, carbon dioxide concentration, temperature, and energy use during the heating season in classrooms with different ventilation retrofits—ASHRAE RP1624. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(6), 626–637. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1432938>
- Li, C., Cui, C., & Li, M. (2022). A proactive 2-stage indoor CO₂-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency. *Applied Energy*, 329, 120288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120288>

- Măgurean, A. M., & Petran, H. A. (2023). Analysis of Measured CO₂ Levels through Long-Term Monitoring in Renovated Multifamily Buildings: A Common Case. *Buildings*, 13(8), 2113. <https://doi.org/10.3390/buildings13082113>
- McGill, G., Oyedele, L. O., & McAllister, K. (2015). Case study investigation of indoor air quality in mechanically ventilated and naturally ventilated UK social housing. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 58–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.03.002>
- Merema, B., Delwati, M., Sourbron, M., & Breesch, H. (2018). Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies. *Energy and Buildings*, 172, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.065>
- Minister Infrastruktury i Rozwoju. (2015). Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376, ze zm.).
- Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022 poz. 1225).
- NFOŚiGW (2024). B1.1.3 Wymiana źródeł ciepła i poprawa efektywności energetycznej szkół. Program Priorytetowy „Wymiana źródeł ciepła i poprawa efektywności energetycznej szkół” *Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej*.
- Otoo, C., Lu, T., & Lü, X. (2024). Application of Mixed-Mode ventilation to enhance indoor air quality and energy efficiency in school buildings. *Energies*, 17(23), 6097. <https://doi.org/10.3390/en17236097>
- Park, J., & Kim, H. (2012). A field study of occupant behavior and energy consumption in apartments with mechanical ventilation. *Energy and Buildings*, 50, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.015>
- Pereira, P. F., Ramos, N. M., Almeida, R. M., Simões, M. L., & Barreira, E. (2017). Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions. *Energy Procedia*, 132, 837–842. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.669>
- Persily, A., & De Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- Popiołek, Z. (Ed.). (2013). Poradnik diagnostyki cieplnej budynków (tom 5). *Politechnika Śląska*.
- Rizzo, K., Camilleri, M., Gatt, D., & Yousif, C. (2024). Optimising mechanical ventilation for indoor air quality and thermal comfort in a Mediterranean school building. *Sustainability*, 16(2), 766. <https://doi.org/10.3390/su16020766>
- Stabile, L., Massimo, A., Canale, L., Russi, A., Andrade, A., & Dell’Isola, M. (2019). The effect of ventilation strategies on indoor air quality and energy consumptions in classrooms. *Buildings*, 9(5), 110. <https://doi.org/10.3390/buildings9050110>
- Typowe lata meteorologiczne. Dostęp online <https://dane.gov.pl/dataset/797,typowe-lata-meteorologiczne-i-statystyczne-dane-klimatyczne-dla-obszaru-polski-do-obliczen-energetycznych-budynkow>
- Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J., & Hutter, H. (2015). Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. Wentylacja szkół – warunek konieczny dla rozwoju Polski. *Rynek Instalacyjny*, 12(11), 14132–14147. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114132>
- Ye, Y., Chen, Y., Zhang, J., Pang, Z., O’Neill, Z., Dong, B., & Cheng, H. (2021). Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. *Applied Energy*, 293, 116854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116854>
- Zhang, S., Ai, Z., & Lin, Z. (2021). Novel demand-controlled optimization of constant-air-volume mechanical ventilation for indoor air quality, durability and energy saving. *Applied Energy*, 293, 116954. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116954>
- Zhuang, C., Shan, K., & Wang, S. (2021). Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems. *Building and Environment*, 191, 107588. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107588>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.



Naturalne przepływy powietrza w tunelu drogowym

Natural airflows in a road tunnel



Dr hab. inż. Aleksander Król, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0003-4152-8859](https://orcid.org/0000-0003-4152-8859)
Wydział Transportu i Inżynierii
Lotniczej
Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Małgorzata Król, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0003-0645-4815](https://orcid.org/0000-0003-0645-4815)
Wydział Inżynierii Środowiska
i Energetyki
Politechnika Śląska
malgorzata.król@polsl.pl

Słowa kluczowe: tunel drogowy, pomiary prędkości przepływu, analizy CFD, przepływy naturalne

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przepływu powietrza w skali rzeczywistej, przeprowadzonych w tunelu drogowym, który znajduje się w Gdańsku, pod jednym z ramion Wisły. Całkowita długość tunelu wynosi 1378 m, a jego środkowa część znajduje się najniżej. Nachylenie jezdni wynosi 3% i 4% w obu kierunkach od najniższego punktu. Badania obejmowały pomiary przepływu powietrza w 56 oddzielnych punktach pomiarowych i pozwoliły na określenie ciągu naturalnego. W artykule omówiono również teoretyczne metody określania ciągu naturalnego w tunelach. Zaprezentowano także wzór analityczny służący do obliczania średniej prędkości przepływu powietrza w tunelach, generowanej przez efekt tłoka. Istniejące zależności zostały przeanalizowane i zmodyfikowane w celu lepszego uwzględnienia efektu tłoka pojazdów poruszających się w kolumnie, co pozwala powiązać prędkość przepływu powietrza nie tylko ze średnią prędkością pojazdów, ale także z natężeniem ruchu i jego strukturą. Podejście to zostało zweryfikowane przy użyciu danych zarejestrowanych przez czujniki w tunelu w Gdańsku.

Keywords: road tunnel, flow velocity measurements, CFD analysis, natural flows

Abstract

This article presents the results of full-scale airflow measurements carried out in a road tunnel located in Gdańsk, beneath one of the branches of the Vistula River. The total length of the tunnel is 1.378 m, and its central section is at the lowest level. The road gradient is 3% and 4% in both directions from the lowest point. The study involved airflow measurements at 56 separate measurement points and enabled the determination of natural draught. The article also discusses theoretical methods for determining natural draught in tunnels. An analytical formula for calculating the average airflow velocity in tunnels generated by the piston effect is also presented. Existing relationships were analysed and modified to better account for the piston effect of vehicles moving in a convoy, which allows the airflow velocity to be linked not only to the average vehicle speed, but also to traffic volume and its structure. This approach was verified using data recorded by sensors in the Gdańsk tunnel.

Wstęp

Tunele drogowe są nieodłączną częścią nowoczesnych sieci transportowych. Znajdują się one w obszarach górskich, aby umożliwić przejazd przez góry, na terenach zabudowanych oraz w centrach miast, aby odciążyć ruch miejski. Tunele drogowe wyposażone są w wiele systemów technicznych, wśród których jednym z najważniejszych jest system wentylacyjny. Jego zadaniem jest zapewnienie odpowiednich warunków w tunelu pod względem jakości powietrza i przejrzystości w czasie codziennej eksploatacji, a także odprowadzenia dymu w przypadku pożaru. Ponadto system musi zapewniać odpowiednie warunki do ewakuacji ludzi z tunelu, a także dla działania służb ratowniczych podczas pożaru. System wentylacji w tunelu może być zaprojektowany na różne sposoby, w zależności od długości tunelu, tego, czy w tunelu panuje

ruch jednokierunkowy czy dwukierunkowy oraz w zależności od przewidywanej intensywności i struktury ruchu. Najprostszym i najczęściej stosowanym rozwiązaniem są systemy wentylacji wzdłużnej, w których wentylatory strumieniowe są montowane pojedynczo lub w grupach pod sklepieniem tunelu. W przypadku dłuższych tuneli, projektowany powinien być system wentylacji półprzecnej, w którym działanie wentylatorów strumieniowych jest wspomagane przez boczne otwory nawiewne.

Oprócz systemów wentylacji mechanicznej, na przepływy powietrza w tunelu mają wpływ warunki zewnętrzne. Biorąc pod uwagę zmiany przepływu powietrza, stwierdza się, że kluczową rolę odgrywa wiatr (Król i in., 2017a). Drugim ważnym aspektem jest nachylenie tunelu, które może prowadzić do wystąpienia efektu kominowego, a w konsekwencji do naturalnego przepływu powietrza w tunelu (Sulc i in., 2016; Li i in., 2017; Król & Król,

2017b). Naturalny przepływ powietrza w tunelu może być również spowodowany nasłonecznieniem jednego z portali. Odnosi się to głównie do tuneli pozamiejskich. Wymienione powyżej dwa zjawiska prowadzą do powstania naturalnego ciśnienia generującego przepływ powietrza nazywanego ciągiem naturalnym.

Kolejnym zjawiskiem powodującym przepływ powietrza w tunelu, poza działaniem wentylatorów, jest zjawisko tłoka. Polega ono na tym, że ruch samochodów powoduje przemieszczanie się mas powietrza w tym samym kierunku co jadące samochody (Król i in., 2022). Efekt tłoka ma bardzo duże znaczenie dla przepływu powietrza w tunelach kolejowych lub tunelach metra, gdzie stosunek przekroju wagonu do przekroju tunelu jest wysoki. Poruszający się pociąg wypycha ogromne masy powietrza i rzeczywiście działa jak tłok. W przypadku tuneli drogowych efekt ten nie jest tak duży, ale jednak znaczący i przy analizie niewymuszonych przepływów powietrza, powinien być brany pod uwagę.

Prędkość powietrza rejestrowana przez czujniki zainstalowane w tunelach jest wynikiem działania wszystkich tych zjawisk oraz systemu wentylacji. Analizując przepływy powietrza w tunelach ważne jest rozróżnienie wpływu poszczególnych zjawisk na ostateczną prędkość przepływu powietrza. Równocześnie wskazuje się, że naturalny przepływ powietrza determinuje początkowy kierunek przepływu dymu w przypadku wybuchu pożaru w tunelu (Zhong i in., 2016).

W artykule przedstawiono charakterystykę zjawisk powodujących niewymuszone przepływy powietrza w tunelu. Opisano badania i analizy numeryczne pozwalające na określenie wielkości przepływu generowanego przez poszczególne zjawiska oraz zaproponowano model matematyczny działania efektu tłoka dla przepływu powietrza w tunelu.

Badania w tunelu pod Martwą Wisłą

Tunel położony jest w Gdańsku pod jedną z odnóg Wiśły (Rysunek 1). Całkowita długość tunelu wynosi 1378 m i obejmuje dwie nawy dla ruchu w obu kierunkach. Wysokość każdej z naw wynosi 7,03 m, a szerokość 10,09 m. Tunel biegnie z południowego wschodu (SE) na północny zachód (NW). Tunel jest obustronnie nachylony a jego najniższa część znajduje się mniej więcej w środku tunelu. Nachylenie z kierunku NW wynosi 4%, a z kierunku SE 3%. Nachylenie poprzeczne jezdni wynosi 2,5%. Nawy tunelu są połączone co 170 m wyjściami ewakuacyjnymi. Tunel jest wyposażony w system wentylacji wzdłużnej obsługiwany przez 11 wentylatorów osiowych w każdym tunelu oraz system nawiewu poprzecznego obejmujący 22 otwory nawiewne w każdej nawie i cztery wentylatory nawiewne umieszczone w pobliżu każdego z portali.

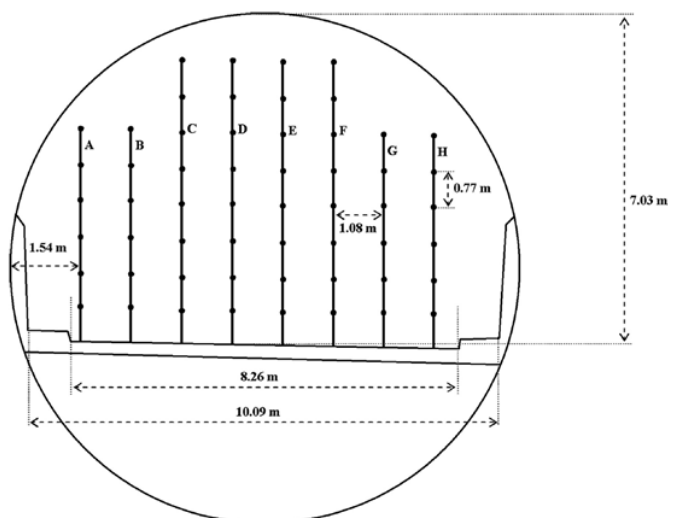
Celem badań było określenie profilu prędkości w poprzecznym przekroju tunelu (Król i in., 2018). W niniejszym artykule przedstawiono tylko wyniki obejmujące badania przy niepracującej instalacji wentylacyjnej tak, aby możliwe było określenie wielkości naturalnego przepływu powietrza. Do pomiarów prędkości powietrza wykorzystano dwa statywy pomiarowe. Ich wysokość wynosiła odpowiednio 6,1 m i 4,5 m (Rysunek 2). Na wyższym statywie zamontowano osiem anemometrów (firmy Sensor),



Rysunek 1. Lokalizacja tunelu pod Martwą Wisłą. Źródło: <https://www.openstreetmap.org>
Figure 1. Location of the tunnel beneath the Martwa Wisła. Source: <https://www.openstreetmap.org>



Rysunek 2. Statywy pomiarowe umieszczone w tunelu. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Stand poles positioned within the tunnel's measurement section. Source: authors' own study



Rysunek 3. Siatka pomiarowa. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Measurement grid. Source: authors' own study

Tabela 1. Warunki meteorologiczne zarejestrowane o godzinie 2:30. Źródło: opracowanie własne**Table 1.** Weather conditions recorded at 2.30 am. Source: authors' own study

	Stacja meteorologiczna przy portalu NW	Stacja meteorologiczna przy portalu SE
Prędkość wiatru, m/s	2,3	3,6
Kierunek wiatru, °	267,8	284,5
Temperatura, °C	13,0	12,7
Ciśnienie, hPa	1020,7	1019,5

a na niższym – sześć. Odległość między anemometrami wynosiła 0,77 m. Statywy były przesuwane podczas pomiarów zgodnie z Rysunek 3. Prędkość powietrza rejestrowano po ustabilizowaniu się przepływu (kilka minut po każdym przesunięciu statywów). Umożliwiło to uzyskanie 56 punktów pomiarowych w badanym przekroju. Przekrój pomiarowy był usytuowany w odległości 520 m od portalu północno-zachodniego (NW).

Jedna z serii pomiarowych obejmowała pomiary prędkości przepływu powietrza przy niepracujących wentylatorach, pozwoliło to na zmierzenie ciągu naturalnego.

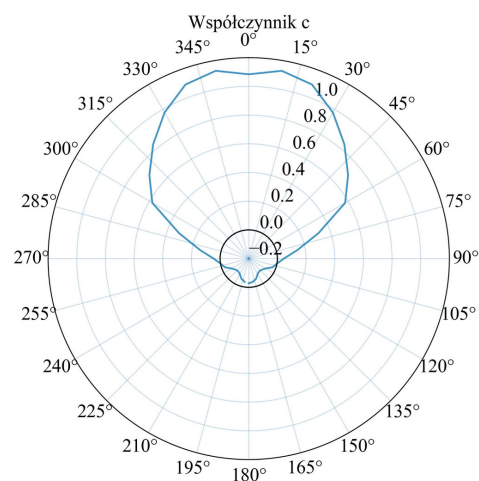
Równocześnie z pomiarami przepływu powietrza prowadzono pomiary warunków meteorologicznych. Na zewnątrz tunelu zlokalizowane były dwie stacjonarne stacje meteorologiczne firmy Lufft UMB Sensor. Pierwsza stacja znajdowała się w odległości 206 m od portalu południowo-wschodniego. Czujniki temperatury i ciśnienia znajdowały się na wysokości 2,5 m. Czujnik wiatru znajdował się na wysokości 7,0 m. Druga stacja znajdowała się w odległości 397 m od portalu północno-zachodniego. Czujniki temperatury i ciśnienia znajdowały się na tej samej wysokości jak przypadku pierwszej stacji, natomiast czujnik wiatru umieszczono na wysokości 11,0 m. Rozmieszczenie czujników wiatru pozwalało na wiarygodne pomiary prędkości i kierunku wiatru na zewnątrz tunelu.

Pomiar trwał około 15 minut, czas ten obejmował również zmiany położenia statywów. Każdy punkt pomiarowy składał się z sześciu pojedynczych pomiarów trwających 30 sekund, których wyniki uśredniono w czasie 3 minut. Wartości średnie i odchylenia standardowe stanowiły wyniki końcowe.

Badania wymagały całkowitego zamknięcia tunelu, dlatego były prowadzone w nocy. Pomiary, przy wyłączonych wentylatorach, rozpoczęły się o godzinie 2:40. Warunki meteorologiczne były monitorowane przez cały czas trwania badań. Poniżej przedstawiono parametry zarejestrowane o godzinie 2:30.

Identyfikacja ciągu naturalnego

Ciąg naturalny powstaje w wyniku działania wiatru i efektu kominowego. Wiatr napierający na portal nawietrzny powoduje powstanie nadciśnienia, a na portalu zawietrznym powstaje podciśnienie. Różnica ciśnienia na obu portalach jest przyczyną wzdłużnego przepływu powietrza. Wartość ciśnienia (p_{wiatr}) generowanego przez

**Rysunek 4.** Zależność współczynnika c od kąta napływu wiatru. Źródło: opracowanie własne**Figure 4.** Relationship between the coefficient c and the wind angle. Source: authors' own study

wiatr o prędkości v_{wiatr} może być opisana wzorem (1).

$$p_{\text{wiatr}} = c \frac{\rho v_{\text{wiatr}}^2}{2} \quad (1)$$

Współczynnik c silnie zależy od kierunku wiatru i ukształtowania otoczenia portalu. Jego dokładne określenie dla pełnej róży wiatrów wymaga z reguły przeprowadzenia serii symulacji numerycznych. Symulacje dla tunelu pod Martwą Wisłą przeprowadzono przy użyciu pakietu ANSYS Fluent, modelując wiernie portale tunelu wraz z otoczeniem w promieniu 100 m. W wyniku tych symulacji ustalono, że wartość podciśnienia na portalu zawietrznym jest co najmniej o rząd wielkości mniejsza od nadciśnienia na portalu nawietrznym i może być pominięta w rozważaniach. Otrzymaną zależność współczynnika c od kąta napływu wiatru na portal pokazano na Rysunku 4 (Król i in., 2022).

Efekt kominowy pojawia się w nachylonych tunelach, gdy ściany tunelu mają inną temperaturę niż otoczenie. Napływające do tunelu zewnętrzne powietrze ogrzewa się, jego gęstość zmniejsza się i jest wypierane ku górze. Wielkość efektu kominowego można liczbowo wyrazić jako różnicę ciśnienia pomiędzy portalami tunelu, powodującą wzdłużny ruch powietrza. Wartość tego ciśnienia może być określona z równania wyrażającego pracę wytworzoną w całym cyklu na jednostkę masy (2) (Budryk, 1961).

$$H_t = - \oint \frac{dp}{\rho} \quad (2)$$

W praktyce obliczenia byłyby łatwiejsze, gdyby używane wielkości były mierzalne w sposób bezpośredni. Zatem zamiast gęstości powietrza należy uwzględnić jego temperaturę, co można osiągnąć stosując zależność dla gazu idealnego (3).

$$\rho = \frac{\mu p}{kT} \quad (3)$$

Teraz równanie (2) może być przedstawione w postaci zależnej tylko od ciśnienia i temperatury, które mogą być łatwo zmierzone (4).

$$H_t = -\frac{k}{\mu} \oint T \frac{dp}{p} \quad (4)$$

Po przeprowadzeniu całkowania przez części, wprowadzeniu ciśnienia odniesienia p_o ($p = p_o + \Delta p$, $\Delta p \ll p_o$) oraz przyjęciu przybliżenia $\ln(1+x) \approx x$ dla $x \ll 1$ otrzymano ostatecznie (5).

$$H_t \approx -\frac{k}{\mu p_o} \oint p dT \quad (5)$$

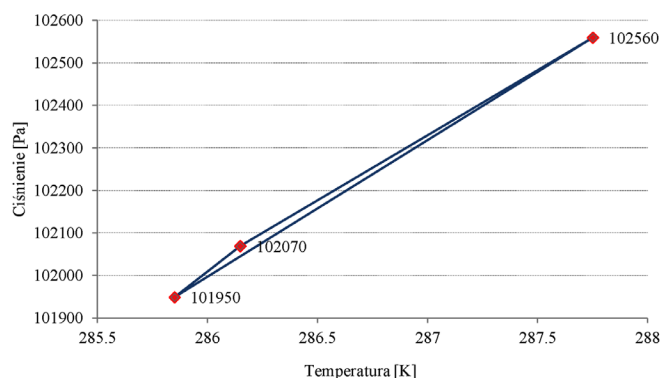
Podczas pomiarów ciągu naturalnego zmierzono wartości temperatury i ciśnienia powietrza w trzech punktach tunelu: na obu portalach i w miejscu położonym najniżej (M0) (Tabela 2).

Wartości te przedstawiono również na Rysunku 5. Pole powierzchni wykreślonego trójkąta jest równe wartości całki z równania (5). Jak widać, trójkąt jest wąski i bardzo skośny. W takiej sytuacji nawet niewielkie przesunięcie dowolnego z wierzchołków trójkąta może spowodować znaczną zmianę jego pola powierzchni. To właśnie dlatego ciąg naturalny jest bardzo wrażliwy na niewielkie zmiany warunków otoczenia.

Zakładając, że I_{pT} oznacza wartość tej całki, wyrażoną w jednostkach Pa·K. Opisany cykl przebiega między temperaturą ściany tunelu (źródło ciepła) a temperaturą otoczenia (chłodnica). Jeśli oznaczy się tą różnicę temperatur jako ΔT , wówczas iloraz $I_{pT}/\Delta T$ można uznać za uśrednioną wartość naturalnego ciśnienia termicznego, będące źródłem efektu kominowego (równanie 6).

$$p_t = \frac{I_{pT}}{\Delta T} \quad (6)$$

Dla danych z Tabeli 2 (i Rysunku 5) otrzymano wartości $I_{pT} = 22,5$ Pa·K, $\Delta T = 1,9$ K, co odpowiada ciśnieniu $p_t = 11,08$ Pa oraz pracy technicznej właściwej $H_t = 6,33$ J/kg. Największa wartość prędkości powietrza na stronie nawietrznej (portal NW) była równa 2,3 m/s, więc wartość ciśnienia dynamicznego wiatru, zgodnie z równaniem (1) i przy odpowiednio dobranej wartości współczynnika c (Rysunek 4), została określona jako 3,22 Pa, stąd całkowite ciśnienie generujące naturalny przepływ wynosi 14,30 Pa. Ta wartość może zostać użyta do oszacowania średniej prędkości powietrza w tunelu wynikającej z ciągu naturalnego. Wykorzystać tutaj należy klasyczny wzór Darcy-Weisbacha, który określa straty ci-



Rysunek 5. Diagram dla zmierzonych wartości ciśnienia i temperatury. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. A graph showing the measured pressure and temperature values. Source: authors' own study

śnienia przy przepływie płynu przez przewód rurowy (7).

$$\Delta P_{D-w} = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} \quad (7)$$

gdzie:

- λ – współczynnik oporu hydraulicznego, –
- L – długość tunelu, m,
- D_h – średnica hydrauliczna, m,
- v_a – prędkość powietrza, m/s.

Dla typowego tunelu drogowego wartość współczynnika została wyznaczona jako 0,039 i uwzględnia również opory generowane przez elementy infrastruktury (Król i in., 2018). Podstawiając pozostałe dane charakteryzujące badany tunel otrzymano wartość 1,82 m/s, która jest o 21% większa od wartości zmierzonych. Taka zgodność może być uznana za akceptowalną, biorąc pod uwagę względną prostotę modelu i pominięcie wielu czynników, które mogą mieć wpływ na rozważane zjawisko.

Dla głębszego zbadania tego zagadnienia przeprowadzono szereg symulacji numerycznych przy użyciu pakietu FDS. Dla uproszczenia założono prostokątny przekrój tunelu o wymiarach 10×6 m, a długość tunelu wynosi 400 m. Siatka numeryczna zawierała 768000 komórek wymiarach 0,25×0,25×0,50 m, co typową gęstością dla obliczeń w tunelach. Siatkę podzielono na 4 podsiatki w celu zrównoleglenia obliczeń. Zbadano 6 przypadków różniących się wzdłużnym nachyleniem oraz różnicą temperatury pomiędzy ścianami tunelu i otaczającym powietrzem

Tabela 2. Zmierzone wartości ciśnienia i temperatury. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Measured pressure and temperature values. Source: authors' own study

Punkt	Położenie	Wysokość, m	Temperatura, °C	Ciśnienie, hPa
1	Portal NW	– 4	13,0	1020,7
2	M0	– 35	14,6	1025,2
3	Portal SE	0	12,7	1019,5

Tabela 3. Zbadane przypadki. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Cases investigated. Source: authors' own study

Przypadek	Nachylenie, %	Różnica temperatury, °C	Prędkość powietrza, m/s	Ciśnienie p_o , Pa
1	2.5	5	0,78	0,39
2	2.5	10	1,10	0,79
3	5.0	5	1,15	0,86
4	5.0	10	1,57	1,62
5	0.0	10	0,00	0,00
6	5.0	0	0,00	0,00

Wynikiem każdej symulacji była średnia prędkość powietrza w przekroju tunelu. Podsumowanie wyników symulacji pokazano w Tabeli 3.

Przypadki 5 i 6 są przypadkami kontrolnymi dla sprawdzenia słuszności założeń modelu. Ich wyniki pokazują jednoznacznie, że bez różnicy temperatury pomiędzy powietrzem zewnętrznym a ścianami tunelu oraz bez nachylenia wzdłużnego tunelu efekt kominowy nie występuje.

Model teoretyczny przepływów generowanych przez efekt tłoka

Przepływ powietrza, wywołany ruchem pojazdów w tunelu, jest często pomijany w analizach przepływów powietrza czy pracy instalacji wentylacyjnej. Tymczasem zjawisko to ma duże znaczenie dla rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń komunikacyjnych w tunelu, czy dla efektywności wentylacji.

Opracowany model opiera się na analizie równowagi między siłami generowanymi przez poruszające się pojazdy a oporami przepływu powietrza w tunelu. Przyjęto uproszczony, jednowymiarowy opis przepływu (model 1D) oraz stan ustalony.

Podstawowym źródłem ruchu powietrza jest różnica ciśnienia powstająca przed poruszającym się pojazdem. Różnica ta zależy od prędkości pojazdu względem powietrza w tunelu i opisana jest równaniem (8) (Liang i in., 2021; Tong i in., 2014).

$$\Delta P_V = \frac{1}{2} c_x \rho (v_v - v_a)^2 \quad (8)$$

gdzie:

- c_x – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu, –
- ρ – gęstość powietrza, kg/m³,
- v_v – prędkość pojazdu, m/s,
- v_a – prędkość powietrza, m/s.

W przypadku wielu pojazdów poruszających się jednocześnie przez tunel, całkowity pęd przekazywany powietrzu w jednostce czasu zależy od liczby pojazdów oraz ich parametrów geometrycznych (9).

$$\Delta p_{veh} = \frac{1}{2} n A_v c_x \rho (v_v - v_a)^2 \Delta t \quad (9)$$

gdzie:

- n – oznacza liczbę pojazdów w tunelu,
- A_v – pole przekroju poprzecznego, m².

Przepływ powietrza generowany ruchem samochodów w tunelu napotyka opory wynikające z tarcia o ściany oraz elementy infrastruktury. Opory te można wyrazić jako ciśnienie korzystając ponownie ze wzoru Darcy-Weisbacha. Można powiedzieć, że opór powstający wskutek tarcia powoduje „odbieranie” pędu z przepływającego powietrza (10).

$$\Delta p_{air} = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} A_t \Delta t \quad (10)$$

gdzie:

- A_t – pole przekroju tunelu, m².

W stanie ustalonym pęd przekazywany przez pojazdy jest równoważony przez straty wynikające z oporów przepływu powietrza (11).

$$\frac{1}{2} n A_v c_x \rho (v_v - v_a)^2 = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} A_t \quad (11)$$

Jest to podstawowe równanie modelu, z którego możliwe jest wyznaczenie prędkości powietrza w tunelu. Można je rozwiązać analitycznie w następujący sposób (odrzucono ujemne pierwiastki) (12).

$$v_a = \frac{v_v}{\sqrt{B+1}} \quad (12)$$

gdzie parametr zawiera stałe współczynniki oraz zmienną, która oznacza liczbę pojazdów w tunelu (13).

$$B = \frac{1}{n} \frac{\lambda L A_t}{D_h A_v c_x} \quad (13)$$

W rzeczywistości liczba pojazdów w tunelu nie jest bezpośrednio znana, dlatego wyraża się ją przez natężenie ruchu TI (14).

$$n = \frac{TI}{3600} \cdot \frac{L}{v_v} \quad (14)$$

Po podstawieniu uzyskuje się końcową postać parametru (15).

$$B(TI, v_v) = \frac{3600}{TI} \cdot \frac{\lambda A_t v_v}{D_h A_v c_x} \quad (15)$$

Ostateczny wzór pozwalający obliczyć prędkość powietrza wywołaną ruchem pojazdów ma postać (16).

$$v_a(TI, v_v) = \frac{v_v}{\sqrt{B(TI, v_v)+1}} \quad (16)$$

W praktyce wzór ten został dodatkowo zmodyfikowany przez uwzględnienie współczynnika zwiększającego opór aerodynamiczny w tunelu oraz korektę uwzględniającą jazdę pojazdów w kolumnach (efekt śladu aerodynamicznego).

Ponieważ ruch drogowy składa się z różnych typów pojazdów, w modelu stosuje się wartości efektywne:

- średnią prędkość (17)

$$v_v = \frac{TI_{RL} v_{RL} + TI_{LL} v_{LL}}{TI_{RL} + TI_{LL}} \quad (17)$$

- efektywne pole przekroju (18)

$$A_v = \eta_{PC} A_{PC} + (1 - \eta_{PC}) A_{HGV} \quad (18)$$

- efektywny współczynnik oporu (19)

$$c_x = \eta_{PC} c_{x,PC} + (1 - \eta_{PC}) c_{x,HGV} \quad (19)$$

gdzie:

- η_{PC} – udział samochodów osobowych.

Opracowany model teoretyczny został następnie zwalidowany. Polegało to na porównaniu jego wyników z rzeczywistymi pomiarami prędkości powietrza w tunelu drogowym pod Martwą Wisłą. Kluczowym elementem było wykorzystanie dużego zbioru danych pomiarowych (tzw. *bulk data*) rejestrowanych przez system monitoringu tunelu.

Dane obejmowały m.in.:

- prędkość powietrza (z czujników ultradźwiękowych),
- natężenie ruchu i strukturę pojazdów,
- prędkości pojazdów (dla obu pasów),
- warunki atmosferyczne (wiatr, temperatura, ciśnienie),
- informacje o pracy systemu wentylacji.

Rejestracja odbywała się co 1 sekundę, a następnie dane zostały uśrednione (do 10 s i 5 min).

Aby walidacja była wiarygodna, konieczne było odfiltrowanie wpływu czynników innych niż efekt tłoka. W tym celu usunięto wszystkie okresy, w których działała wentylacja mechaniczna, ograniczono wpływ bardzo krót-

kotrawnych zaburzeń i zastosowano uśrednianie danych w czasie.

Największym wyzwaniem było jednak uwzględnienie wpływu warunków atmosferycznych, zwłaszcza wiatru oraz różnic temperatury, które również generują przepływ powietrza w tunelu.

Ponieważ nie można było wyeliminować wpływu wiatru z danych pomiarowych, opracowano dodatkowy model numeryczny opisujący oddziaływanie wiatru na portale tunelu. Model ten wspomniano wcześniej, omawiając wpływ wiatru na przepływy w tunelach. Pozwoliło to na obliczenie różnicy ciśnienia wywołanej wiatrem dla zadanych warunków (prędkość i kierunek wiatru). Wyznaczano odpowiadającą jej składową prędkość powietrza w tunelu, a następnie odejmowano jej wartość od wartości

zmierzonych. W efekcie uzyskano skorygowane wartości prędkości powietrza, które można było traktować jako wynik działania samego efektu tłoka.

Ostatecznie dla określonego przedziału czasowego obliczano teoretyczną prędkość powietrza na podstawie modelu i porównywano ją z wartością zmierzoną (po korekcie o wiatr). Porównanie wykazało bardzo dobrą zgodność między modelem a rzeczywistością. Zaobserwowano jednak, że przy dużym natężeniu ruchu model teoretyczny gorzej odwzorowuje warunki rzeczywiste. Wynikało to z pominięcia zjawiska jazdy pojazdów w śladzie aerodynamicznym innych pojazdów (tzw. *wake effect*).

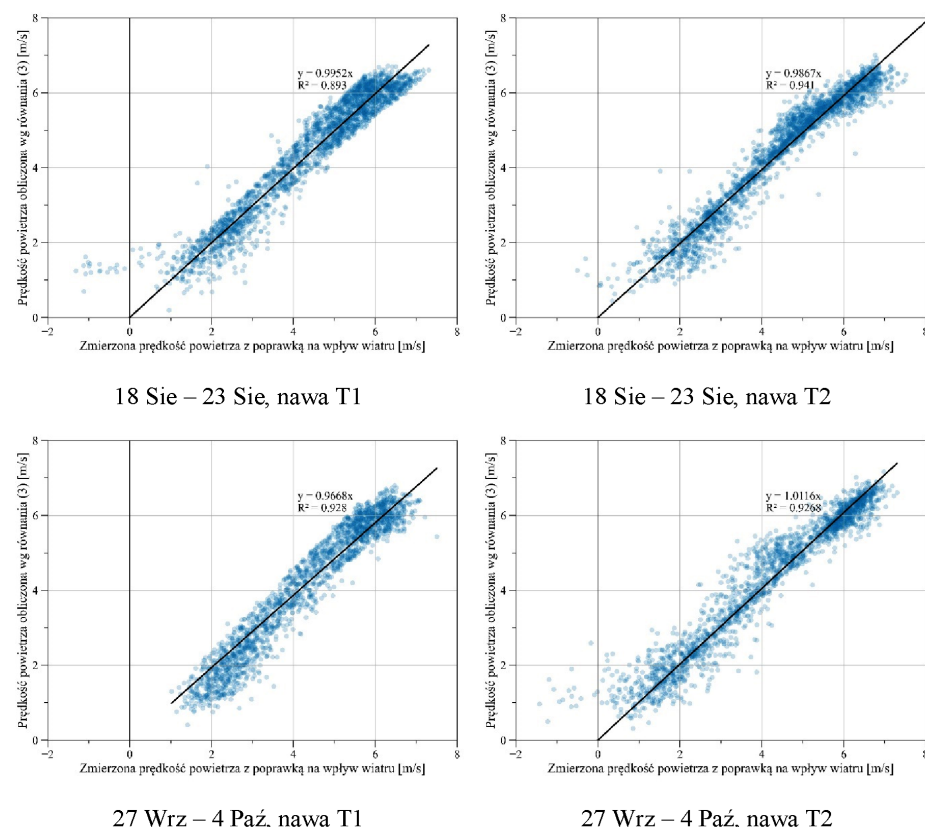
Aby uwzględnić to zjawisko w modelu teoretycznym przeprowadzono dodatkowe symulacje numeryczne dla dwóch pojazdów poruszających się jeden za drugim. Po-

zwoliło to na modyfikację współczynnika oporu aerodynamicznego dla dużych natężeń ruchu. Kolejnym krokiem było przeprowadzenie powtórnej walidacji. Po wprowadzeniu korekty zgodność modelu z danymi uległa poprawie (Rysunek 6), współczynnik osiągał wartości powyżej 0,89–0,9 dla wszystkich zbiorów danych.

Zależność opisaną równaniem (16) wraz z wspomnianymi modyfikacjami współczynnika oporu aerodynamicznego pojazdu można przedstawić graficznie na Rysunku 7.

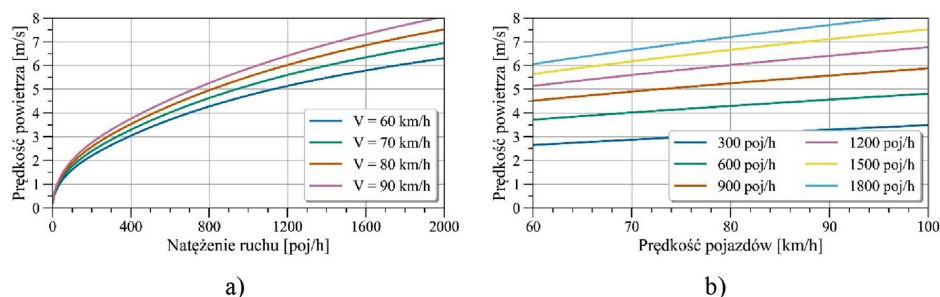
Podsumowanie

Przedstawione pomiary potwierdziły występowanie silnego ciągu naturalnego, który generowany jest przez warunki meteorologiczne (wiatr i temperaturę) oraz geometrię tunelu (głównie jego nachylenia). Podczas typowej eksploatacji tunelu należy również uwzględnić efekt tłoka powstający w wyniku ruchu pojazdów. Intensywność naturalnego ciągu jest zasadniczo zmienna, co może nieoczekiwanie wpływać na działanie systemu wentylacyjnego. Jednak ze względu na geometrię tunelu i jego otoczenie kierunek ciągu naturalnego może być często stały dla danego tunelu. W przypadku krótkiego tunelu drogowego z wentylacją naturalną naturalny ciąg jest dominującym mechanizmem determinującym przepływ powietrza. Zjawisko ciągu naturalnego powinno być uwzględnione na etapie projektowania systemu wentylacji tunelu. Powinno ono obejmować analizę typowych warunków pogodowych w pobliżu tunelu (w szczególności należy określić różę wiatrów).



Rysunek 6. Wartości rzeczywiste pochodzące z monitoringu oraz prędkości przepływu powietrza według modelu teoretycznego, w podziale na tygodnie i nawy tunelu. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. Actual values from monitoring and airflow velocities according to the theoretical model, broken down by week and tunnel tube. Source: authors' own study



Rysunek 7. Teoretyczna zależność między natężeniem ruchu a prędkością powietrza z powodu efektu tłoka, a) zależność od natężenia ruchu, b) zależność od prędkości pojazdu. Źródło: opracowanie własne

Figure 7. The theoretical relationship between traffic volume and air velocity due to the crowding effect: a) relationship with traffic volume, b) relationship with vehicle speed. Source: authors' own study

Podziękowania

Praca była wspierana w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Politechniki Śląskiej w 2026 roku.

Bibliografia

- Budryk, W. (1961). Wentylacja kopalń. *Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze*, Katowice
- Król, A., & Król, M. (2017b). Impact of the factors determining the natural stack effect on the safety conditions in a road tunnel. In *Lecture notes in networks and systems* (pp. 85–95). https://doi.org/10.1007/978-3-319-64084-6_8
- Król, A., Król, M., & Węgrzyński, W. (2022). A study on airflows induced by vehicle movement in road tunnels by the analysis of bulk data from tunnel sensors. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 132, 104888. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104888>
- Król, M., Król, A., Koper, P., & Wrona, P. (2017a). Full scale measurements of the operation of fire ventilation in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.016>
- Król, M., Król, A., Koper, P., & Wrona, P. (2018). The influence of natural draught on the air flow in a tunnel with longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.12.008>
- Li, A., Gao, X., & Ren, T. (2017). Study on thermal pressure in a sloping underground tunnel under natural ventilation. *Energy and Buildings*, 147, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.060>
- Liang, C., Nan, S., Shao, X., & Li, X. (2021). Calculation method for air resistance coefficient of vehicles in tunnel with different traffic conditions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102971. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102971>
- Šulc, J., Ferkl, L., Cigler, J., Záparka, J. (2016). Model-based airflow controller design for fire ventilation in road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.006>
- Tong, Y., Wang, X., Zhai, J., Niu, X., & Liu, L. (2014). Theoretical predictions and field measurements for potential natural ventilation in urban vehicular tunnels with roof openings. *Building and Environment*, 82, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.003>
- Zhong, M., Shi, C., He, L., Shi, J., Liu, C., & Tian, X. (2016). Smoke development in full-scale sloped long and large curved tunnel fires under natural ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 108, 857–865. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.141>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska. Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego. PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową.

Więcej szczegółów:

www.pzits.pl/czlonkostwo



Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

Członkostwo w PZITS obejmuje:

Otrzymywanie:

- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia organizowane przez PZITS,
- dostępu do nagrań z wydarzeń organizowanych przez Zarząd Główny PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych oraz spotkaniach integracyjnych,
- bieżących informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- informacji o ofertach pracy w branży.

Możliwość:

- Udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- współpracy i wymiany doświadczeń z organizacjami zrzeszonymi m.in. w REHVA i IGU,
- publikowania artykułów w czasopiśmie PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych,
- otrzymania odznaczeń honorowych PZITS.

Dostęp do:

- materiałów, poradników i wytycznych opracowywanych przez PZITS,
- działalności szkoleniowej i rozwojowej organizowanej w całej Polsce,
- stowarzyszeniowej wspólnoty i wsparcia środowiska inżynierskiego.



Analiza zmian warunków uzyskania premii termomodernizacyjnej i jej wartości na przestrzeni lat działania Ustawy termomodernizacyjnej. Część 2. Analiza wsparcia finansowego w postaci premii termomodernizacyjnej – studium przypadku

Analysis of changes in the conditions for obtaining the thermal modernization bonus and its value throughout the years of the thermal modernization act's operation. Part 2. Analysis of financial support in the form of a thermal modernization bonus – a case study



Mgr inż. Małgorzata Janusz

ELBAS Sp. z o.o.
Absolwentka
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska



Dr inż. Anna Kowalczyk

ORCID ID: [0000-0002-2287-5962](https://orcid.org/0000-0002-2287-5962)
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
anna.kowalczyk@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: premia termomodernizacyjna, ustawa termomodernizacyjna, audyt energetyczny, efektywność energetyczna
Streszczenie

Przedmiotem artykułu jest analiza zmian warunków uzyskania premii termomodernizacyjnej oraz jej wartości na przestrzeni lat obowiązywania Ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów (1998–2025). W ramach opracowania zdefiniowano cztery teoretyczne modele budynków wielorodzinnych, reprezentujące charakterystyczne okresy technologiczne: lata 1930, 1970, 1998 oraz 2011. Dla każdego z modeli przeprowadzono pełny audyt energetyczny, wyznaczając optymalne warianty modernizacyjne. Głównym elementem badawczym opracowania jest symulacja historyczna, weryfikująca dostępność i wysokość wsparcia finansowego dla tych samych inwestycji w pięciu różnych okresach prawnych. Analiza wykazała, że mechanizmy obowiązujące w początkowych latach funkcjonowania Ustawy (m.in. warunek spłaty kredytu z oszczędności czy limit dwukrotności oszczędności) systemowo wykluczały z dofinansowania nowsze budynki. Wyniki analizy potwierdzają, że aktualne regulacje (wprowadzone nowelizacją z 2022 r.), wiążące wysokość premii z kosztami inwestycji, stanowią najefektywniejszy system wsparcia, umożliwiający rentowną modernizację zasobów mieszkaniowych niezależnie od roku ich budowy.

Keywords: thermo-modernization bonus, thermo-modernization act, energy audit, energy efficiency

Abstract

The subject of this thesis is the analysis of changes in the conditions for obtaining the thermo-modernization bonus and its value throughout the validity of the Act on Supporting Thermo-modernization and Renovations (1998–2025). As part of the study, four theoretical models of multi-family buildings were defined, representing characteristic technological periods: the years 1930, 1970, 1998, and 2011. For each model, a full energy audit was carried out, determining optimal modernization variants. The main research element of the thesis is a historical simulation

verifying the availability and amount of financial support for identical investments across five different legal periods. The analysis showed that mechanisms in force during the initial years of the Act (e.g., the condition of loan repayment from savings or the limit of twice the savings) systemically excluded newer buildings from funding. The research results confirm that current regulations (introduced by the 2022 amendment), linking the bonus amount to investment costs, constitute the most effective support system, enabling profitable modernization of housing resources regardless of their age.

Prezentacja analizowanych obiektów

Założenia metodologiczne i kryteria wyboru

Do analizy wytypowano cztery modele budynków wielorodzinnych, które posiadają identyczną kubaturę, powierzchnię ogrzewaną oraz współczynnik kształtu bryły (A/V). Takie podejście ma na celu wyeliminowanie wpływu zmiennych geometrycznych na wyniki obliczeń energetycznych. Pozwala to na wyizolowanie i zbadanie wpływu wyłącznie dwóch kluczowych zmiennych: standardu technicznego wykonania przegród (izolacyjności cieplnej) oraz efektywności systemów instalacyjnych, które są charakterystyczne dla poszczególnych okresów budownictwa.

Jako reprezentatywne dla ewolucji polskich norm i prze-

pisów budowlanych przyjęto budynki powstałe w latach 1930, 1970, 1998 oraz 2011. Każdy z tych obiektów odzwierciedla inny poziom zaawansowania technicznego oraz inne wymogi prawne dotyczące ochrony cieplnej budynków obowiązujące w momencie ich oddawania do użytku.

1. Obiekt 1930 – budownictwo przedwojenne (okres do 1945 r.)

Budynki z tego okresu to najczęściej obiekty wznoszone w technologii tradycyjnej murowanej. Ściany zewnętrzne wykonywano zazwyczaj z cegły ceramicznej pełnej, co skutkowało ich znaczną grubością, ale niską izolacyjnością termiczną wynikającą z braku dodatkowych warstw izolacyjnych. Pierwotnie w tych obiektach stosowano stolarkę okienną, charakteryzującą się wysokim współczyn-

nikiem przenikania ciepła oraz znaczną infiltracją powietrza. Jest to grupa budynków o najwyższym zapotrzebowaniu na ciepło, gdzie współczynniki przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych często przekraczają $1,2\text{--}1,5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ co stanowi duży potencjał modernizacyjny (NAPE, 2011).

2. Obiekt 1970 – budownictwo uprzemysłowione (okres 1967–1985 r.)

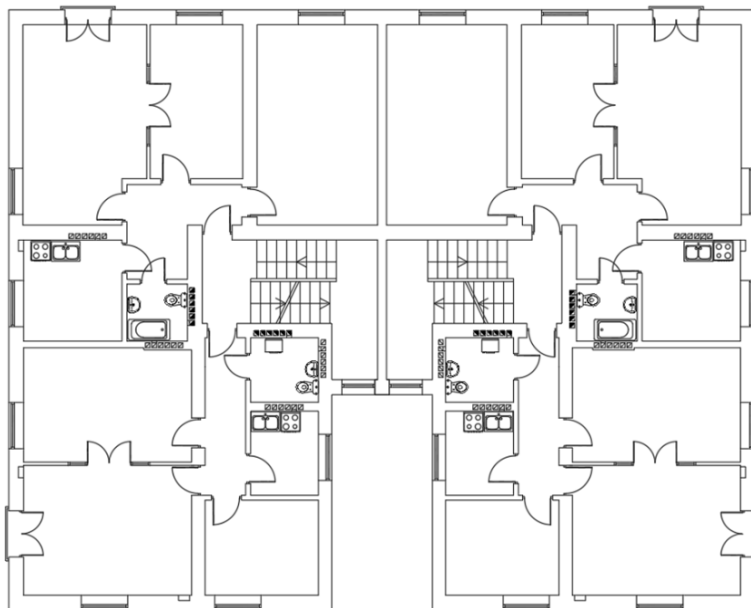
W tym okresie dominowało budownictwo wielokopłytowe, w którym budynki wznoszono w oparciu o prefabrykowaną konstrukcję betonową lub żelbetową. Mimo, że wewnątrz płyt warstwowych stosowano materiał izolacyjny, taki jak wełna mineralna czy styropian, ściany zewnętrzne charakteryzują się niskimi parametrami cieplnymi ze względu na dużą liczbę mostków cieplnych. Budynki te projektowano w oparciu o normy, które stawiały minimalne wymagania izolacyjne. Dodatkowo systemy grzewcze w tych obiektach były często pozbawione automatyki i opomiarowania, co generowało duże starty na przesyle i regulacji ciepła (NAPE, 2011).

3. Obiekt 1998 – początki przedsięwzięć termomodernizacyjnych (okres 1993–2002 r.)

Budynek ten reprezentuje okres transformacji technologicznej i legislacyjnej, powstały w czasach wejścia w życie pierwszej Ustawy o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1998). Obiekty z tego okresu wznoszono w ulepszonych technologiach, wykorzystując na przykład bloczki silikatowe z dociepleniem, zgodnie z normami cieplnymi, które wymuszały stosowanie izolacji przegród. Standardem stawała się stolarka okienna z szybami zespolonymi, wykonana z PCV, osiągająca współczynniki U na poziomie $2,0\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Choć budynki są na znacznie wyższym poziomie energetycznym od starszych zasobów mieszkaniowych, ich standard wciąż znacząco odbiega od współczesnych wymogów, co daje przestrzeń do opłacalnej termomodernizacji (NAPE, 2011).

4. Obiekt 2011 – budownictwo współczesne (okres po 2009 r.)

Model ten reprezentuje budownictwo zrealizowane zgodnie z nowszymi Warunkami Technicznymi, charakteryzujące się świadomym podejściem do oszczędności energii. Ściany zewnętrzne posiadają solidną warstwę izolacji termicznej, osiągając współczynnik U na poziomie



Rysunek 3. Rzut piętra. Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Floor plan. Source: authors' own study

ok. $0,3\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Budynki wyposażone są w sprawniejsze systemy grzewcze z automatyką, obejmującą zawory termostatyczne i regulację pogodową. Z uwagi na niski wyjściowy poziom zapotrzebowania na energię, osiągnięcie wymaganych ustawowo progów oszczędności jest w tym wypadku najtrudniejsze i często wymaga zastosowania zaawansowanych technologii, takich jak odnawialne źródła energii (OZE) (NAPE, 2011).

Dane geometryczne i założenia stałe

W celu zapewnienia porównywalności wyników dla wszystkich analizowanych okresów budowy, przyjęto jednolity model geometryczny budynku. Obiektem odniesienia jest średniej wielkości budynek mieszkalny wielorodzinny, którego parametry powierzchniowe i kubaturowe zostały ustalone na stałym poziomie we wszystkich wariantach obliczeniowych. Jest to budynek w pełni podpiwniczony, posiadający 9 kondygnacji nadziemnych, zaprojektowany na rzucie prostokąta charakteryzującego się zwartą bryłą.

W zakresie rozwiązań instalacyjnych, dla stanu wyjściowego przed modernizacją, przyjęto tożsame założenia dla wszystkich analizowanych wariantów. W budynku funk-

Tabela 8. Parametry geometryczne analizowanego budynku. Źródło: opracowanie własne

Table 8. Geometric parameters of the analyzed building. Source: authors' own study

1	Powierzchnia zabudowana, m^2	1 468	10	Budynek podpiwniczony	Tak
2	Kubatura budynku, m^3	4 626	11	Liczba klatek schodowych	1
3	Kubatura ogrzewanej części budynku, m^3	5 590	12	Liczba kondygnacji	10
4	Powierzchnia użytkowa mieszkań, m^2	1 176	13	Wysokość kondygnacji w świetle, m	3,0
5	Powierzchnia korytarzy i klatek schodowych, m^2	157	14	Liczba mieszkańców	108
6	Powierzchnia pomieszczeń ogrzewanych na poddaszu użytkowym, m^2	–	15	Liczba mieszkań	36
7	Powierzchnia pomieszczeń ogrzewanych w piwnicy, m^2	–	16	Liczba mieszkań z łazienkami	36
8	Powierzchnia usługowa pomieszczeń ogrzewanych (usługi, sklepy, itp.), m^2	–	17	Liczba mieszkań z WC osobno	0
9	Powierzchnia ogrzewanej części budynku, m^2 (4+5+6+7+8)	1 333	18	Liczba kuchni	36

cjonuje wentylacja naturalna grawitacyjna, realizowana indywidualnie dla każdego lokalu, natomiast ogrzewanie pomieszczeń odbywa się poprzez centralną instalację c.o. z grzejnikami konwekcyjnymi. Obiekt nie jest wyposażony w instalację wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła ani w instalację wykorzystującą Odnawialne Źródła Energii (OZE). Budynek zlokalizowany jest w III strefie klimatycznej, w Warszawie. Wartości temperatury powietrza wewnętrznego przyjęto zgodnie z Warunkami Technicznymi (Minister Rozwoju i Technologii, 2022).

Charakterystyka techniczno-energetyczna stanu przed modernizacją

Dzięki przyjęciu stałych wartości geometrycznych i klimatycznych, jedynymi zmiennymi w dalszej analizie pozostają parametry techniczne, w szczególności izolacyjność cieplna przegród oraz sprawność instalacji grzewczych, wynikające bezpośrednio z norm i przepisów techniczno-budowlanych obowiązujących w latach wznoszenia poszczególnych przegród (Tabela 9.)

Zróżnicowanie Współczynników Przenikania Ciepła

Kluczowym parametrem determinującym energochłonność budynku w stanie istniejącym jest izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych. Wartości współczynnika ciepła dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych zostały przyjęte w oparciu o analizę norm i przepisów techniczno-budowlanych obowiązujących w czasie wznoszenia obiektów, a także na podstawie typowych rozwiązań materiałowych charakterystycznych dla danej epoki.

Zestawienie w Tabeli 10 obrazuje stan wyjściowy dla każdego z czterech analizowanych modeli w odniesieniu do aktualnie obowiązujących wymagań Warunków Technicznych 2021.

Analiza danych zawartych w tabeli wskazuje na znaczące różnice w standardzie ochrony cieplnej budynków w zależności od roku ich powstania. Obiekty wzniesione przed wprowadzeniem norm cieplnych (lata 1930 i 1970) charakteryzują się współczynnikami przenikania ciepła wielokrotnie przekraczającymi obecne wymagania. Największe rozbieżności widoczne są w przypadku ścian

Tabela 9. Wartości współczynnika przenikania ciepła wg ich roku oddania budynku do użytkowania (Robakiewicz, 2021)

Table 9. Heat transfer coefficient values according to the year of commissioning of the building (Robakiewicz, 2021)

Współczynnik przenikania ciepła U_{max} [W/(m ² ·K)]					
Norma/przepis	Ściana zewnętrzna	Stropodach	Strop nad nieogrzewaną piwnicą	Strop pod poddaszem	Okna i drzwi balkonowe
PN-57/B-024051 ^{a)}	1,16 ÷ 1,42	0,87	1,16	1,04 ÷ 1,163	–
PN-64/B-034041 ^{a)}	1,16	0,87	1,16	1,04 ÷ 1,163	–
PN-74/B-034042 ^{b)}	1,16	0,70	1,16	0,93	–
PN-82/B-020202 ^{b)}	0,75	0,45	1,16	0,40	2,0 ÷ 2,6
PN-91/B-020202 ^{b)}	0,55 ÷ 0,70 ^{d)}	0,30	0,60	0,30	2,0 ÷ 2,6
Przepisy techniczno-budowlane (rok 1997) ^{b)}	0,30 ÷ 0,65 ^{c)}	0,30	0,60	0,30	2,0 ÷ 2,6
Przepisy techniczno-budowlane (rok 2002) ^{b)}	0,30 ÷ 0,65 ^{d)}	0,30	0,60	0,30	2,0 ÷ 2,6
Przepisy techniczno-budowlane (rok 2009) ^{b)}	0,30	0,25	0,45	0,25	1,7 ÷ 1,8
Przepisy techniczno-budowlane (rok 2014) ^{b)}	0,25	0,20	0,25	0,20	1,3 ÷ 1,5
Przepisy techniczno-budowlane (rok 2017) ^{b)}	0,23	0,18	0,25	0,18	1,1 ÷ 1,3
Przepisy techniczno-budowlane (rok 2021) ^{b)}	0,20	0,15	0,25	0,15	0,9 ÷ 1,1

^{a)} $\theta_i = 18^\circ\text{C}$, ^{b)} $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, ^{c)} w zależności od rodzaju ściany (z otworami lub bez), ^{d)} w zależności od rodzaju i konstrukcji ściany

Tabela 10. Zestawienie współczynników przenikania ciepła U dla analizowanych budynków. Źródło: opracowanie własne

Table 10. Summary of heat transfer coefficients U for the analyzed buildings. Source: authors' own study

Współczynniki przenikania ciepła przez przegrody budowlane w stanie istniejącym (przed modernizacją), W/m ² K						
Lp.	Rodzaj przegrody	Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011	Wymagania WT 2021
1	Ściany zewnętrzne	1,435	1,013	0,42	0,291	0,2
2	Ściany zewnętrzne w piwnicy	0,558	1,7	0,485	0,665	–
3	Stropodach	1,361	0,907	0,303	0,244	0,15
4	Strop nad piwnicą	1,24	1,255	0,589	0,447	0,25
5	Podłoga na gruncie w pomieszczeniach ogrzewanych	–	–	–	–	–
6	Okna, drzwi balkonowe w lokalach mieszkalnych	1,5	1,5	1,5	1,5	0,9
7	Okna na klatce schodowej	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
8	Drzwi zewnętrzne	2,0	2,0	2,0	2,0	1,3

zewnątrznych, gdzie budynek z 1930 roku posiada prze-
grody o współczynniku $U = 1,435 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, co stanowi
wartość ponad siedmiokrotnie gorszą od współczesnych
wymagań na poziomie $U = 0,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

W przypadku obiektów nowszych (1998 i 2011) pa-
rametry te ulegają wyraźnej poprawie. Jednakże, nawet
budynek z 2011 roku nie spełnia w pełni aktualnych wy-
mogów WT 2021, co wskazuje na istnienie potencjału
modernizacyjnego również w nowszych zasobach miesz-
kaniowych.

W przyjętej analizie skoncentrowano się na kluczowych
działaniach termomodernizacyjnych, które mają wpływ
na poprawę bilansu energetycznego budynku, takich
jak docieplenie ścian zewnętrznych oraz stropodachów.
W związku z tym pominięto usprawnienia generujące
niewielkie efekty energetyczne, przyjmując założenie, że
stolarka okienna na klatkach schodowych oraz drzwi wej-
ściowe zostały wymienione na nowsze w ramach wcze-
śniejszych prac remontowych.

W odniesieniu do stolarki okiennej w lokalach mieszkal-
nych, dla wszystkich analizowanych modeli przyjęto ujed-
nolicony współczynnik przenikania ciepła na poziomie
 $U = 1,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Wynika to z faktu, że użytkownicy lokali
dokonali wymiany pierwotnej stolarki na nowocześniejszą
we własnym zakresie.

Charakterystyka systemów instalacyjnych

Równie istotnym czynnikiem wpływającym na energo-
chłonność jest sprawność systemów ogrzewania i przy-
gotowania ciepłej wody użytkowej. W celu zachowania
spójności analizy porównawczej, dla wszystkich czterech
modeli budynków przyjęto jednakowe źródło ciepła. Za-
łożono, że każdy z obiektów jest zasilany z miejskiej sieci
ciepłowniczej poprzez węzeł cieplny, który obsługuje za-
równo instalację centralnego ogrzewania, jak i przygoto-
wania ciepłej wody użytkowej.

Tabela 11. Sprawności składowe systemu grzewczego. Źródło: opracowanie własne

Table 11. Component efficiencies of the heating system. Source: authors' own study

Sprawności składowe systemu grzewczego						
Lp.	Rodzaj sprawności		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1.	Sprawność wytwarzania	η_g	0,93	0,93	0,93	0,93
2.	Sprawność przesyłania	η_d	0,8	0,8	0,9	0,9
3.	Sprawność regulacji i wykorzystania	η_e	0,77	0,77	0,825	0,825
4.	Sprawność akumulacji	η_s	1	1	1	1
5.	Uwzględnienie przerwy na ogrzewanie w okresie tygodnia	w_t	1	1	1	1
6.	Uwzględnienie przerwy na ogrzewanie w ciągu doby	w_d	1	1	1	1
7.	Sprawność całkowita systemu	η_{tot}	0,57	0,57	0,69	0,69

Tabela 12. Sprawności składowe systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej. Źródło: opracowanie własne

Table 12. Component efficiencies of the domestic hot water preparation system. Source: authors' own study

Sprawności składowe systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej						
Lp.	Rodzaj sprawności		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1.	Sprawność wytwarzania	η_{gw}	0,91	0,91	0,91	0,91
2.	Sprawność przesyłania	η_{dw}	0,5	0,5	0,6	0,6
3.	Sprawność regulacji i wykorzystania	η_{ew}	1	1	1	1
4.	Sprawność akumulacji	η_{sw}	1	1	1	1
5.	Sprawność całkowita systemu	$\eta_{tot,w}$	0,46	0,46	0,55	0,55

Różnice w efektywności energetycznej systemów insta-
lacyjnych w poszczególnych okresach wynikają ze stanu
technicznego instalacji wewnętrznych, stopnia zaizolowa-
nia przewodów oraz poziomu zaawansowania automatyki
regulacyjnej.

I. System grzewczy

W zakresie instalacji centralnego ogrzewania przyjęto
następujące założenia różnicujące budynki stare (1930,
1970) od nowszych (1998, 2011):

- **Sprawność przesyłu $\eta_{h,d}$:** W budynkach z roku 1930 i 1970 przyjęto stan instalacji, w którym przewody poziome i pionowe prowadzone są bez izolacji termicznej. W budynkach z 1998 i 2011 założono wyższy standard, w którym przewody poziome są zaizolowane, natomiast piony pozostają bez izolacji.
- **Sprawność regulacji i wykorzystania $\eta_{h,e}$:** Dla obiektów z lat 1930 i 1970 przyjęto brak automatycznej regulacji miejscowej (brak zaworów termostatycznych). W przypadku budynków z lat 1998 i 2011 przyjęto system mieszany. Założono, że w 50% przypadków występuje regulacja centralna i miejscowa (zakres P-2K), a w 50% brak regulacji automatycznej.
- We wszystkich przypadkach systemy pracują bez zbior-
nika buforowego, w trybie ciągłej pracy bez przerw na
ogrzewanie w okresie tygodnia i w ciągu doby.

Sprawności składowe systemu grzewczego przyjęto wg
Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia
27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania cha-
rakterystryki energetycznej budynku lub części budynku
oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Tabela 11)
(Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015).

II. System ciepłej wody użytkowej

Instalacja ciepłej wody użytkowej c.w.u. w każdym
z analizowanych przypadków jest zasilana z węzła kom-
paktowego, jednak różni się izolacyjność przewodów dys-
trybucyjnych (Tabela 12):

- **Budynki z 1930 i 1970:** System wyposażony jest w obiegi cyrkulacyjne, jednak zarówno pionowe instalacyjne, jak i przewody rozprowadzające są nieizolowane, co generuje straty przesyłu.
- **Budynki z 1998 i 2011:** System wyposażony jest w obiegi cyrkulacyjne, oraz w pełni zaizolowane pionowe i poziome przewody rozprowadzające.

Charakterystyka energetyczna budynków w stanie wyjściowym

W celu określenia charakterystyki energetycznej analizowanych budynków w stanie istniejącym (przed modernizacją), dla każdego modelu przeprowadzono szczegółowe obliczenia zapotrzebowania na ciepło. Obliczenia sporządzono za pomocą programu Audytor OZC, zgodnie z wymaganiami normowymi oraz według algorytmu sporządzania audytu energetycznego. Zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników dla poszczególnych budynków w stanie wyjściowym prezentuje Tabela 13.

Analiza danych zawartych w przedstawionej tabeli jednoznacznie potwierdza, że rok budowy i związane z nim standardy techniczne mają wpływ na wyniki energetyczne obiektów. Zapotrzebowanie na moc cieplną wymaganą do ogrzewania budynku ulega systematycznemu obniżeniu. Dla najstarszego obiektu z 1930 roku wynosi ono 175,7 kW, podczas gdy dla budynku z 2011 roku spada do poziomu 91,3 kW. Ta prawie dwukrotna różnica wynika bezpośrednio z braku izolacji termicznej przegród w starszych obiektach i odzwierciedla postęp w rozwoju technologii materiałowej oraz zaostrzanie wymagań techniczno-budowlanych na przestrzeni lat. Zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) pozostaje na stałym poziomie we wszystkich analizowanych obiektach. Wynika to z przyjęcia ujednoliconych założeń projektowych dla wszystkich modeli, w tym identycznej liczby użytkowników. Parametr ten jest funkcją przeznaczenia i sposobu użytkowania budynku, a nie parametrów termicznych jego przegród zewnętrznych, dlatego nie ulega zmianom w zależności od roku budowy. Wyraźną tendencję spadkową obserwuje się również w przypadku

rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania. Wartości te maleją z poziomu 1174,7 GJ/rok (obiekt 1930) do 439,1 GJ/rok (obiekt 2011), co oznacza ponad 2,5-krotną poprawę efektywności.

Jeszcze wyraźniejsze różnice widoczne są we wskaźnikach uwzględniających sprawność systemów instalacyjnych. Spadek ten wynika nie tylko z mniejszego zapotrzebowania na ciepło, lecz także z coraz wyższej sprawności źródeł ciepła i instalacji grzewczych w nowszych budynkach.

Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię końcową (EK) i nieodnawialną energię pierwotną (EP), będące jednymi z podstawowych parametrów porównawczych efektywności energetycznej budynków, również wykazują znaczący spadek w kolejnych latach. Oznacza to, że nowsze budynki nie tylko generują niższe koszty eksploatacyjne, ale także w mniejszym stopniu obciążają środowisko zużyciem energii pierwotnej.

Od 1 stycznia 2021 roku dla nowych budynków mieszkalnych wielorodzinnych maksymalny wskaźnik EP wynosi 65 kWh/(m²rok). Wymaganie to dotyczy rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną, obejmującą ogrzewanie, wentylację oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej. Jak pokazują wyniki obliczeń, żaden z analizowanych budynków w stanie wyjściowym nie spełnia tego wymogu. Nawet budynek z 2011 roku przekracza ten próg, co wskazuje na konieczność modernizacji również w stosunkowo nowych zasobach budowlanych.

Uzyskane wyniki wyraźnie pokazują, że kolejne okresy budowy wiążą się z istotnym wzrostem standardu energetycznego budynków. Największe różnice występują pomiędzy budynkami z lat 1930–1970, gdzie brak izolacji termicznej generuje znacznie wyższe straty ciepła. Nowsze obiekty, projektowane zgodnie z rygorystycznymi wymaganiami techniczno-budowlanymi, charakteryzują się znacznie niższym zapotrzebowaniem na energię, co bezpośrednio przekłada się na mniejsze koszty eksploatacyjne.

Przedstawione wyniki udowadniają, że niezależnie od roku budowy, każdy z analizowanych obiektów wymaga

Tabela 13. Zestawienie wskaźników energetycznych analizowanych budynków. Źródło: opracowanie własne

Table 13. Summary of energy indicators of the analyzed buildings. Source: authors' own study

Charakterystyka energetyczna budynków						
Lp.	Obliczona wartość	Jednostka	Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1.	Obliczeniowa moc cieplna systemu grzewczego	kW	175,7	146,1	101,2	91,3
2.	Obliczeniowa moc cieplna na przygotowanie ciepłej wody użytkowej	kW	42,2	42,2	42,2	42,2
3.	Roczne zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku (bez uwzględnienia sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu)	GJ/rok	1174,7	913,7	519,2	439,1
4.	Roczne obliczeniowe zużycie energii do ogrzewania budynku (z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu)	GJ/rok	2061,0	1603,0	752,0	605,0
5.	Obliczeniowe zużycie energii do przygotowania ciepłej wody użytkowej	GJ/rok	290,0	290,0	242,0	242,0
6.	EK – wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową	kWh/(m ² rok)	491,1	395,7	208,2	177,5
7.	EP – wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną	kWh/(m ² rok)	394,6	318,2	168,3	143,8

interwencji termomodernizacyjnej, aby dostosować go do współczesnych standardów efektywności energetycznej.

Analiza wpływu standardu budynku na efektywność energetyczną, ekonomiczną oraz wielkość wsparcia finansowego

Metodyka obliczeń i założenia do audytów

Dla każdego z czterech zdefiniowanych modeli budynków (reprezentujących lata 1930, 1970, 1998 oraz 2011) przeprowadzono pełny audyt energetyczny, mający na celu wybranie optymalnego wariantu przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. Jako nadrzędne kryterium wyboru optymalnego wariantu przyjęto dążenie do uzyskania możliwie jak najwyższej premii termomodernizacyjnej. W związku z tym, zaproponowane rozwiązania modernizacyjne musiały gwarantować spełnienie aktualnie obowiązujących norm, w szczególności wymagań izolacyjności cieplnej przegród określonych w Warunkach Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022). Dla każdego z usprawnień termomodernizacyjnych, obejmujących m.in. ocieplenie przegród zewnętrznych, wymiana stolarki okiennej czy modernizacja instalacji, przeanalizowano warianty różniące się parametrami technicznymi. Następnie, zgodnie z algorytmem sporządzania audytu energetycznego, wybrano zestaw rozwiązań, który przy najniższym koszcie inwestycyjnym pozwala osiągnąć wymagany standard techniczny oraz maksymalny efekt ekonomiczny inwestycji.

Zakres proponowanych usprawnień termomodernizacyjnych

Szczegółowy zakres prac dla poszczególnych budynków zestawiono w Tabeli 14.

Analiza zestawionych danych wskazuje na zależności między wiekiem budynku a specyfiką wymaganych prac:

Wraz z nowszym rokiem budowy, wymagana grubość dodatkowej warstwy izolacji przegród zewnętrznych

i stropów systematycznie maleje. Dla budynku z 1930 roku konieczne jest zastosowanie 14 cm styropianu na ścianach zewnętrznych. Natomiast dla obiektu z 2011 roku, pomimo istnienia pierwotnej warstwy ocieplenia, jej parametry są niewystarczające w świetle obecnych norm, co wymusza docieplenie ścian dodatkową warstwą o grubości 5 cm.

Wymiana okien w lokalach mieszkalnych okazała się konieczna we wszystkich analizowanych budynkach, włącznie z obiektem z 2011 roku. Stolarka okienna o współczynniku $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, zamontowana pierwotnie (w budynku z 2011 roku) lub wymieniona przez lokatorów (w budynkach z 1930, 1970 i 1998 roku), choć w dobrym stanie technicznym, nie spełnia wymagań Warunków Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022).

W przypadku modernizacji instalacji c.w.u. oraz c.o. zakres prac instalacyjnych jest zależny od wieku budynku. W obiektach starszych (1930 oraz 1970) konieczna jest kompleksowa wymiana całych instalacji, włącznie ze skorodowanymi przewodami i nieefektywnymi grzejnikami żeliwnymi. W nowszych budynkach (1998 oraz 2011), gdzie stan techniczny przewodów określono jako dobry, działania modernizacyjne ograniczają się do usprawnień regulacyjnych takich jak montaż zaworów podpionowych, zaworów termostatycznych oraz podzielników kosztów, co jest kluczowe dla poprawy sprawności energetycznej systemów.

Zgodnie z metodyką audytu, dla każdego usprawnienia wyznaczono koszty inwestycyjne oraz prosty czas zwrotu nakładów (SPBT). Na podstawie tego wskaźnika uszeregowano planowane działania od najbardziej do najmniej opłacalnych ekonomicznie, co stanowiło podstawę do skonstruowania wariantów termomodernizacyjnych. Porównanie kosztów i prostych czasów zwrotu nakładów (SPBT) dla poszczególnych obiektów przedstawiono w Tabelach 15 i 16.

Analiza przedstawionych danych pozwala na sformułowanie zależności pomiędzy wiekiem budynku a ekono-

Tabela 14. Zestawienie zakresu prac modernizacyjnych. Źródło: opracowanie własne

Table 14. Summary of the scope of modernization works. Source: authors' own study

Lp.	Rodzaj usprawnienia	Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1	Ocieplenie stropodachu	Styropian $\lambda = 0,042$ Grubość: 25 cm	Styropian $\lambda = 0,042$ Grubość: 25 cm	Styropian $\lambda = 0,042$ Grubość: 15 cm	Styropian $\lambda = 0,042$ Grubość: 15 cm
2	Ocieplenie stropu nad piwnicą	Pianka PUR $\lambda = 0,035$ Grubość: 11 cm	Pianka PUR $\lambda = 0,035$ Grubość: 12 cm	Pianka PUR $\lambda = 0,035$ Grubość: 9 cm	Pianka PUR $\lambda = 0,035$ Grubość: 7 cm
3	Ocieplenie ścian zewnętrznych	Styropian $\lambda = 0,031$ Grubość: 14 cm	Styropian $\lambda = 0,031$ Grubość: 13 cm	Styropian $\lambda = 0,031$ Grubość: 9 cm	Styropian $\lambda = 0,031$ Grubość: 5 cm
4	Wymiana okien w lokalach mieszkalnych	$U = 0,9$	$U = 0,9$	$U = 0,9$	$U = 0,9$
5	Wymiana okien na klatce schodowej	$U = 1,2$	$U = 1,2$	$U = 1,2$	$U = 1,2$
6	Modernizacja c.w.u.	Całkowita wymiana instalacji oraz izolacji termicznej	Całkowita wymiana instalacji oraz izolacji termicznej	Modernizacja instalacji poprzez doposażenie instalacji w termostatyczne zawory podpionowe	Modernizacja instalacji poprzez doposażenie instalacji w termostatyczne zawory podpionowe
7	Modernizacja c.o.	Całkowita wymiana instalacji oraz izolacji termicznej	Całkowita wymiana instalacji oraz izolacji termicznej	Modernizacja izolacji oraz instalacji poprzez doposażenie instalacji w zawory termostatyczne, zawory podpionowe i podzielniki kosztów	Modernizacja instalacji poprzez doposażenie instalacji w zawory termostatyczne, zawory podpionowe i podzielniki kosztów

miczną efektywnością planowanych usprawnień, wyrażoną prostym czasem zwrotu nakładów (SPBT):

1. Zgodnie z metodyką audytu, modernizacja systemu grzewczego rozpatrywana jest w pierwszej kolejności, niezależnie od wielkości wskaźnika SPBT. Analiza wykazuje, że niezależnie od wieku budynku, modernizacja instalacji c.w.u. oraz c.o. charakteryzują się najkrótszymi czasami zwrotu, oscylującymi w granicach 2–10 lat. W przypadku najstarszych obiektów, wymiana wyeksploatowanych i niezaizolowanych instalacji przynosi znaczą poprawę sprawności, co generuje natychmiastowe oszczędności finansowe. W budynkach nowszych, działania usprawniające wiążą się ze znacznie niższymi nakładami inwestycyjnymi, co przekłada się na ich szybki zwrot. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność traktowania modernizacji instalacji jako priorytetu w każdym przedsięwzięciu termomodernizacyjnym.
2. Najbardziej wyraźne dysproporcje występują w przypadku izolacji przegród zewnętrznych. W obiekcie z 1930 roku, który pierwotnie nie posiadał izolacji, inwestycja w docieplenie ścian zewnętrznych jest wysoko opłacalna i zwraca się w ciągu około 11 lat. Dla porównania, w obiekcie z 2011, posiadającym pierwotną warstwę izolacji, czas zwrotu dla tego samego działania wynosi aż 92 lata. Różnica ta wynika to z faktu, że koszty stałe inwestycji są zbliżone w obu przypadkach, natomiast potencjał oszczędności energii w nowym budynku jest minimalny w porównaniu do obiektu starszego.
3. We wszystkich analizowanych przypadkach wymiana okien w lokalach mieszkalnych charakteryzuje się najdłuższym czasem zwrotu, wynoszącym około 59 lat. Mimo niskiej efektywności ekonomicznej, działanie

to jest niezbędne dla spełnienia wymogów Warunków Technicznych 2021.

4. Z uwagi na bardzo długi czas zwrotu inwestycji, zrezygnowano z wymiany okien na klatkach schodowych. W każdym przypadku stolarka ta była już wymieniona i charakteryzuje się stosunkowo niskim współczynnikiem przenikania ciepła, przez co jej wymiana nie przyniosłaby istotnego efektu energetycznego. W związku z tym warianty uwzględniające wymianę okien na klatce schodowej zostały pominięte w dalszej analizie jako nieuzasadnione ekonomicznie.

Analiza efektów energetycznych i wybór wariantu optymalnego

Zgodnie z procedurą audytową, na podstawie zestawienia usprawnień uszeregowanych według rosnącej wartości wskaźnika SPBT, dla każdego z analizowanych obiektów skonstruowano kolejne warianty termomodernizacyjne. Warianty te powstawały zgodnie z metodą opisaną w kroku 4 algorytmu sporządzania audytu energetycznego. Dla każdego ze stworzonych wariantów przeprowadzono obliczenia symulacyjne, wyznaczając roczne oszczędności kosztów energii oraz procentową oszczędność zapotrzebowania na energię.

Na tej podstawie dla każdego obiektu wybrano optymalny wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. Jako kryterium wyboru przyjęto rozwiązanie, które zapewnia realizację zakresu prac gwarantujące uzyskanie wymaganych oszczędności energetycznych pozwalających na otrzymanie premii termomodernizacyjnej, przy jednoczesnym utrzymaniu kosztów inwestycyjnych na poziomie nieprzekraczającym deklarowanych możliwości finansowych inwestora.

W rezultacie, dla wszystkich czterech budynków (1930,

Tabela 15. Porównanie kosztów inwestycyjnych dla poszczególnych obiektów. Źródło: opracowanie własne

Table 15. Comparison of investment costs for individual facilities. Source: authors' own study

Lp.	Rodzaj usprawnienia	Koszty inwestycyjne, zł			
		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1	Wymiana instalacji c.o.	628 700,0	628 700,0	109 200,0	56 700,0
2	Modernizacja instalacji c.w.u.	100 800,0	100 800,0	10 800,0	10 800,0
3	Ocieplenie stropodachu	104 868,0	104 689,0	83 550,1	81 847,5
4	Ocieplenie ścian zewnętrznych	1 235 906,0	1 216 058,4	1 082 766,4	768 468,0
5	Ocieplenie stropu nad piwnicą	44 036,0	45 554,4	36 443,5	36 443,5
6	Wymiana okien w lokalach mieszkalnych	823 320,0	823 320,0	823 320,0	823 320,0
7	Wymiana okien na klatce schodowej	20 160,0	20 160,0	20 160,0	20 160,0

Tabela 16. Porównanie wartości SPBT dla poszczególnych obiektów. Źródło: opracowanie własne

Table 16. Comparison of SPBT values for individual objects. Source: authors' own study

Lp.	Rodzaj usprawnienia	SPBT, lata			
		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1	Wymiana instalacji c.o.	8,1	10,4	9,1	9,8
2	Modernizacja instalacji c.w.u.	8,6	8,6	2,2	2,2
3	Ocieplenie stropodachu	9,1	14,4	54,7	75,8
4	Ocieplenie ścian zewnętrznych	11,1	16,6	51,8	92,5
5	Ocieplenie stropu nad piwnicą	15,8	16,1	30,8	45,9
6	Wymiana okien w lokalach mieszkalnych	58,9	58,9	58,9	58,9
7	Wymiana okien na klatce schodowej	254,9	254,9	254,9	254,9

1970, 1998, 2011) jako wariant optymalny wybrano wariant obejmujący:

1. **Dla Obiektu 1930 roku:**
 - a. Wymianę instalacji centralnego ogrzewania,
 - b. Modernizację instalacji ciepłej wody użytkowej,
 - c. Ocieplenie stropodachu,
 - d. Ocieplenie ścian zewnętrznych,
 - e. Ocieplenie stropu nad piwnicą.
2. **Dla Obiektu 1970 roku:**
 - a. Wymianę instalacji centralnego ogrzewania,
 - b. Modernizację instalacji ciepłej wody użytkowej,
 - c. Ocieplenie stropodachu,
 - d. Ocieplenie stropu nad piwnicą,
 - e. Ocieplenie ścian zewnętrznych.
3. **Dla Obiektu 1998 roku:**
 - a. Modernizację instalacji centralnego ogrzewania,
 - b. Modernizację instalacji ciepłej wody użytkowej,
 - c. Ocieplenie stropu nad piwnicą,
 - d. Ocieplenie ścian zewnętrznych,
 - e. Ocieplenie stropodachu.
4. **Dla Obiektu 2011 roku:**
 - a. Modernizację instalacji centralnego ogrzewania,
 - b. Modernizację instalacji ciepłej wody użytkowej,
 - c. Ocieplenie stropu nad piwnicą,
 - d. Wymianę okien w lokalach mieszkalnych,
 - e. Ocieplenie stropodachu,
 - f. Ocieplenie ścian zewnętrznych.

Zestawienie kosztów prac termomodernizacyjnych wybranych optymalnych wariantów termomodernizacyjnych dla poszczególnych obiektów przedstawiono w Tabeli 17.

Realizacja optymalnego wariantu termomodernizacyj-

nego prowadzi do poprawy charakterystyki energetycznej budynków, jednak skala tej poprawy jest ściśle uzależniona od stanu wyjściowego obiektu. Szczegółowe zestawienie wskaźników energetycznych przed i po modernizacji dla analizowanych obiektów prezentuje Tabela 18.

Analiza wyników przedawnionych w powyższej tabeli pozwala na sformułowanie wniosku, że im nowszy budynek, tym trudniej osiągnąć wysokie wskaźniki oszczędności energii:

1. W przypadku obiektu z 1930, kompleksowa termomodernizacja pozwala na redukcję zapotrzebowania na energię końcową aż o 70,6%. Ten efekt wynika z wyeliminowania ogromnych strat ciepła przez nieizolowane przegrody. Wraz z nowszym rokiem budowy, pomimo konieczności wykonania zbliżonego, lub nawet szerszego zakresu robót modernizacyjnych, poziom redukcji zapotrzebowania na energię systematycznie maleje. W przypadku obiektu z 2011, większy zakres prac skutkuje oszczędnością na poziomie zaledwie 28,0%. Różnica ta wynika ze znacznie korzystniejszej charakterystyki energetycznej stanu istniejącego w nowszych budynkach, co sprawia, że uzyskanie większej redukcji zużycia wymaga wyższych nakładów technicznych.
2. Niezależnie od punktu startowego, po przeprowadzeniu termomodernizacji wszystkie budynki osiągają zbliżony standard energetyczny (EK w granicach 140–147 kWh/(m²rok), co wskazuje na techniczną granicę efektywności konwencjonalnych metod modernizacyjnych. Mimo optymalizacji, żaden z obiektów nie spełnił wymogu Warunków Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022) w zakresie energii pierwotnej.

Tabela 17. Zestawienie kosztów optymalnych wariantów termomodernizacyjnych. Źródło: opracowanie własne

Table 17. Summary of total costs of optimal thermal modernization variants. Source: authors' own study

Lp.	Rodzaj usprawnienia	Koszty całkowite, zł			
		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
1	Wymiana instalacji c.o.	628 700,0	628 700,0	109 200,0	56 700,0
2	Modernizacja instalacji c.w.u.	100 800,0	100 800,0	10 800,0	10 800,0
3	Ocieplenie stropodachu	104 868,0	104 689,2	83 550,1	81 847,5
4	Ocieplenie ścian zewnętrznych	1 235 906,0	1 216 058,4	1 082 766,4	768 468,0
5	Ocieplenie stropu nad piwnicą	44 036,0	45 554,4	36 443,5	36 443,5
6	Wymiana okien w lokalach mieszkalnych	–	–	–	823 320,0
7	Wymiana okien na klatce schodowej	–	–	–	–
8	Koszty dodatkowe (np. dokumentacji technicznej)	30 000,0	30 000,0	30 000,0	30 000,0
9	SUMA	2 144 310,0	2 125 802,0	1 352 760,0	1 807 579,0

Tabela 18. Zestawienie efektów energetycznych optymalnych wariantów termomodernizacyjnych. Źródło: opracowanie własne

Table 18. Summary of energy effects of optimal thermal modernization variants. Source: authors' own study

Obliczona wartość	Jednostka	Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011
Zapotrzebowanie na energię przed modernizacją ($Q_{co} + Q_{cwu}$)	GJ/rok	2 351	1 893	994	847
Zapotrzebowanie na energię po modernizacji ($Q_{co} + Q_{cwu}$)	GJ/rok	692	700	685	606
Oszczędność energii ($\Delta Q_{co} + c_{wu}$)	GJ/rok	1 659	1 193	309	241
Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	%	71	63	31	28
Wskaźnik EK po modernizacji	kWh/(m ² rok)	145,3	147,0	143,8	140,5
Wskaźnik EP po modernizacji	kWh/(m ² rok)	117,9	119,3	116,8	114,1

Dowodni to, że wyłączna poprawa izolacyjności przegród i sprawności instalacji jest niewystarczająca do pełnego dostosowania istniejących zasobów mieszkaniowych do aktualnych standardów bez zastosowania technologii OZE.

Podsumowując, w budynkach starszych (1930–1970) termomodernizacja przynosi radykalną poprawę i generuje dużo większe oszczędności energetyczne (GJ). W budynkach nowszych (1998–2011) działania te powodują, że redukcja zapotrzebowania na energię jest procentowo niewielka, co przy wysokich kosztach inwestycyjnych pogarsza wskaźniki ekonomiczne przedsięwzięć bez udziału wsparcia finansowego.

Analiza porównawcza warunków i wysokości premii termomodernizacyjnej w świetle zmieniających się regulacji prawnych

Cel analizy i założenia metodologiczne symulacji

Głównym celem niniejszego rozdziału jest weryfikacja wpływu zmian w ustawie termomodernizacyjnej na ekonomiczną efektywność termomodernizacji poprzez przeprowadzenie symulacji obliczeniowej. Ma ona na celu określenie, jak kształtowałyby się wysokość oraz dostępność premii termomodernizacyjnej dla analizowanych budynków, gdyby w dniu dzisiejszym obowiązywały przepisy minionych okresów funkcjonowania Ustawy.

Analiza ma charakter porównawczy. Do wszystkich wariantów obliczeniowych przyjęto stałe parametry wejściowe wynikające z audytów energetycznych (stałe koszty inwestycji oraz roczne oszczędności kosztów według bieżących cen). Zmienną w analizie stanowią natomiast algorytmy obliczania premii oraz warunki brzegowe niezbędne do uzyskania wsparcia, zdefiniowane w historycznych aktach prawnych.

W badaniu wyodrębniono cztery kluczowe okresy prawne, odpowiadające istotnym nowelizacjom systemu

wsparcia, których szczegółową charakterystykę prawną przedstawiono w rozdziale 0:

- Okres I (1998–2001):** Obowiązywanie pierwotnej Ustawy z dnia 18 grudnia 1998 r. (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1998), charakteryzującej się rygorystycznymi wymogami kredytowania (wymóg dodatkowego NPV, oraz spłata kredytu z oszczędności w ciągu 7 lat).
- Okres II (2001–2008):** Funkcjonowanie znowelizowanej Ustawy z dnia 21 czerwca 2001 r. (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2001), która zniosła wymóg dodatkowego NPV i wydłużyła okres kredytowania do 10 lat.
- Okres III (2008–2020):** Wejście w życie nowej Ustawy z dnia 21 listopada 2008 r. (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2008), wprowadzającej mechanizm limitowania wysokości premii do dwukrotności rocznych oszczędności kosztów energii.
- Okres IV (2020–2022):** Funkcjonowanie znowelizowanej Ustawy z dnia 23 stycznia 2020 r. (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2020), która wprowadziła uproszczenie zasad i odeszła od uzależniania wysokości premii termomodernizacyjnej od wysokości wykorzystanego kredytu.

Dla każdego ze zdefiniowanych okresów przeprowadzono weryfikację, czy analizowane budynki (reprezentujące lata budowy 1930, 1970, 1998, 2011) w wariantach optymalnym spełniałyby ówczesne kryteria i jaką kwotę wsparcia uzyskałyby inwestor. Pozwoli to na ocenę, w jaki stopniu ewolucja przepisów wpływała na modernizację budynków o różnym standardzie energetycznym.

Weryfikacja dostępności wsparcia w świetle pierwotnej Ustawy z 1998 r. (okres 1998–2001)

Pierwszy analizowany okres obejmuje lata obowiązywania Ustawy z dnia 18 grudnia 1998 r. o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1998). System wsparcia funkcjonujący w tym okresie charakteryzował się najbardziej rygorystycznymi kryteriami, uzależniającymi pomoc państwa od efektywności ekonomicznej inwestycji.

Tabela 19. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 1998 r. dla wariantów optymalnych. Źródło: opracowanie własne
Table 19. Results of the simulation of awarding bonuses according to the 1998 rules for optimal variants. Source: authors' own study

Lp.	Analizowany obiekt	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	NPV	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Miesięczna rata kredytu	Różnica między 1/12 rocznej oszczędności kosztów energii i miesięczną ratą kapitałową wraz z odsetkami	Minimalny udział środków własnych	Minimalny udział środków własnych	Czas zwrotu nakładów w SPBT	Premia termomodernizacyjna
		zł	zł	%	zł	zł	%	zł	zł/mies	zł	%	lat	zł
1	Obiekt 1930	2 144 310,00	251 094,00	71	628 030,2	1 300 540,63	61	20 924,50	0	843 769,37	39	3	325 135,16
2	Obiekt 1970	2 125 802,00	179 747,00	63	- 141 207,3	930 999,06	44	14 978,92	0	1 194 802,94	56	7	232 749,76
3	Obiekt 1998	1 352 760,00	46 936,00	31	- 834 537,5	243 104,87	18	3 911,33	0	1 109 655,13	82	24	60 776,22
4	Obiekt 2011	1 807 579,00	36 963,00	28	- 1 399 468,8	191 449,75	11	3 080,25	0	1 616 129,25	89	44	47 862,44

W celu przeprowadzenia wiarygodnej symulacji w warunkach roku 2025, przyjęto parametry finansowe odpowiadające aktualnej sytuacji rynkowej. Na podstawie ofert banków komercyjnych finansujących wspólnoty mieszkaniowe oraz danych Narodowego Banku Polskiego, do obliczeń przyjęto następujące wskaźniki:

- Nominalna stopa oprocentowania kredytu: 9,0% w skali roku.
- Stopa dyskonta: 4,1%

Wyniki symulacji dla wariantów optymalnych

W Tabeli 19 przedstawiono wyniki szczegółowej analizy dostępności premii dla wariantów optymalnych, przeprowadzonej zgodnie z algorytmem obowiązującą w latach 1998–2001.

Zgodnie z przepisami ustawy z 1998 roku (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1998), aby inwestor mógł ubiegać się o premię termomodernizacyjną (wynoszącą w tamtym okresie 25% kwoty kredytu), przedsięwzięcie musiało spełniać odpowiednie warunki finansowe: dodatnią wartość NPV oraz zdolność do spłaty kredytu z uzyskanych oszczędności w ciągu 7 lat.

Analiza wyników wykazuje, że jedynym budynkiem spełniającym warunek dodatniej zdyskontowanej wartości netto (NPV>0) jest budynek z 1930 roku. Wynika to z faktu, że jako obiekt w najgorszym stanie technicznym, generuje największe roczne oszczędności kosztów energii, wynoszące ok. 250 tys. zł. Pozostałe budynki (z lat 1970, 1998, 2011) w wariantach optymalnych charakteryzują się ujemnym wskaźnikiem NPV, co w świetle ówczesnych przepisów dyskwalifikowałoby je z ubiegania się o wsparcie.

Mimo spełnienia warunku o dodatnim współczynniku NPV przez budynek z 1930 roku, dla żadnego z analizowanych obiektów nie udało się spełnić warunku spłaty kredytu przy maksymalnym dopuszczalnym jego udziale

w wysokości 80% kosztów inwestycji. Jest to efekt drastycznego wzrostu kosztów materiałów na przestrzeni ostatnich lat, który nie był proporcjonalny do wzrostu cen nośników energii. Wysokie koszty inwestycji (rzędu 1,8–2,1 mln zł), rozłożone na krótki, 7-letni okres spłaty, generują miesięczne raty kapitałowe, które wielokrotnie przewyższają równowartość 1/12 rocznych oszczędności kosztów energii. Oznacza to, że oszczędności uzyskane z termomodernizacji nie są w stanie pokryć rat kredytu zaciągniętego na 80% wartości inwestycji.

Aby w warunkach analizowanej Ustawy uzyskać możliwość wsparcia finansowego i realizować inwestycję, inwestor byłby zmuszony zwiększyć wkład własny, obniżając tym samym kwotę kredytu do poziomu, w którym rata miesięczna zrównałaby się z miesięcznymi oszczędnościami. Ponieważ wysokość premii stanowiła 25% kwoty wykorzystanego kredytu, takie działanie automatycznie obniżałoby kwotę przyznanego dofinansowania.

W przypadku budynku z 1930 roku symulacja wykazała, że maksymalny możliwy udział kredytu wynosi 61% (zamiast dopuszczalnych 80%). Wymaga to konieczność wniesienia wkładu własnego w wysokości 843 769 zł. W takim układzie inwestor uzyskałby premię w wysokości 325 135 zł.

Analiza wariantowa dla analizowanych modeli

Szczególnym przypadkiem w analizie okazał się obiekt z 1970 roku. Wariant wskazany jako optymalny technicznie, w świetle przepisów z 1998 roku jest nieakceptowalny ekonomicznie, ponieważ posiada ujemną wartość współczynnika NPV (–141 207 zł.). Aby mieć możliwość uzyskania premii, konieczne było znalezienie wariantu, który spełniałby warunek o dodatniej zdyskontowanej wartości netto oraz oszczędności energii na poziomie co najmniej 25%. Wyniki symulacji dla poszczególnych wa-

Tabela 20. Zestawienie efektów energetycznych optymalnych wariantów termomodernizacyjnych. Źródło: opracowanie własne

Table 20. Summary of energy effects of optimal thermal modernization variants. Source: authors' own study

Lp.	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	NPV	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Miesięczna rata kredytu	Różnica między 1/12 rocznej oszczędności kosztów energii i miesięczną ratą kapitałową wraz z odsetkami	Minimalny udział środków własnych	Minimalny udział środków własnych	Czas zwrotu nakładów w SPBT	Premia termomodernizacyjna
		zł	zł	%	zł	zł	%	zł	zł/mies	zł	%	lat	zł
1	Wariant 1	2 949 121,60	193 294,00	68	-814 953,8	1 001 165,70	34	16 107,83	0	1 947 955,90	66	10	250 291,43
2	Wariant 2	2 125 801,60	179 747,00	63	-141 206,9	930 999,06	44	14 978,92	0	1 194 802,54	56	7	232 749,76
3	Wariant 3	909 743,60	86 602,00	32	46 433,0	448 554,80	49	7 216,83	0	461 188,80	51	5	112 138,70
4	Wariant 4	864 189,20	81 569,00	30	36 417,8	422 486,39	49	6 797,42	0	441 702,81	51	5	105 621,60
5	Wariant 5	759 500,00	72 294,00	27	38 701,3	374 446,56	49	6 024,50	0	385 053,44	51	5	93 611,64
6	Wariant 6	658 700,00	60 597,00	23	10 354,2	313 861,98	48	5 049,75	0	344 838,02	52	6	78 465,50

riantów modernizacyjnych budynku z 1970 roku zestawiono w Tabeli 20.

Analiza wariantowa wykazała, że optymalnym wariantem kwalifikującym się do wsparcia jest wariant 3. Oznacza to konieczność rezygnacji z najbardziej kosztownego działania, polegającego na dociepleniu ścian zewnętrznych. Zakres prac dla tego wariantu obejmuje:

- Wymianę instalacji c.o.;
- Modernizację instalacji c.w.u.;
- Ocieplenie stropodachu;
- Ocieplenie stropu nad piwnicą.

Wariant ten pozwala na osiągnięcie oszczędności energii na poziomie 32%, przy zachowaniu dodatniego NPV na poziomie 46 433 zł.

Maksymalna kwota kredytu, przy której miesięczna rata kredytu jest mniejsza od obliczonej równowartości 1/12 kwoty rocznych oszczędności kosztów energii, wynosi 448 555 zł, co stanowi zaledwie 49% kosztów całkowitych przedsięwzięcia. W konsekwencji, maksymalna możliwa do uzyskania premia termomodernizacyjna wynosiłaby 112 139 zł, pokrywając zaledwie 12% całkowitych nakładów inwestycyjnych.

W przypadku budynków z 1998 oraz 2011 roku, symulacja wykazała, że żaden z analizowanych wariantów nie kwalifikowałby się do uzyskania wsparcia finansowego w postaci premii termomodernizacyjnej. Obiekty te generują ujemne wartości NPV, co jest skutkiem wysokich nakładów inwestycyjnych przy niższym potencjale oszczędności energetycznej. Próba ograniczenia zakresu prac w celu poprawy wskaźnika NPV powoduje spadek oszczędności energii poniżej ustawowego progu 25%.

Podsumowując, przepisy z lat 1998–2011, przy obecnych realiach cen energii w stosunku do kosztów budowy, promowałyby inwestycje w budynki o bardzo złym stanie energetycznym, jednocześnie wymuszając od inwestorów posiadania bardzo wysokiego wkładu własnego. Aby uzyskać premię, inwestor zmuszony byłby do ograniczania zakresu prac, co prowadziłoby do realizacji inwestycji w niepełnych i niezgodnych z dzisiejszymi wymogami Warunków Technicznych.

Wpływ przepisów po nowelizacji z 2001 r. (okres 2001–2008)

Kolejny analizowany okres obejmuje lata obowiązywania znowelizowanej Ustawy z dnia 21 czerwca 2001 r. o zmianie ustawy o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1998). Kluczowe zmiany wprowadzone w tym okresie, które wpłynęły na wyniki niniejszej symulacji obejmowały:

- Usunięcie wymogu, aby inwestycja charakteryzowała się dodatnią zdyskontowaną wartością netto.
- Maksymalny okres spłaty kredytu wydłużono z 7 do 10 lat.

Wyniki symulacji dla wariantów optymalnych

W Tabeli 21 przedstawiono wyniki symulacji dla optymalnych wariantów modernizacji, obliczone zgodnie z algorytmem obowiązującym w latach 2001–2008.

Dzięki zniesieniu kryterium NPV, wszystkie analizowane budynki kwalifikują się do otrzymania premii termomodernizacyjnej. Jest to główna zmiana w porównaniu do okresu 1998–2001, gdzie budynki nowsze (1998, 2011) były całkowicie wykluczone z systemu wsparcia finansowego.

Mimo formalnej kwalifikacji, nie każdy obiekt pozwala na wykorzystanie maksymalnego dopuszczalnego udziału kredytu w wysokości 80% kosztów inwestycji. Jedynie obiekt z 1930 roku, dzięki wysokim oszczędnościom energii, spełnia warunek spłaty kredytu z nadwyżką. Inwestor może zaciągnąć pełny kredyt, co przekłada się na wysoką premię wynoszącą ok 428 tys. zł. Dzięki wydłużeniu okresu spłaty o 3 lata, miesięczna rata kredytu uległa znacznemu obniżeniu, co ułatwia spełnienie warunku, by rata mieściła się w 1/12 rocznych oszczędności kosztów energii.

W przypadku pozostałych budynków, relacja wysokich kosztów inwestycji do generowanych oszczędności wymusza na inwestorach obniżenie kwoty kredytu, tak aby miesięczna rata nie przekraczała miesięcznych oszczędności. Dla obiektu 1970 maksymalny udział kredytu wynosi 74%, dla obiektu 1998 jest to zaledwie 30%, a dla obiektu 2011

Tabela 21. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 2001 r. dla wariantów optymalnych. Źródło: opracowanie własne
Table 21. Results of the simulation of awarding bonuses according to the 2001 rules for optimal variants. Source: authors' own study

Lp.	Analizowany obiekt	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Miesięczna rata kredytu	Różnica między 1/12 rocznej oszczędności kosztów energii i miesięczną ratą kapitałową wraz z odsetkami	Minimalny udział środków własnych	Minimalny udział środków własnych	Czas zwrotu nakładów w SPBT lat	Premia termomodernizacyjna
		zł	zł	%	zł	%	zł	zł/mies	zł	%	lat	zł
1	Obiekt 1930	2 144 310,00	251 094,00	71	1 715 448,00	80	16 367,64	4 557	428 862,00	20	2	428 862,00
2	Obiekt 1970	2 125 802,00	179 747,00	63	1 569 899,78	74	14 978,92	0	555 902,22	26	3	392 474,95
3	Obiekt 1998	1 352 760,00	46 936,00	31	409 936,28	30	3 911,33	0	942 823,72	70	20	102 484,07
4	Obiekt 2011	1 807 579,00	36 963,00	28	322 832,68	18	3 080,25	0	1 484 746,32	82	40	80 708,17

kredyt może pokryć jedynie 18%. Ponieważ w tej wersji ustawy wysokość premii termomodernizacyjnej była ściśle uzależniona od wysokości zaciągniętego kredytu (25% jego wartości), im nowszy budynek (i mniejsza zdolność kredytowa), tym niższa kwota przyznanej premii. Dla budynku z 2011 roku premia wynosiłaby ok. 80 tys. zł, co stanowi zaledwie ok. 4,5% kosztów całkowitych inwestycji.

Analiza warunkowa dla analizowanych modeli

W celu weryfikacji wyboru optymalnego wariantu przedsięwzięcia, dla każdego z analizowanych modeli przeprowadzono analizę wariantową. W poprzednim analizowanym okresie (1998–2001), dla budynku z 1970 r. konieczne było ograniczenie zakresu prac do Wariantu 3, aby uzyskać dodatnie NPV. W systemie prawnym lat 2001–2008 sytuacja ta uległa zmianie. Przeprowadzona analiza wykazuje, że choć wariant 3 pozwala na zaciągnięcie kredytu w maksymalnej wysokości 80%, to kwota uzyskanej premii (181 948 zł) jest ponad dwukrotnie niższa niż w przypadku wariantu 2, gdzie premia wynosi 392 475 zł. Wariant 2, pomimo że wymusza na inwestorze wzniesienie nieco wyższego wkładu własnego (26% zamiast 20%), oferuje znacznie wyższe wsparcie finansowe oraz lepszy efekt energetyczny i eksploatacyjny. Wyniki analizy wariantowej dla obiektu z 1970 roku przedstawiono w Tabeli 22.

W przypadku nowszych obiektów (1998, 2011) analiza wykazała, że warianty uznane w rozdziale 9 za optymalne technicznie, mimo konieczności posiadania wysokich środków własnych (70–82%), pozostają najlepszym wyborem również w tym scenariuszu prawnym.

Analiza okresu 2001–2008 wskazuje, że zniesienie wymogu dodatniej wartości NPV oraz wydłużenie okresu kredytowania umożliwiły realizację inwestycji termomodernizacyjnych szerszemu gronu inwestorów. Pomimo formalnego dopuszczenia do systemu wszystkich podmiotów, mechanizm uzależniający wysokość premii od kwoty zaciągniętego kredytu prowadził do powstawania

ograniczeń finansowych, szczególnie w przypadku nowszych obiektów. Ze względu na niższy potencjał oszczędności energii ich zdolność kredytowa była ograniczona, co skutkowało obniżeniem poziomu dofinansowania i w konsekwencji czyniło takie inwestycje ekonomicznie nieopłacalnymi.

Weryfikacja dostępności wsparcia w świetle nowej Ustawy termomodernizacyjnej z 2008 r. (okres 2008–2020)

Trzeci analizowany okres to lata obowiązywania nowej Ustawy z dnia 21 listopada 2008 r. o wspieraniu termomodernizacji i remontów (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2008). Kluczową zmianą w tym okresie było całkowite zniesienie ustawowych ograniczeń dotyczących maksymalnej kwoty kredytu czy okresu jego spłaty. Wprowadzono jednak skomplikowany algorytm obliczania wysokości premii termomodernizacyjnej, która wynosiła 20% wykorzystanego kredytu, ale nie więcej niż:

- 16% kosztów całkowitych przedsięwzięcia,
- Dwukrotność rocznych oszczędności kosztów energii.

Ostateczna kwota premii była najniższą z powyższych trzech wartości. Mechanizm ten miał na celu przeciwdziałanie finansowaniu inwestycji, które przynosiły znikomy efekt energetyczny.

Wyniki symulacji dla wariantów optymalnych

W celu zachowania spójności z założeniami przyjętymi w audytach energetycznych w symulacji dla tego okresu przyjęto, że inwestor dysponuje wkładem własnym w wysokości 500 000 zł, a pozostałą część kosztów finansuje kredytem. Wyniki symulacji wysokości premii dla poszczególnych budynków przedstawiono w Tabeli 23.

Analiza wyników jednoznacznie pokazuje różnice w efektywności wsparcia, wynikające z zastosowania mechanizmu, który organiczna premię do dwukrotności rocznych oszczędności.

Tabela 22. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 2001 r. dla obiektu z 1970 r. Źródło: opracowanie własne

Table 22. Results of the simulation of awarding bonuses according to the 2001 rules for the 1970 facility. Source: authors' own study

Lp.	Analizowany obiekt	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Maksymalna wysokość możliwego do zaciągnięcia kredytu	Miesięczna rata kredytu	Różnica między 1/12 rocznej oszczędności kosztów energii i miesięczną ratą kapitałową wraz z odsetkami	Minimalny udział środków własnych	Minimalny udział środków własnych	Czas zwrotu nakładów w SPBT	Premia termomodernizacyjna
		zł	zł	%	zł	%	zł	zł/mies	zł	%	lat	zł
1	Wariant 1	2 949 121,60	193 294,00	68	1 688 218,49	57	16 107,83	0	1 260 903,11	43	7	422 054,62
2	Wariant 2	2 125 801,60	179 747,00	63	1 569 899,78	74	14 978,92	0	555 901,82	26	3	392 474,95
3	Wariant 3	909 743,60	86 602,00	32	727 794,88	80	6 944,12	273	181 948,72	20	2	181 948,72
4	Wariant 4	864 189,20	81 569,00	30	691 351,36	80	6 596,40	201	172 837,84	20	2	172 837,84
5	Wariant 5	759 500,00	72 294,00	27	607 600,00	80	5 797,31	227	151 900,00	20	5	151 900,00
6	Wariant 6	658 700,00	60 597,00	23	526 960,00	80	5 027,89	22	131 740,00	20	5	131 740,00

W przypadku starszych budynków (1930, 1970), charakteryzujących się wysokim zużyciem energii, generowane oszczędności są na tyle duże, że ich dwukrotność znacznie przewyższa zarówno 20% kredytu, jak i 16% kosztów całkowitych inwestycji. Dla tych obiektów premia jest naliczana według najbardziej korzystnego wariantu, jako 20% wartości kredytu, osiągając wartość ok. 330 tys. zł. Kwota ta stanowi realne wsparcie na poziomie 15% kosztów całkowitych.

W sytuacji, w której inwestor nie posiadałby wkładu własnego i finansował 100% inwestycji kredytem, mechanizm naliczania premii uległby zmianie. W takim przypadku premia nie byłaby liczona jako 20% kredytu, lecz zostałaby ograniczona do 16% kosztów całkowitych przedsięwzięcia, co generowałoby kwotę wsparcia rzędu 340 tys.

Odmierna sytuacja występuje w przypadku budynków nowszych (z lat 1998 i 2011). Ze względu na korzystną charakterystykę energetyczną stanu istniejącego, potencjał redukcji kosztów eksploatacyjnych jest mniejszy i roczne oszczędności kosztów kształtują się na poziomie nieprzekraczającym 50 tys. zł. W konsekwencji, mechanizm limitujący wysokość premii do dwukrotności rocznych oszczędności, w znacznym stopniu ogranicza poziom dostępnego dofinansowania.

- Dla obiektu 1998 premia zostaje ograniczona do kwoty 94 tys. zł, co pokrywa 7% kosztów inwestycji.
- Dla obiektu 2011 premia wynosi jedynie 74 tys. zł, co stanowi zaledwie 4% kosztów całkowitych.

Oznacza to, że w analizowanym okresie prawnym ograniczenie premii do dwukrotności rocznych oszczędności kosztów energii skutecznie zniechęcało do modernizacji nowszych zasobów, ponieważ przyznawana premia była nieproporcjonalnie niska w stosunku do wysokich nakładów inwestycyjnych.

Analiza warunkowa dla analizowanych modeli

W odróżnieniu od poprzednich okresów prawnych, w czasie obowiązywania ustawy z 2008 roku nie występuje konieczność poszukiwania alternatywnych wariantów modernizacyjnych w celu spełnienia wymogów formalnych. Zniesienie limitów dotyczących spłaty kredytu

z oszczędności sprawiło, że inwestor nie musi obniżać rat kredytu. Decyzja o zakresie robót zależy wyłącznie od jego zdolności kredytowej. Z tego powodu warianty uznane w rozdziale 9 za optymalne technicznie, są w tym okresie również wariantami ostatecznymi do realizacji.

Zmiany w systemie wsparcia po nowelizacji Ustawy termomodernizacyjnej z 2020 r. (okres 2020-2022)

Czwarty analizowany okres obejmuje ramy prawne, wprowadzone Ustawą z dnia 23 stycznia 2020 r. o zmianie ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2020). Nowelizacja ta stanowiła fundamentalną zmianę w przyznawaniu wsparcia, upraszczając algorytm obliczeniowy i uniezależniając wysokość premii od parametrów kredytowych czy limitów oszczędności. Kluczową zmianą w tym okresie było odejście od skomplikowanego mechanizmu „najniższej z trzech wartości” (obowiązującego w latach 2008-2020) na rzecz prostego wskaźnika. Zgodnie z nowymi przepisami wysokość premii ustalono na stałym poziomie 16% kosztów całkowitych przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. Oznacza to, że państwo zaczęło premiować sam fakt poniesienia nakładów inwestycyjnych na poprawę efektywności budynków. W Tabeli 24 przedstawiono wyniki obliczeń wysokości premii dla analizowanych budynków, przy założeniu spełnienia warunku kredytowego.

Wysokość premii termomodernizacyjnej w tym okresie jest ściśle związana z kosztami całkowitymi inwestycji. Budynki stare (1930, 1970), znajdujące się w gorszym stanie technicznym, wymagają szerszego zakresu prac, co generuje wyższe nakłady (ok. 2 ml zł). W konsekwencji obiekty te otrzymują najwyższe wsparcie finansowe (ok. 340 tys. zł). Budynki nowsze, wymagające mniejszych nakładów, otrzymują proporcjonalnie niższą premię wynoszącą około 220-290 ty. zł.

Najważniejszym efektem nowelizacji z 2020 roku jest duża poprawa sytuacji budynków nowszych. Zniesienie limitu dwukrotności oszczędności spowodowało gigantyczny wzrost przyznawanej premii. Dla obiektu 2011, w poprzednim okresie (2009-2020) premia wynosiła zaledwie 74 tys. zł. W okresie 2020-2022, dla tego samego zakre-

Tabela 23. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 2008 r. dla wariantów optymalnych. Źródło: opracowanie własne

Table 23. Results of the simulation of granting bonuses according to the 2008 rules for optimal variants. Source: authors' own study

Lp.	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność za- potrzebowania na energię	Środki własne	Środki własne	Optymalna kwota kredytu	Optymalna kwota kredytu	20% kredytu	16% kosztów całkowitych	Dwukrotność rocznej oszczędności kosztów energii	Premia termomodernizacyjna	Premia termomodernizacyjna
		zł	zł	%	zł	%	zł	%	zł	zł	zł	zł	%
0	1930	2 144 310,00	251 094,00	71	500 000,00	23	1 644 310,00	77	328 862,00	343 089,60	502 188,00	328 862,00	15
1	1970	2 125 802,00	179 747,00	63	500 000,00	24	1 625 802,00	76	325 160,40	340 128,32	359 494,00	325 160,40	15
2	1998	1 352 760,00	46 936,00	31	500 000,00	37	852 760,00	63	170 552,00	216 441,60	93 872,00	93 872,00	7
3	2011	1 807 579,00	36 963,00	28	500 000,00	28	1 307 579,00	72	261 515,80	289 212,64	73 926,00	73 926,00	4

su prac, premia wzrosła do 289 tys. zł, co oznacza blisko czterokrotny wzrost wsparcia. Dzięki temu modernizacji budynków wzniesionych w XXI wieku, mająca na celu dostosowanie ich do wymogów Warunków Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), przestała być działaniem pozbawionym wsparcia, a stała się inwestycją z gwarantowanym zwrotem 16% kosztów. Okres 2020-2022 zapewnił normalizację systemu. Poprzez powiązanie wysokości premii wyłącznie z kosztami inwestycji, wyeliminowano nierówne traktowanie budynków o lepszym standardzie wyjściowym. Nowy system stał się przejrzysty i prosty w obsłudze, a wymóg 50% udziału kredytu zapewnił współpracę wspólnot mieszkaniowych z sektorem bankowym, zapewniając skuteczny mechanizm weryfikacji rynkowej inwestycji.

Analiza wysokości premii w świetle Ustawy z 2022 roku.

Ostatnim etapem analizy porównawczej jest weryfikacja wysokości wsparcia w oparciu o aktualnie obowiązujące przepisy, wprowadzone Ustawą z dnia 29 września 2022 r. o zmianie niektórych ustaw wspierających poprawę warunków mieszkaniowych (Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2022) i wg ostatniego tekstu jednolitego Ustawy (Marszałek Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej, 2025). Regulacja ta stanowi odpowiedź ustawodawcy na rosnące koszty materiałów budowlanych i energii.

W niniejszym podrozdziale analizie poddano wyłącznie wpływ zmiany podstawowego wskaźnika procentowego premii. Pominięto dodatkowe instrumenty finansowe wprowadzone tą samą ustawą, aby zachować spójność metodologiczną z poprzednimi analizowanymi okresami.

Podstawową zmianą w analizowanym okresie było podniesienie wysokości premii termomodernizacyjnej z dotychczasowych 16% do 26% kosztów całkowitych przedsięwzięcia. Utrzymano przy tym mechanizm powiązania wsparcia z nakładami inwestycyjnymi, bez stosowania limitów wynikających z oszczędności energii. W Tabeli

25 zestawiono wartości premii obliczone dla wariantów optymalnych według aktualnie obowiązujących zasad.

Analizując wyniki w kontekście ewolucji całego systemu wsparcia, można zauważyć, że wzrost wskaźnika o 10 punktów procentowych przełożył się na znaczący przyrost nominalnej kwoty wsparcia dla wszystkich analizowanych budynków.

Dla obiektu z 1930 roku kwota uzyskiwanej aktualnie premii jest najwyższa spośród wszystkich analizowanych okresów historycznych. Aktualny system, podobnie jak w latach 2020–2022, uzależnia wysokość premii od niezbędnych nakładów inwestycyjnych. Ponieważ koszty całkowite są związane ze stanem technicznym, występuje tu zależność, że im gorszy stan pierwotny budynku, tym wyższe koszty modernizacji, a w rezultacie wyższa kwota przyznanej premii, sięgająca blisko 560 tys. zł.

W przypadku obiektu z 2011 roku, podniesienie premii do 470 tys. jest kluczowe dla zachowania opłacalności ekonomicznej inwestycji. Jak wykazano w analizie SPBT w rozdziale 9, nawet przy tak wysokim poziomie wsparcia, prosty czas zwrotu wynosi około 36 lat. Utrzymanie stawki na poziomie 16% wydłużyłoby ten czas, co mogłoby doprowadzić do zatrzymania procesu dostosowywania nowszych budynków do aktualnie obowiązujących wymogów Warunków Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022).

Ewolucja wysokości premii na przestrzeni lat 1998-2025

Zakończeniem przeprowadzanej analizy jest zestawienie zbiorcze, obrazujące jak na przestrzeni lat obowiązywania Ustawy termomodernizacyjnej zmieniała się dostępność i wysokość wsparcia finansowego dla tożsamyh modeli budynków, w zależności od obowiązującego stanu prawnego. W Tabeli 26 przedstawiono wyniki symulacji wysokości premii termomodernizacyjnej dla czterech modeli budynków w pięciu analizowanych okresach prawnych. Dodatkowo, w ostatniej kolumnie zsumowano

Tabela 24. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 2020 r. dla wariantów optymalnych. Źródło: opracowanie własne
Table 24. Results of the simulation of granting bonuses according to the 2020 rules for optimal variants. Source: authors’ own study

Lp.	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	Optymalna kwota kredytu		Premia termomodernizacyjna	
		zł	zł	%	zł	%	zł	%
0	1930	2 144 310,00	251 094,00	71	1 072 155,00	50	343 089,60	16
1	1970	2 125 802,00	179 747,00	63	1 062 901,00	50	340 128,32	16
2	1998	1 352 760,00	46 936,00	31	676 380,00	50	216 441,60	16
3	2011	1 807 579,00	36 963,00	28	903 789,50	50	289 212,64	16

Tabela 25. Wyniki symulacji przyznawania premii wg zasad z 2022 r. dla wariantów optymalnych. Źródło: opracowanie własne
Table 25. Results of the simulation of granting bonuses according to the 2022 rules for optimal variants. Source: authors’ own study

Lp.	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Koszty całkowite	Roczne oszczędności kosztów energii	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię	Optymalna kwota kredytu		Premia termomodernizacyjna	
		zł	zł	%	zł	%	zł	%
0	1930	2 144 310,00	251 094,00	71	1 072 155,00	50	557 520,60	26
1	1970	2 125 802,00	179 747,00	63	1 062 901,00	50	552 708,52	26
2	1998	1 352 760,00	46 936,00	31	676 380,00	50	351 717,60	26
3	2011	1 807 579,00	36 963,00	28	903 789,50	50	469 970,54	26

łącną wartość premii, jaką uzyskająby wszystkie cztery budynki w danym okresie, co pozwala ocenić sposób działania systemu wsparcia w poszczególnych latach.

Dla okresu 1998–2001 w obiekcie 1970 podano wartość dla wariantu ograniczonego (W3), gdyż wariant optymalny nie spełniał warunku dodatniego wskaźnika NPV.

Analizując ostatnią kolumnę tabeli, obrazującą łączną pulę środków przyznanych modelowym budynkom, można zaobserwować wyraźne zależności:

1. Pierwszy okres funkcjonowania ustawy zapewniał najniższy poziom wsparcia (suma ok. 437 tys. zł). Wynikało to z faktu, że system ten wspierał jedynie budynki w złym stanie technicznym, całkowicie wykluczając nowsze obiekty, które nie spełniały rygorystycznych wymogów dodatniego wskaźnika NPV.
2. Szczególną uwagę zwraca spadek łącznej wartości premii w trzecim okresie (z poziomu 1,0 mln zł w latach 2001–2008 do 821 tys. zł w latach 2008–2020). Jest to bezpośredni dowód na rygorystyczny charakter wprowadzonego wówczas mechanizmu limitowania premii do dwukrotności rocznych oszczędności zużycia energii. Ograniczenie to zmniejszało wysokość dofinansowania budynkom o lepszym standardzie (obiekty 1998 i 2011), co wpłynęło na obniżenie globalnej efektywności systemu wsparcia w tym okresie.
3. Aktualnie obowiązujące regulacje zapewniają najwyższy poziom wsparcia finansowego. Łączna suma przyznanych premii termomodernizacyjnych wynosi 1,93 mln zł, co stanowi ponad czterokrotny wzrost względem początków działania ustawy i ponad dwukrotny wzrost względem okresu 2008–2020. Potwierdza to, że obecny system, oparty na wskaźniku 26% kosztów całkowitych przedsięwzięcia, jest najlepiej funkcjonującym systemem wsparcia na przestrzeni lat obowiązywania ustawy termomodernizacyjnej.

Przedstawiona symulacja pokazuje zmianę w podejściu ustawodawcy do budynków o lepszym standardzie technicznym. W początkowych latach funkcjonowania ustawy (1998–2001), mechanizmy prawne oparte na wskaźnikach ekonomicznych (NPV, okres zwrotu) skutecznie wykluczały te obiekty z systemu. W kolejnych latach (2001–2020) premia dla budynku z 2011 roku wynosiła zaledwie 74 tys. zł, co stanowiło marginalny udział w kosztach inwestycji.

Dopiero nowelizacje z lat 2020 i 2022, uniezależniające premię od bieżących oszczędności energii, a wiążące je

z kosztami inwestycji, pozwoliły na realne wsparcie modernizacji tych zasobów. Obecnie dla tego samego budynku premia wynosi blisko 470 tys. zł. Oznacza to, że obecny model prawny jest pierwszym w historii systemem zrównoważonym, który zapewnia wsparcie finansowe dla całego przekroju wiekowego polskich zasobów mieszkaniowych.

Podsumowanie i wnioski

Głównym celem niniejszego opracowania była ocena wpływu ewolucji przepisów ustawy termomodernizacyjnej na dostępność, wysokość oraz strukturę wsparcia finansowego w latach 1998–2025. Cel ten zrealizowano poprzez połączenie studium teoretycznego, obejmującego analizę zmian prawnych, z badaniami symulacyjnymi przeprowadzonymi na czterech modelach budynków wielorodzinnych, reprezentujących odmienne okresy technologiczne. Przeprowadzone w ramach pracy audyty energetyczne oraz symulacje historyczne pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących zależności między wiekiem budynku a skutecznością instrumentów wsparcia.

Wyniki przeprowadzonych audytów energetycznych wykazują zależność między pierwotnym standardem technicznym budynku a potencjałem redukcji zapotrzebowania na energię. Obiekty starsze, wzniesione w latach 1930 i 1970, charakteryzują się bardzo wysokim potencjałem oszczędności energetycznej, sięgającym 60–70%, co wynika z braku izolacji termicznej w stanie pierwotnym. Z kolei budynki nowsze (reprezentowane przez modele z lat 1998 i 2011), posiadające już pierwotne warstwy izolacyjne, pozwalają na uzyskanie oszczędności jedynie na poziomie około 30%.

Przekłada się to bezpośrednio na rentowność inwestycji. W przypadku budynków starszych wskaźnik prostego czasu zwrotu (SPBT) wynosi zaledwie 6–8 lat, co czyni termomodernizację tych obiektów wysoce opłacalną. Odmienne sytuacja dotyczy budynków wzniesionych na przełomie XX i XXI wieku. Przeprowadzona analiza wykazała, że dostosowanie tych obiektów do aktualnych wymogów Warunków Technicznych 2021 jest inwestycją o niskiej stopie zwrotu. Nawet przy uwzględnieniu wysokiej, 26-procentowej premii, czas zwrotu nakładów dla budynku z 2011 roku wynosi około 36 lat. Oznacza to, że bez dedykowanego wsparcia finansowego ze strony państwa

Tabela 26. Zestawienie zbiorcze zmian wysokości premii termomodernizacyjnej w latach 1998–2025. Źródło: opracowanie własne
Table 26. Summary of changes in the amount of the thermal modernisation bonus in the years. Source: authors' own study

Podstawa prawna	Lata obowiązywania	Wysokość przyznawanych premii, zł				Suma przyznanych premii, zł
		Obiekt 1930	Obiekt 1970	Obiekt 1998	Obiekt 2011	
Ustawa z dnia 18 grudnia 1998 r.	1998–2001	325 135,16	112 138,70	Brak możliwości do uzyskania premii	Brak możliwości do uzyskania premii	437 273,86
Ustawa z dnia 21 czerwca 2001 r.	2001–2008	428 862,00	392 474,95	102 484,07	80 708,17	1 004 529,18
Ustawa z dnia 21 listopada 2008 r.	2008–2020	328 862,00	325 160,40	93 872,00	73 926,00	821 820,40
Ustawa z dnia 23 stycznia 2020 r.	2020–2022	343 089,60	340 128,32	216 441,60	289 212,64	1 188 872,16
Ustawa z dnia 29 września 2022 r.	2022–2025	557 520,60	552 708,52	351 717,60	469 970,54	1 931 917,26

stwa, termomodernizacja nowszych zasobów mieszkaniowych byłaby ekonomicznie nieopłacalna, a czas zwrotu przekraczałby 50 lat.

Analiza ewolucji systemu wsparcia na przestrzeni lat 1998–2025 pokazała fundamentalną zmianę w podejściu ustawodawcy do problematyki efektywności energetycznej. Początkowe regulacje, obowiązujące w latach 1998–2008 były skoncentrowane na interwencji w zasoby mieszkaniowe w najgorszym stanie technicznym. Rygorystyczne wymogi finansowe, w tym konieczność spłaty kredytu z uzyskanych oszczędności, skutecznie wykluczały z systemu budynki nowsze, które generowały zbyt niskie oszczędności energii, by spełnić zobowiązanie kredytowe.

W kolejnym badanym okresie, obejmującym lata 2008–2020, zidentyfikowano istotne ograniczenie w postaci mechanizmu limitującego wysokość premii do dwukrotności rocznych oszczędności kosztów energii. Przeprowadzona symulacja wykazała, że rozwiązanie to wykluczało z systemu budynki o lepszym standardzie wyjściowym. Mimo ponoszenia przez inwestorów wysokich nakładów na modernizację, system zaniżał kwotę wsparcia, co skutkowało przyznawaniem niższych środków, nieadekwatnych do skali inwestycji.

Przełomowym momentem w historii ustawy okazały się nowelizacje z lat 2020 i 2022. Zmiana sposobu naliczania premii, polegająca na powiązaniu jej wysokości bezpośrednio z kosztami inwestycji (początkowo 16%, a obecnie 26%) oraz zniesienie limitów oszczędnościowych, wyeliminowały systemowe ograniczenia dla nowszego budownictwa. Obecny algorytm uznano za najbardziej sprawiedliwy, ponieważ uzależnia on wysokość wsparcia finansowego od niezbędnych nakładów inwestycyjnych, które są bezpośrednio związane ze stanem technicznym konkretnego budynku.

Podsumowując, aktualnie obowiązujące regulacje prawne stworzyły najkorzystniejsze warunki do realizacji inwestycji termomodernizacyjnych w całej historii funkcjonowania systemu. Sumaryczna wartość premii dla analizowanych modeli w obecnym systemie prawnym jest ponad czterokrotnie wyższa niż w początkowych okresach działania ustawy. Podniesienie stawki premii do 26% rekompensuje wzrost kosztów materiałów. Tym samym, ewolucja przepisów doprowadziła do powstania instrumentu, który w sposób zrównoważony wspiera zarówno głęboką termomodernizację starych budynków, jak i konieczną modernizację budynków współczesnych, realizując cele polityki energetycznej państwa w pełnym przekroju wiekowym zasobów mieszkaniowych.

Bibliografia

- Marszałek Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. (2025). Obwieszczenie z dnia 26 września 2025 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów oraz o centralnej ewidencji emisyjności budynków (Dz.U. 2025 poz. 1419). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20250001419> (Dostęp z 15.11.2025)
- Minister Infrastruktury i Rozwoju. (2015). Rozporządzenie z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz. U. 2015 poz. 376)
- Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225).
- NAPE. (2011). Podręcznik typologii budynków mieszkalnych z przykładami działań mających na celu zmniejszenie ich energochłonności, *Narodowa Agencja Poszanowania Energii SA*, Warszawa 2011.
- Robakiewicz, M. (2021). Vademecum audyty energetycznej, *Fundacja Poszanowania Energii*, Warszawa
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (1998). Ustawa z dnia 18 grudnia 1998 r. o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Dz.U. 1998 nr 162 poz. 1121). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU19981621121> (Dostęp z 15.11.2025)
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2001). Ustawa z dnia 21 czerwca 2001 r. o zmianie ustawy o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Dz.U. 2001 nr 76 poz. 808). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20010760808> (Dostęp z 15.11.2025)
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2008). Ustawa z dnia 21 listopada 2008 r. o wspieraniu termomodernizacji i remontów (Dz.U. 2008 nr 223 poz. 1459). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdU20082231459> (Dostęp z 15.11.2025)
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2020). Ustawa z dnia 23 stycznia 2020 r. o zmianie ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów (Dz.U. 2020 poz. 412). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20200000412> (Dostęp z 15.11.2025)
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2022). Ustawa z dnia 29 września 2022 r. o zmianie niektórych ustaw wspierających poprawę warunków mieszkaniowych (Dz.U. 2022 poz. 2456). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220002456> (Dostęp z 15.11.2025)

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.



Sezonowa ocena komfortu cieplnego i zachowań adaptacyjnych użytkowników w budynkach biurowych z wentylacją naturalną i mechaniczną – badania terenowe

Seasonal assessment of thermal comfort and occupants' adaptive behaviours in naturally and mechanically ventilated office buildings – a field study



Dr inż. Aleksandra Lipczyńska

ORCID ID: [0000-0001-6033-9557](https://orcid.org/0000-0001-6033-9557)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska

aleksandra.lipczynska@polsl.pl



Mgr inż. Mirella Fuhrmann

ORCID ID: [0009-0001-1271-7119](https://orcid.org/0009-0001-1271-7119)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-4742-5263](https://orcid.org/0000-0002-4742-5263)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Mgr inż. Stanisław Kocik

ORCID ID: [0009-0002-5391-9750](https://orcid.org/0009-0002-5391-9750)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Krzysztof Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-7049-1939](https://orcid.org/0000-0002-7049-1939)

Wydział Budownictwa

Politechnika Śląska

Słowa kluczowe: komfort cieplny, wentylacja naturalna, wentylacja mechaniczna, działania adaptacyjne, budynki biurowe

Streszczenie

Celem pracy była ocena sezonowych różnic w odczuwanym komforcie cieplnym oraz w zachowaniach użytkowników dwóch budynków biurowych zlokalizowanych w Gliwicach, różniących się strategią wentylacji: naturalną i mechaniczną. Badania terenowe prowadzono w czterech porach roku w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Analiza bazowała na pomiarach temperatury powietrza i wilgotności względnej w strefie przebywania użytkowników oraz cyklicznie realizowanych badaniach ankietowych, obejmujących ocenę odczucia cieplnego (TSV), akceptowalności cieplnej (TACC), izolacyjności odzieży oraz działań adaptacyjnych. Zależność TSV od temperatury powietrza analizowano z wykorzystaniem modeli liniowych i nieliniowych, w tym metod wygładzania lokalnego oraz modeli rozszerzonych o zmienne środowiskowe i behawioralne. W obu budynkach wzrost temperatury powietrza powodował wzrost oceny TSV, jednak sama temperatura wyjaśniała jedynie niewielką część zmienności odpowiedzi użytkowników. Temperatury neutralne wyznaczone z regresji linio-

Keywords: thermal comfort, natural ventilation, mechanical ventilation, adaptive behaviour, office buildings

Abstract

The aim of this study was to assess seasonal differences in perceived thermal comfort and occupants' adaptive behaviours in two office buildings with different ventilation strategies: natural and mechanical ventilation. Field measurements were conducted across four seasons under real operating conditions. The analysis was based on indoor air temperature and relative humidity measured at workstations, together with repeated occupant surveys covering thermal sensation vote (TSV), thermal acceptability (TACC), clothing insulation and adaptive actions. The relationship between TSV and air temperature was analysed using linear and nonlinear models, including local smoothing methods, as well as models extended to include environmental and behavioural variables. In both buildings, increasing indoor air temperature was associated with higher TSV values. However, air temperature alone explained only a limited part of the variability in occupants' responses. Neutral temperatures estimated from linear regression were approximately 21.1°C in the naturally

wej wyniosły około 21,1°C w budynku z wentylacją naturalną oraz 22,1°C w budynku z wentylacją mechaniczną. Największe różnice między obiektami dotyczyły sposobu adaptacji. W budynku z wentylacją naturalną częściej wykorzystywano otwieranie okien i osłony przeciwsłoneczne, natomiast w budynku z wentylacją mechaniczną – osobiste systemy kształtowania środowiska, szczególnie latem. Adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy. Wyniki wskazują, że ocena komfortu cieplnego w biurach powinna uwzględniać nie tylko parametry powietrza, lecz także akceptowalność warunków, lokalne możliwości regulacji oraz rzeczywiste zachowania użytkowników. W praktyce wspiera to stosowanie rozwiązań hybrydowych typu mixed-mode.

ventilated building and 22.1°C in the mechanically ventilated building. The main differences between the buildings were related to adaptive behaviour. In the naturally ventilated building, occupants more frequently used window opening and solar shading, whereas in the mechanically ventilated building – personal environmental control systems, especially in summer. Clothing adaptation was mainly seasonal rather than a frequent daily response. The results indicate that thermal comfort assessment in offices should not rely solely on air temperature. Thermal acceptability, local control opportunities and actual adaptive behaviours should also be considered. From a practical perspective, the findings support hybrid mixed-mode strategies combining stable HVAC operation with user-accessible local control.

Wstęp

Zapewnienie odpowiednich warunków cieplnych w budynkach biurowych jest jednym z podstawowych zadań projektowania i eksploatacji instalacji ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC). W praktyce nie chodzi jednak wyłącznie o utrzymanie zadanej temperatury powietrza. Na ocenę komfortu wpływają również inne parametry środowiska takie jak wilgotność, prędkość przepływu powietrza, temperatura przegród, nasłonecznienie, jakość powietrza wewnętrznego, a także sposób użytkowania pomieszczeń. Coraz większego znaczenia nabierają również koszty eksploatacyjne oraz zużycie energii, zwłaszcza w warunkach rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków (Khoshbakht i in., 2023; Zagreus i in., 2004).

Przez wiele lat podstawą oceny komfortu cieplnego był model równowagi cieplnej opracowany przez P.O. Fangera (Fanger, 1970), wykorzystujący wskaźniki PMV (przewidywana średnia ocena, z ang. *Predicted Mean Vote*) oraz PPD (przewidywany odsetek niezadowolonych, z ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*), opisany w normie PN-EN ISO 7730 (PN, 2026). Model ten pozwala w uporządkowany sposób powiązać parametry środowiska wewnętrznego, aktywność użytkownika oraz izolacyjność odzieży z przewidywaną oceną komfortu cieplnego. Jest to nadal przydatne narzędzie w projektowaniu i ocenie instalacji HVAC, zwłaszcza w budynkach o stabilnych warunkach wewnętrznych. Jego ograniczeniem jest jednak założenie, że użytkownik pozostaje w dużej mierze biernym odbiorcą warunków panujących w pomieszczeniu, a jego oczekiwania cieplne są względnie stałe i takie same dla każdego (ASHRAE, 2023; de Dear i in., 2013; Wang i in., 2018).

Doświadczenia eksploatacyjne oraz wyniki badań terenowych pokazują, że rzeczywiste odczucia użytkowników są bardziej złożone, i takie podejście jest niewystarczające, zwłaszcza w obliczu rozwoju budownictwa spersonalizowanego i ukierunkowanego na potrzeby użytkownika (ang. *precision-comfort approach*) (Wang i in., 2018). Osoby pracujące w biurach reagują na zmiany warunków cieplnych w różny sposób: otwierają lub zamykają okna, zmieniają odzież, korzystają z żaluzji i rolet albo z urządzeń umożliwiających lokalną regulację warunków w bezpośrednim otoczeniu stanowiska pracy. W budynkach, w których użytkownicy mają możliwość wpływania na swoje najbliższe otoczenie, często akceptują szerszy zakres temperatury niż wynikałoby to z klasycznej oceny

PMV/PPD. Zjawisko to opisuje teoria komfortu adaptacyjnego (ASHRAE, 2023; PKN, 2019), rozwijana na podstawie wielu badań terenowych (Brager i in., 2004; de Dear & Brager, 2002; de Dear i in., 2013; Gupta & Howard, 2019; Nicol & Humphreys, 2002; Rawal i in., 2022). Podejście adaptacyjne zakłada, że komfort cieplny jest wynikiem wzajemnego oddziaływania człowieka, budynku i instalacji. Użytkownik nie jest więc wyłącznie odbiorcą warunków wewnętrznych, lecz aktywnie na nie reaguje. Adaptacja może mieć charakter behawioralny (np. przez zmianę odzieży, otwarcie okna lub użycie osłony przeciwsłonecznej), fizjologiczny (związany z przyzwyczajaniem organizmu do warunków sezonowych, tzw. aklimatyzacją) oraz psychologiczny (wynikający z oczekiwań wobec danego typu budynku).

Jak wykazali Graham & Parkinson (2021), satysfakcja z warunków panujących w pomieszczeniu w istotnym stopniu zależy nie tylko od parametrów fizycznych, ale również od subiektywnego poczucia kontroli nad środowiskiem wewnętrznym (ang. *occupant-centric control*). Użytkownicy zwykle lepiej oceniają warunki cieplne wtedy, gdy mają możliwość ich lokalnej regulacji, nawet jeśli parametry fizyczne nie są idealne (Graham & Parkinson, 2021; Kim, Schiavon, i in., 2018; Kim, Zhou, i in., 2018). Szczególne znaczenie mają w tym kontekście rozwiązania umożliwiające użytkownikom lokalną regulację warunków w ich bezpośrednim otoczeniu, w tym osobiste systemy kształtowania środowiska PECS (ang. *Personal Environmental Control Systems*). Do tych systemów zalicza się m.in. urządzenia służące do miejscowego ogrzewania, chłodzenia, wentylacji lub regulacji innych parametrów mikrośrodowiska na stanowiskach pracy (Fuhrmann i in., 2025; Khovalyg i in., 2025).

W warunkach Europy Środkowej, w tym w Polsce, zagadnienie to staje się szczególnie ważne. Budynki muszą być przygotowane zarówno na okresy niskich temperatur zewnętrznych, jak i na coraz częstsze epizody wysokich temperatur latem. Wzrost liczby dni upalnych, intensyfikacja miejskiej wyspy ciepła oraz duże zyski ciepła od nasłonecznienia i wyposażenia biurowego zwiększają ryzyko przegrzewania pomieszczeń (Graham & Parkinson, 2021; Lamsal i in., 2023). Dotyczy to zwłaszcza budynków z wentylacją naturalną, w których skuteczność chłodzenia nocnego lub przewietrzania zależy od warunków zewnętrznych, organizacji pracy oraz zachowań użytkowników. Przegrzewanie pomieszczeń biurowych obniża koncentrację i samopoczucie użytkowników oraz w dłuższym

okresie prowadzi do wzrostu ich wymagań w zakresie chłodzenia (Khoshbakht i in., 2023; Liu i in., 2013).

Z drugiej strony pełna klimatyzacja i mechaniczna kontrola środowiska wewnętrznego nie zawsze rozwiązują kwestie prawidłowego utrzymania komfortowych warunków mikroklimatu. W budynkach mechanicznie wentylowanych i klimatyzowanych możliwe jest precyzyjne utrzymywanie parametrów powietrza, ale wiąże się to z większym zużyciem energii, kosztami eksploatacji oraz koniecznością prawidłowej regulacji i serwisowania instalacji. Niewłaściwa eksploatacja systemów HVAC może prowadzić do niezadowolenia użytkowników, skarg na przeciągi, zbyt niską lub zbyt wysoką temperaturę, a w niektórych przypadkach także do problemów z jakością powietrza wewnętrznego (Frontczak i in., 2011; Zagreus i in., 2004).

Z tego względu coraz większe zainteresowanie budzą rozwiązania hybrydowe, określane jako systemy typu mixed-mode. Łączą one możliwość wykorzystania wentylacji naturalnej z okresowym lub wspomagającym działaniem systemów mechanicznych (Khoshbakht i in., 2023; Rupp i in., 2025; Rupp i in., 2022). Takie podejście może ograniczać zużycie energii, a jednocześnie zapewniać większą elastyczność w działaniu budynku. Warunkiem skuteczności tych rozwiązań jest jednak właściwe rozpoznanie rzeczywistych zachowań użytkowników. W praktyce projektowej nie wystarczy przyjąć, że okna, osłony przeciwsłoneczne lub lokalne urządzenia wspomagające PECS będą używane zgodnie z założeniami projektanta. Należy sprawdzić, jak są one wykorzystywane w codziennej eksploatacji i jaki mają wpływ na komfort oraz zużycie energii (Shrestha i in., 2025).

Pomijanie zachowań użytkowników prowadzi do pogłębiania tzw. luki eksploatacyjnej (ang. *performance gap*), w której założenia projektowe istotnie odbiegają od rzeczywistego zużycia energii oraz satysfakcji użytkowników (Dennis, 2017; Lamsal i in., 2023; Rupp i in., 2025). Budynek spełniający wymagania projektowe może być oceniany negatywnie, jeśli użytkownicy nie mają możliwości reagowania na zmienne warunki lub jeśli sposób działania instalacji nie odpowiada ich oczekiwaniom. Z tego powodu istotne są całoroczne badania terenowe prowadzone w rzeczywistych budynkach biurowych. Pomiary in situ, połączone z regularnym zbieraniem opinii użytkowników, pozwalają uchwycić sezonową zmienność warunków cieplnych oraz sposoby adaptacji użytkowników. Jest to szczególnie ważne w klimacie umiarkowanym przejściowym, w którym w ciągu roku występują duże różnice temperatury zewnętrznej, nasłonecznienia i sposobu użytkowania instalacji (Khoshbakht i in., 2023; Rijal i in., 2019). W porównaniu z krótkotrwałymi pomiarami lub samymi symulacjami komputerowymi, długookresowy monitoring daje pełniejszy obraz rzeczywistego funkcjonowania budynku i oczekiwań stawianych przez użytkowników.

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki badań nad komfortem cieplnym przeprowadzonych w dwóch budynkach biurowych zlokalizowanych w Gliwicach. Porównano odczucia cieplne pracowników oraz ich zachowania adaptacyjne w budynku z wentylacją naturalną (Budynek A), oraz w nowoczesnym biurowcu z wentylacją mechaniczną i klimatyzacją (Budynek B). Okres badawczy uwzględnił cztery sezony pomiarowe, co pozwoliło na precyzyjne

uchwycenie sezonowej zmienności takich parametrów jak izolacyjność odzieży, częstotliwość i motywacja operowania oknami oraz skala wykorzystania osobistych systemów wspomagających PECS. Celem pracy było określenie, w jaki sposób rodzaj wentylacji i dostępny zakres kontroli nad środowiskiem wewnętrznym wpływają na komfort cieplny oraz zachowania użytkowników biur. Uzyskane wyniki mogą być przydatne dla projektantów i zarządców budynków biurowych przy doborze strategii wentylacji, chłodzenia i lokalnej regulacji warunków cieplnych. Wnioski z badań wskazują również, że ocena komfortu w budynkach biurowych powinna uwzględniać nie tylko parametry techniczne instalacji, lecz także rzeczywisty sposób korzystania z budynku przez jego użytkowników. Ma to istotne znaczenie przy projektowaniu obiektów energooszczędnych, odpornych na zmiany klimatu i jednocześnie zapewniających wysoki poziom satysfakcji pracowników.

Metodologia

Badania miały charakter terenowy i długoterminowy. Przeprowadzono je w dwóch użytkowanych budynkach biurowych zlokalizowanych w tym samym obszarze miejskim w Gliwicach. Dobór obiektów z tej samej lokalizacji pozwolił ograniczyć wpływ różnic klimatu zewnętrznego a jednocześnie umożliwił porównanie budynków o odmiennej strategii kształtowania środowiska wewnętrznego.

Analizą objęto cztery pory roku: wiosnę, lato, jesień i zimą. W każdej porze prowadzono dwutygodniową kampanię pomiarową, podczas której zbierano jednocześnie dane środowiskowe i ankietowe. Badania obejmowały łącznie 82 dni pomiarowe: 46 dni w budynku A oraz 36 dni w budynku B. W badaniu uczestniczyło łącznie 30 stałych użytkowników biur, wykonujących rutynowe zadania biurowe. W budynku A udział wzięło 11 osób, natomiast w budynku B 19 osób. Uczestnicy dobrowolnie przekazywali informacje o swoich odczuciach cieplnych i działaniach adaptacyjnych podczas normalnej pracy.

Podstawą oceny komfortu cieplnego była deklarowana przez użytkowników ocena odczucia cieplnego (TSV, ang. *Thermal Sensation Vote*). Zastosowanie wskaźnika TSV pozwoliło analizować rzeczywistą, subiektywną percepcję warunków środowiska wewnętrznego oraz powiązać ją z działaniami adaptacyjnymi podejmowanymi przez użytkowników.

W badaniach przyjęto trzy główne założenia. Po pierwsze, założono jednorodny charakter aktywności użytkowników, ponieważ uczestnicy wykonywali typową pracę biurową, odpowiadającą aktywności metabolicznej około 1,2 met. Po drugie, przyjęto, że nie wystąpiły istotne zakłócenia eksploatacyjne w okresie badań, takie jak awarie systemów HVAC lub nietypowe przerwy w funkcjonowaniu instalacji. Po trzecie, należy uwzględnić ograniczony zakres sezonowy pomiarów, ponieważ każda kampania obejmowała wybrany okres w danej porze roku. Może to wpływać na możliwość pełnego uogólnienia wyników na cały rok eksploatacji budynków, jednak pozwala porównać reakcje użytkowników w reprezentatywnych warunkach sezonowych.

Opis budynków objętych badaniami i aparatury pomiarowej

Budynek A był obiektem z wentylacją naturalną, z centralnym systemem ogrzewania i lokalną regulacją, bez aktywnego systemu chłodzenia. W okresie letnim środowisko tego budynku można więc traktować jako typu *free-running*, w którym istotną rolę w regulacji warunków cieplnych odgrywają działania użytkowników, takie jak otwieranie okien, stosowanie osłon przeciwsłonecznych czy korzystanie z urządzeń osobistych. Z kolei, budynek B był wyposażony w system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z sekcją chłodzenia. W tym przypadku warunki wewnętrzne były w większym stopniu kształtowane przez centralnie sterowany system HVAC, a bezpośredni wpływ użytkowników na parametry środowiska był bardziej ograniczony.

Do analizy wybrano łącznie 17 pomieszczeń biurowych, różniących się kubaturą, orientacją względem stron świata oraz stopniem przeszkleń. Kryterium doboru stanowiła możliwość prowadzenia równoległych pomiarów środowiskowych i badań ankietowych użytkowników.

W pomieszczeniach biurowych prowadzono ciągły monitoring temperatury powietrza (T_a) oraz wilgotności względnej (RH). Pomiary wykonywano przy użyciu rejestratorów HOBO UX100-003 (Onset Computer Corporation, USA), o dokładności $\pm 0,2^\circ\text{C}$ dla temperatury i $\pm 3,5\%$ RH dla wilgotności względnej. Rejestratory umieszczono bezpośrednio przy stanowiskach pracy użytkowników, na wysokości około 0,6 m, odpowiadającej strefie tułowia osoby siedzącej. Dane rejestrowano w interwale 5 minut, a następnie przypisano do ankiet na podstawie czasu ich wypełnienia.

Ankiety

Uczestnicy wypełniali dwa typy kwestionariuszy: ankietę ogólną oraz powtarzaną ankietę dzienną. Uczestnicy otrzymywali automatyczne powiadomienia e-mail z prośbą o wypełnienie krótkiej, zanonimizowanej анкеты. Odpowiedzi były powiązane z unikalnym identyfikatorem użytkownika, co umożliwiło analizę powtarzalnych odpowiedzi tej samej osoby w różnych warunkach.

Ankieta ogólna była wypełniana jednorazowo na początku udziału w badaniu i obejmowała podstawowe dane demograficzne oraz antropometryczne, takie jak wiek, wzrost i masa ciała. Dane te pozwalały scharakteryzować grupę badawczą oraz uzupełnić interpretację indywidualnych różnic w ocenach komfortu cieplnego.

Ankieta dzienna była wypełniana trzy razy dziennie, o godzinie 8:00, 11:00 i 14:00, podczas przebywania uczestników w pomieszczeniach biurowych. Kwestionariusz obejmował ocenę ogólnego odczucia cieplnego całego ciała. Odczucie ciepłe oceniano za pomocą wskaźnika TSV zgodnie z siedmiostopniową skalą ASHRAE (2023). Skala ta obejmuje wartości od -3 do +3, gdzie: -3 oznacza „zimno”, -2 „chłodno”, -1 „lekko chłodno”, 0 „neutralnie”, +1 „lekko ciepło”, +2 „ciepło”, a +3 „gorąco”.

W ankiecie oceniano również akceptowalność cieplną TACC (ang. *Thermal Acceptability*), stosując siedmiostopniową skalę od -3 do +3, gdzie: -3 – bardzo nieakceptowalne, -2 – nieakceptowalne, -1 – lekko nieakceptowalne, 0 – neutralne, +1 – lekko akceptowalne, +2 – akceptowalne, +3 – bardzo akceptowalne. Na podstawie odpowiedzi

TACC w dalszej analizie wyznaczono dwa wskaźniki: poziom akceptowalności cieplnej, określony jako udział głosów TACC ≥ 1 , oraz poziom braku dyskomfortu, określony jako udział głosów TACC ≥ 0 .

Uczestnicy dokumentowali także aktualny ubiór oraz ewentualne modyfikacje odzieży dokonane od czasu poprzedniej анкеты. Na podstawie deklarowanych elementów garderoby oszacowano izolacyjność odzieży w jednostkach clo zgodnie z podejściem stosowanym w ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2023). Kwestionariusz obejmował również informacje o stanie elementów regulacji środowiska w bezpośrednim otoczeniu stanowiska pracy. Uczestnicy wskazywali stan otwarcia okna: zamknięte, uchylone lub otwarte; stan ochrony przeciwsłonecznej: brak osłony, częściowe zacienienie lub pełne zacienienie; oraz korzystanie z osobistych systemów wspomagających regulację środowiska cieplnego PECS, takich jak wentylator, grzejnik lub klimatyzator lokalny.

Analiza statystyczna

Analizę rozpoczęto od statystyk opisowych oraz porównań w układzie budynek-pora roku. Wyniki dla temperatury, wilgotności, TSV, TACC i izolacyjności odzieży przedstawiono m.in. za pomocą wykresów pudełkowych. Wykres pudełkowy pozwala praktycznie ocenić nie tylko wartość typową, ale też zmienność danych: linia wewnątrz pudełka oznacza medianę, pudełko obejmuje środkowe 50% wyników, a wąsy i punkty odstające pokazują rozrzut oraz obserwacje nietypowe. Na wykresach wartość średnią oznaczono białym rombem. Z punktu widzenia eksploatacji budynków szerokie pudełko lub liczne wartości odstające mogą wskazywać na zróżnicowanie warunków lokalnych albo na grupę użytkowników doświadczających warunków odbiegających od typowych.

Zależność oceny odczucia cieplnego od temperatury powietrza analizowano za pomocą regresji liniowej oraz wygładzania lokalnego LOESS. W tej części uwzględniono obserwacje z temperaturą $T_a \leq 30^\circ\text{C}$, aby ograniczyć wpływ wartości skrajnych. Na podstawie regresji liniowej wyznaczono temperaturę neutralną, odpowiadającą wartości TSV = 0. Dodatkowo porównano kilka modeli regresyjnych, w tym modele liniowe, wielomianowe, spline oraz modele regresji wielorakiej rozszerzone o sezon, wilgotność względną, izolacyjność odzieży, sposób wentylacji, otwarcie okien, osłony przeciwsłoneczne i stosowanie PECS.

Dopasowanie modeli oceniano na podstawie współczynnika determinacji (R^2), jego wersji skorygowanej oraz pierwiastka średniego błędu kwadratowego (RMSE). Współczynnik R^2 informuje, jaka część zmienności ocen użytkowników jest wyjaśniana przez model; im wyższa wartość, tym lepsze dopasowanie, ale sama wysoka wartość R^2 nie oznacza jeszcze, że model będzie przydatny praktycznie. Skorygowane R^2 uwzględnia liczbę zmiennych w modelu i jest szczególnie użyteczne przy porównywaniu modeli o różnej złożoności, ponieważ ogranicza sztuczną poprawę wyniku po dodaniu kolejnych zmiennych. RMSE określa przeciętny błąd predykcji modelu w jednostkach analizowanej zmiennej, czyli w tym przypadku w punktach skali TSV; niższe RMSE oznacza mniejsze przeciętne odchylenie przewidywań modelu od rzeczywistych ocen użytkowników. Za istotne statystycznie uznawano zależ-

ności spełniające warunek $p < 0,05$, co oznaczało małe prawdopodobieństwo uzyskania obserwowanego wyniku wyłącznie przypadkowo.

Działania adaptacyjne użytkowników analizowano w odniesieniu do otwierania okien, stosowania ochrony przeciwsłonecznej, modyfikacji odzieży oraz użycia PECS. Częstość występowania tych działań przedstawiono jako udziały względne w podziale na budynek i porę roku. W przypadku działań zależnych od temperatury zastosowano regresję logistyczną, wyznaczając prawdopodobieństwo wystąpienia danego działania w funkcji T_a wraz z 95% przedziałami ufności.

Wyniki

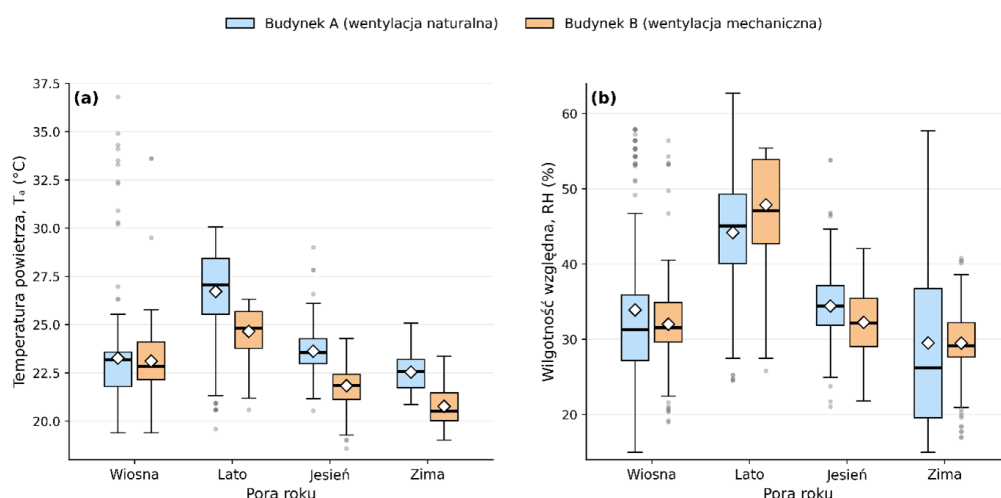
Sezonowa ocena odczuć cieplnych i akceptowalności warunków cieplnych

Analiza sezonowa parametrów środowiska wewnętrznego wykazała wyraźne zróżnicowanie temperatury powietrza i wilgotności względnej pomiędzy porami roku oraz pomiędzy badanymi budynkami (Rysunek 1). W obu obiektach najwyższe wartości temperatury powietrza występowały latem, natomiast najniższe zimą. Budynek A, wentylowany naturalnie, charakteryzował się ogólnie wyższą temperaturą powietrza niż budynek B z wentylacją mechaniczną, szczególnie w okresie letnim, jesiennym i zimowym. Latem średnia temperatura w budynku A wyniosła około $26,7^{\circ}\text{C}$, podczas gdy w budynku B około $24,7^{\circ}\text{C}$, co wskazuje, jak można było oczekiwać, na większą podatność budynku z wentylacją naturalną na wzrost temperatury w okresie ciepłym. Jednocześnie w budynku A zaobserwowano większą zmienność temperatury oraz pojedyncze wartości odstające, szczególnie wiosną, co może świadczyć o silniejszym wpływie warunków zewnętrznych, nasłonecznienia oraz sposobu użytkowania okien. Wilgotność względna również wykazywała charakter sezonowy – najwyższe wartości odnotowano latem, a najniższe zimą. W przeciwieństwie do temperatury, różnice wilgotności między budynkami nie były jednoznacz-

ne w całym roku. Latem wyższe wartości RH występowały w budynku B, natomiast w pozostałych sezonach poziomy wilgotności były bardziej zbliżone. Z punktu widzenia komfortu cieplnego i eksploatacji instalacji HVAC wyniki te wskazują, że budynek z wentylacją mechaniczną zapewniał bardziej stabilne warunki termiczne, zwłaszcza w zakresie temperatury powietrza, natomiast budynek z wentylacją naturalną był bardziej podatny na sezonowe i chwilowe wahania parametrów środowiska wewnętrznego.

Analiza sezonowej zmienności ocen użytkowników wykazała różnice zarówno między porami roku, jak i między badanymi budynkami. Na Rysunku 2 przedstawiono rozkład ocen odczucia cieplnego (TSV) oraz akceptowalności cieplnej (TACC). W przypadku TSV w obu budynkach wartości koncentrowały się głównie w pobliżu zakresu neutralnego, jednak w budynku A, z wentylacją naturalną, widoczne były wyższe wartości TSV w okresie letnim i jesiennym, co wskazuje na częstsze odczuwanie warunków jako cieplejszych. Zimą w obu budynkach wartości TSV przesunęły się w kierunku niższych ocen, szczególnie w budynku B z wentylacją mechaniczną. Rozkład ocen TACC wskazuje, że akceptowalność cieplna była zróżnicowana sezonowo. W budynku B najwyższe wartości TACC obserwowano wiosną i latem, natomiast zimą nastąpiło wyraźne obniżenie ocen. W budynku A korzystniejsze wartości TACC występowały przede wszystkim jesienią i zimą, co sugeruje lepsze dopasowanie warunków cieplnych do oczekiwań użytkowników w chłodniejszych okresach roku.

Uzupełnieniem tej analizy jest Rysunek 3, na którym przedstawiono procentowy udział głosów spełniających przyjęte kryteria akceptowalności cieplnej i braku dyskomfortu. Akceptowalność cieplną określono jako udział głosów $TACC \geq 1$, natomiast brak dyskomfortu jako udział głosów $TACC \geq 0$. Wyniki potwierdzają obserwacje z rozkładów pudełkowych. W budynku A najwyższy poziom akceptowalności cieplnej wystąpił jesienią i wyniósł 52,8%, natomiast najwyższy poziom braku dyskomfortu odnotowano jesienią i zimą, odpowiednio 84,0% oraz



Rysunek 1. Sezonowa zmienność temperatury powietrza (a) oraz wilgotności względnej powietrza (b) w budynkach A i B. Wykresy pudełkowe przedstawiają rozkład wyników w podziale na pory roku; linia wewnątrz pudełka oznacza medianę, a biały romb wartość średnią. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. Seasonal variation in indoor air temperature (a) and relative humidity (b) in buildings A and B. The boxplots show the distribution of measurements by season; the line within each box indicates the median, while the white diamond denotes the mean. Source: authors' own study

82,6%. W budynku B najwyższą akceptowalność cieplną oraz najwyższy poziom braku dyskomfortu uzyskano latem, odpowiednio 50,6% i 88,0%. Najmniej korzystne wyniki w budynku B wystąpiły zimą, kiedy akceptowalność cieplna spadła do 26,3%, a brak dyskomfortu do 62,4%. Oznacza to, że budynek z wentylacją mechaniczną zapewniał użytkownikom korzystniejsze warunki, głównie w okresie ciepłym, podczas gdy budynek z wentylacją naturalną osiągał lepsze wyniki pod względem ograniczenia dyskomfortu w okresie jesienno-zimowym.

Zestawienie Rysunków 2 i 3 pokazuje, że neutral-

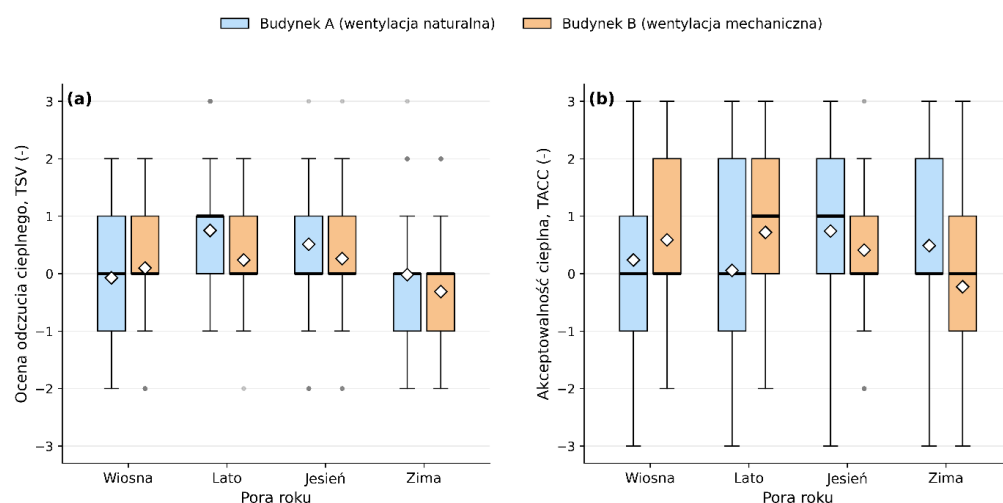
na wartość mediany TSV nie zawsze oznacza wysoki poziom akceptowalności warunków cieplnych. Przykładowo, w niektórych sezonach mediana odczucia cieplnego była bliska 0, ale udział głosów wskazujących na pełniejszą akceptację, czyli $TACC \geq 1$, pozostawał stosunkowo niski. Oznacza to, że użytkownicy mogli nie odczuwać warunków jako wyraźnie ciepłych lub chłodnych, ale jednocześnie nie zawsze oceniali je jako satysfakcjonujące. Dlatego równoległa analiza TSV, TACC oraz udziału głosów spełniających kryteria akceptowalności daje pełniejszy obraz jakości środowiska wewnętrznego niż sama analiza median lub wartości średnich.

Z punktu widzenia projektantów i osób odpowiedzialnych za eksploatację budynków szczególnie istotna jest relacja między medianą, rozstępem międzykwartylowym IQR (ang. *Interquartile Range*), długością wąsów oraz udziałem użytkowników deklarujących akceptowalność

lub brak dyskomfortu. Mediana pokazuje typową ocenę użytkowników, IQR informuje o zgodności opinii większości badanych, a długość wąsów i wartości odstające wskazują na ryzyko występowania lokalnych lub indywidualnych problemów z komfortem. Z kolei wskaźniki z Rysunku 3 pokazują, jakie odsetki użytkowników rzeczywiście oceniają warunki jako akceptowalne lub przynajmniej niedyskomfortowe. W praktyce oznacza to, że nawet przy medianie TSV równej 0, czyli przy neutralnej ocenie typowego użytkownika, budynek może wymagać korekt eksploatacyjnych, jeżeli IQR jest szeroki, występują liczne oceny skrajne lub udział głosów akceptowalnych jest niski.

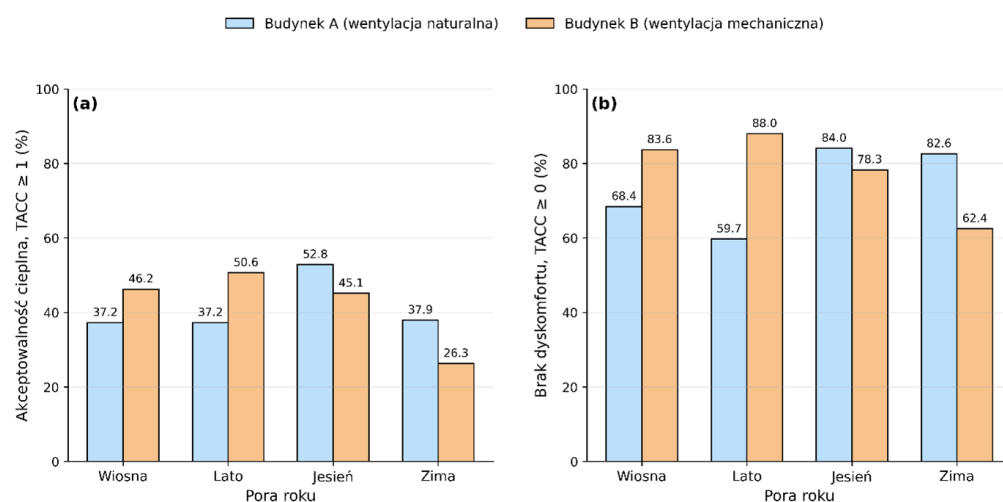
Wyniki przedstawione na Rysunkach 2 i 3 wskazują, że w budynku z wentylacją mechaniczną korzystniejsze oceny użytkowników występowały głównie w okresie ciepłym, co można wiązać ze skuteczniejszą stabilizacją warunków

środowiska wewnętrznego przez system HVAC. Z kolei w budynku z wentylacją naturalną lepsze wyniki pod względem braku dyskomfortu zaobserwowano jesienią i zimą, natomiast latem widoczne było większe ryzyko przegrzewania i pogorszenia odbioru warunków. Z tej przyczyny przy projektowaniu i modernizacji biur warto analizować nie tylko wartości średnie lub mediany, lecz także rozrzut odpowiedzi użytkowników oraz procentowy udział głosów wskazujących na akceptowalność i brak dyskomfortu. To właśnie połączenie tych miar pozwala ocenić, czy komfort jest doświadczeniem większości użytkowników, czy tylko wynikiem uśrednienia bardzo różnych ocen.



Rysunek 2. Sezonowa zmienność oceny odczucia cieplnego (TSV) oraz akceptowalności cieplnej (TACC) w budynkach A i B: (a) rozkład głosów odczucia cieplnego użytkowników w skali ASHRAE od -3 do +3, (b) rozkład ocen akceptowalności cieplnej w siedmiostopniowej skali od -3 do +3. Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Seasonal variation in thermal sensation vote (TSV) and thermal acceptability (TACC) in buildings A and B: (a) the distribution of occupants' thermal sensation votes on the ASHRAE scale from -3 to +3, (b) the distribution of thermal acceptability ratings on a seven-point scale from -3 to +3. Source: authors' own study



Rysunek 3. Sezonowa zmienność poziomu akceptowalności cieplnej (a) oraz braku dyskomfortu cieplnego (b) w budynkach A i B. Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Seasonal variation in the level of thermal acceptability (a) and absence of thermal discomfort (b) in buildings A and B. Source: authors' own study

Zależność odczucia cieplnego od temperatury powietrza i ograniczenia modeli regresyjnych

Na Rysunku 4 przedstawiono zależność oceny odczucia cieplnego użytkowników, wyrażonej wskaźnikiem TSV, od temperatury powietrza wewnętrznego T_a w budynkach A i B. Analizę wykonano dla obserwacji, w których $T_a \leq 30^\circ\text{C}$, aby ograniczyć wpływ pojedynczych skrajnych wartości temperatury na przebieg dopasowania. W pierwszym etapie zastosowano regresję liniową, która pozwala ocenić ogólną

ny kierunek zmian odczucia ciepłego wraz ze wzrostem temperatury powietrza. W obu budynkach zależność była dodatnia, co oznacza, że wraz ze wzrostem T_a użytkownicy częściej oceniali warunki jako cieplejsze. Nachylenia prostych regresji były bardzo zbliżone, co wskazuje na podobną średnią wrażliwość użytkowników obu budynków na zmianę temperatury powietrza. W obu przypadkach zależność była istotna statystycznie ($p < 0,001$), jednak wartości współczynnika determinacji były relatywnie niskie: $R^2 = 0,068$ dla budynku A oraz $R^2 = 0,062$ dla budynku B. Wskazuje to, że sama temperatura powietrza wyjaśnia

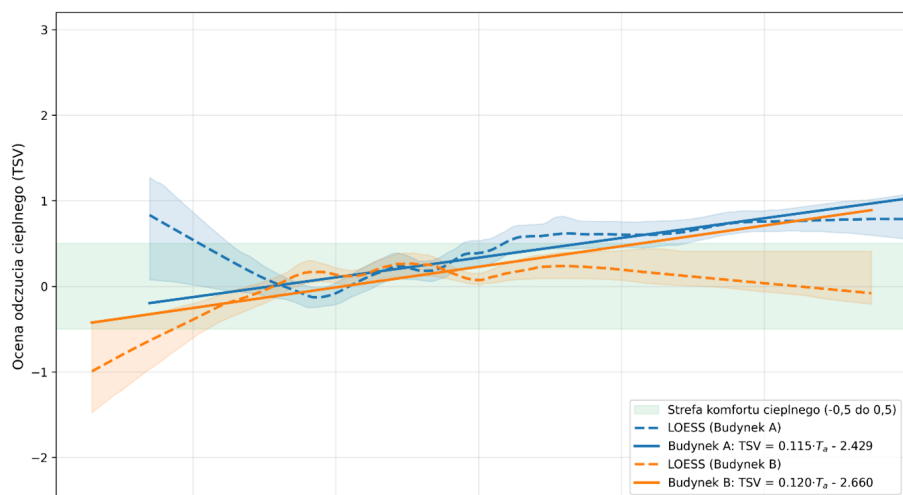
jedynie niewielką część zmienności subiektywnych ocen cieplnych. Na podstawie dopasowanych linii wyznaczono również temperatury neutralne, czyli wartości $T_{a,n}$ przy których przewidywana ocena TSV odpowiada odczuciu neutralnemu. Wyniosły one około $21,1^\circ\text{C}$ dla budynku A oraz $22,1^\circ\text{C}$ dla budynku B. Oznacza to, że w budynku z wentylacją mechaniczną neutralne odczucie ciepłe osiągnano przy temperaturze o około 1°C wyższej niż w budynku z wentylacją naturalną.

Regresja liniowa dobrze pokazuje ogólny trend, ale zakłada stałe tempo wzrostu TSV w całym analizowanym

zakresie temperatury. Z tej przyczyny na Rysunku 4 przedstawiono również dopasowanie LOESS. Jest to lokalna metoda wygładzania danych, która nie narzuca z góry prostoliniowego przebiegu zależności, lecz pokazuje empiryczny trend w kolejnych zakresach temperatury. Dzięki temu można zauważyć, czy reakcja użytkowników na wzrost temperatury była podobna w całym zakresie pomiarowym, czy też zmieniała się lokalnie. W analizowanych danych przebieg LOESS wskazuje, że zależność TSV od T_a nie była idealnie liniowa. W budynku A krzywa LOESS, mimo lokalnych wahań, generalnie rosła wraz ze wzrostem temperatury, pozostając zgodna z kierunkiem regresji liniowej. W budynku B widoczne było natomiast lokalne wypłaszczenie przebiegu, a przy wyższych temperaturach nawet lekkie obniżenie wartości TSV. Może to oznaczać, że w określonych warunkach wzrost temperatury nie prowadził bezpośrednio do proporcjonalnego wzrostu odczucia ciepła, co może być związane z działaniem instalacji, sezonowością, zmianą odzieży lub reakcjami użytkowników na warunki panujące w pomieszczeniu.

Aby sprawdzić, czy zależność TSV od temperatury można opisać lepiej niż prostą regresją liniową, porównano kilka wariantów modeli regresyjnych (Tabela 1). Uwzględniono modele liniowe, wielomianowe, modele z funkcją spline oraz modele rozszerzone o dodatkowe zmienne, takie jak sezon, wilgotność względna, izolacyjność odzieży, sposób wentylacji i elementy regulacji środowiska (PECS) przez użytkowników.

Porównanie modeli pokazuje, że sama zmiana kształtu zależności między TSV a temperaturą powietrza, np. przez zastosowanie wielomianu lub funkcji spline, poprawiała dopasowanie tylko nieznacznie. Współczynnik determinacji R^2 wzrastał z 0,086 dla



Rysunek 4. Zależność oceny odczucia ciepłego użytkowników (TSV) od temperatury powietrza wewnętrznego (T_a) w budynkach A i B dla obserwacji, w których $T_a \leq 30^\circ\text{C}$. Linie ciągłe przedstawiają dopasowanie regresji liniowej, natomiast linie przerywane dopasowanie LOESS. Zacieniowany na zielono obszar oznacza strefę komfortu cieplnego, przyjętą jako zakres TSV od $-0,5$ do $+0,5$. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Relationship between occupants' thermal sensation vote (TSV) and indoor air temperature (T_a) in buildings A and B for observations with $T_a \leq 30^\circ\text{C}$. Solid lines represent linear regression fits, while dashed lines show LOESS smoothing. The green shaded area indicates the thermal comfort zone, defined as TSV between -0.5 and $+0.5$. Source: authors' own study

Tabela 1. Zestawienie dopasowania wybranych modeli regresyjnych opisujących zależność oceny odczucia ciepłego (TSV) od temperatury powietrza wewnętrznego (T_a) oraz zmiennych opisujących warunki środowiskowe, sposób użytkowania i cechy budynku. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Summary of the goodness of fit of selected regression models describing the relationship between thermal sensation vote (TSV) and indoor air temperature (T_a), as well as variables related to indoor environmental conditions, building operation and building characteristics. Source: authors' own study

Model regresji	Liczba obserwacji	R^2	R^2 skoryg.	RMSE
Regresja liniowa: $T_a \times$ budynek	2034	0,086	0,084	0,936
Model kwadratowy: $T_a + T_a^2 \times$ budynek	2034	0,090	0,088	0,934
Model sześcienny: $T_a + T_a^2 + T_a^3 \times$ budynek	2034	0,095	0,092	0,931
Spline kubiczny: $T_a \times$ budynek	2034	0,097	0,093	0,930
Spline $T_a +$ budynek + sezon	2034	0,122	0,116	0,917
Spline $T_a +$ sezon + RH + CLO	1968	0,149	0,143	0,905
Model pełny: spline T_a , budynek, sezon, RH, CLO, wentylacja, otwarcie okna, osłony, PECS	1968	0,176	0,167	0,891
Model pełny z efektem użytkownika	1968	0,335	0,317	0,800

modelu liniowego do 0,097 dla modelu spline. Oznacza to, że ograniczone dopasowanie nie wynikało głównie z tego, że zależność była nieliniowa. Sama temperatura powietrza, nawet opisana bardziej elastycznym modelem, wyjaśniała jedynie niewielką część zmienności ocen użytkowników.

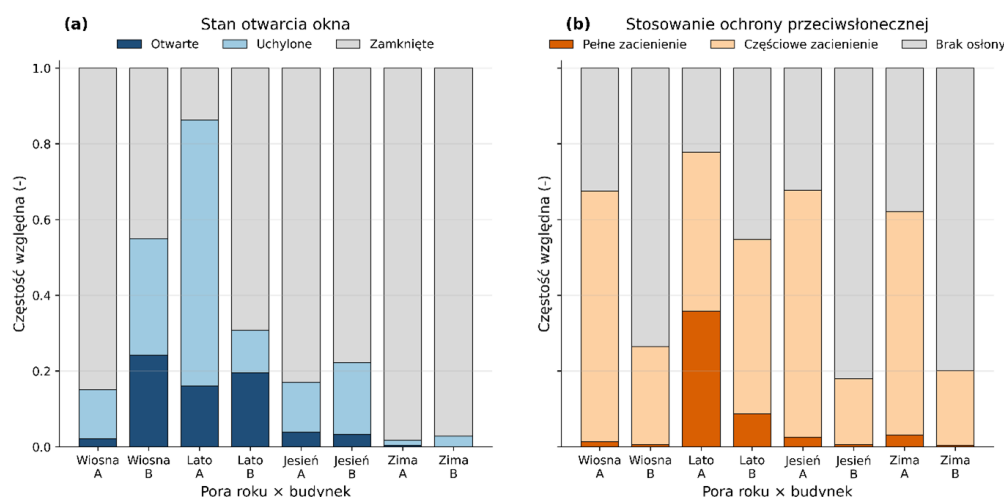
Wyraźniejszą poprawę dopasowania uzyskano dopiero po dodaniu zmiennych opisujących kontekst użytkowania budynku. Uwzględnienie sezonu zwiększyło R^2 do 0,122, a dodanie wilgotności względnej i izolacyjności odzieży do 0,149. Najlepszy model interpretowalny, obejmujący także sposób wentylacji, otwarcie okien, osłony przeciwsłoneczne oraz urządzenia osobiste PECS, osiągnął R^2 równe 0,176. Najwyższe dopasowanie uzyskano po uwzględnieniu efektu użytkownika, gdzie R^2 wzrosło do 0,335. Taki wynik wskazuje, że duże znaczenie miały różnice indywi-

dualne oraz lokalne warunki na stanowiskach pracy.

Z punktu widzenia praktyki projektowej i eksploatacyjnej wyniki te są istotne, ponieważ pokazują ograniczenia oceny komfortu cieplnego wyłącznie na podstawie temperatury powietrza. Temperatura jest parametrem podstawowym i łatwo mierzalnym, ale nie opisuje w pełni odczuć użytkowników. Na ocenę TSV wpływają również sezon, wilgotność, ubiór, sposób działania instalacji, możliwość regulacji środowiska oraz indywidualna tolerancja ciepła. Dlatego nawet przy podobnej temperaturze powietrza użytkownicy mogą różnie oceniać warunki, a przy neutralnej wartości TSV część osób może nadal zgłaszać ograniczoną akceptowalność lub dyskomfort.

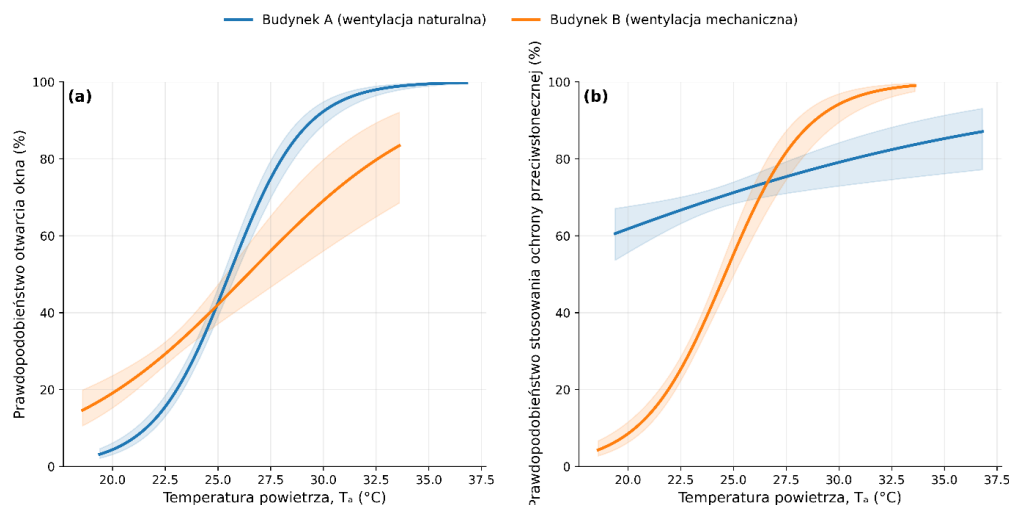
Dynamika zachowań adaptacyjnych

Wyniki regresji liniowej, przebieg krzywych LOESS oraz



Rysunek 5. Częstość względna występowania poszczególnych stanów otwarcia okna (a) oraz poziomów stosowania ochrony przeciwsłonecznej (b) w budynkach A i B, w podziale na pory roku. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Relative frequency of window opening states (a) and levels of solar shading use (b) in Buildings A and B by season. Source: authors' own study



Rysunek 6. Prawdopodobieństwo podejmowania działań adaptacyjnych przez użytkowników w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego T_a w budynkach A i B: (a) prawdopodobieństwo otwarcia okna, (b) prawdopodobieństwo stosowania ochrony przeciwsłonecznej. Krzywe przedstawiają dopasowanie modeli regresji logistycznej, a zacieniowane obszary oznaczają 95% przedziały ufności. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. Probability of occupants' adaptive actions as a function of indoor air temperature T_a in Buildings A and B: (a) probability of window opening, (b) probability of using solar shading. The curves represent fitted logistic regression models, and the shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

porównanie modeli regresyjnych prowadzą do wspólnego wniosku: odczucie ciepłe w rzeczywistych budynkach biurowych jest wynikiem nie tylko parametrów fizycznych środowiska, ale także sposobu użytkowania budynku i działań adaptacyjnych pracowników. Szczególnie istotne mogą być takie zachowania jak zmiana odzieży, otwieranie okien, korzystanie z osłon przeciwsłonecznych czy używanie urządzeń osobistych PECS (np. wentylatorów, klimatyzatorów lub grzejników).

Na Rysunku 5 przedstawiono sezonową częstość działań adaptacyjnych związanych z otwieraniem okien i stosowaniem ochrony przeciwsłonecznej, natomiast Rysunek 6 pokazuje, jak prawdopodobieństwo tych działań zmieniało się wraz z temperaturą powietrza w pomieszczeniu. Oba ujęcia prowadzą do spójnych wniosków. W budynku A, z wentylacją naturalną, otwieranie lub uchylanie okien występowało najczęściej latem i jednocześnie silnie zależało od temperatury powietrza. Prawdopodobieństwo otwarcia okna rosło od kilku procent przy około 20°C do ponad 90% przy 30°C. Oznacza to, że okna były podstawowym sposobem bieżącej regulacji warunków cieplnych w okresach podwyższonej temperatury. W budynku B, z wentylacją mechaniczną,

ną, przez większą część roku dominował stan zamknięty okien, a wzrost prawdopodobieństwa otwarcia okna wraz ze wzrostem temperatury był łagodniejszy. Wskazuje to, że otwieranie okien miało tam raczej charakter uzupełniający w stosunku do pracy instalacji HVAC.

Podobne zależności były widoczne również w przypadku ochrony przeciwsłonecznej. W budynku A częściowe zacienienie było stosowane często przez większą część roku, a latem wzrastał udział pełnego zacienienia. Jednocześnie prawdopodobieństwo zastosowania osłon było wysokie już przy niższych temperaturach i umiarkowanie rosło wraz ze wzrostem T_a . Może to świadczyć o stałej potrzebie ograniczania zysków słonecznych, szczególnie w budynku o większej podatności na warunki zewnętrzne. W budynku B częściej występował brak osłony, a stosowanie zacienienia nasilało się głównie latem i przy wyższych temperaturach. Wyniki te pokazują, że użytkownicy obu biur reagowali na pogorszenie warunków cieplnych, jednak w budynku z wentylacją naturalną działania adaptacyjne były częstsze i bardziej podstawowe dla utrzymania komfortu, natomiast w budynku z wentylacją mechaniczną stanowiły raczej dodatkowy mechanizm korekty lokalnych warunków.

Modyfikacja odzieży

Na Rysunku 7 przedstawiono dwa uzupełniające się ujęcia adaptacji użytkowników przez odzież. Rysunek 7a przedstawia sezonowy rozkład izolacyjności odzieży, natomiast Rysunek 7b – prawdopodobieństwo deklarowanej modyfikacji odzieży w zależności od temperatury powietrza w pomieszczeniu. Wyniki wskazują, że poziom izolacyjności odzieży był przede wszystkim związany z porą roku. W obu budynkach najniższe wartości poziomu izolacyjności odzieży występowały latem, a najwyższe zimą, co potwierdza sezonowe dostosowanie ubioru do warunków zewnętrznych i oczekiwań cieplnych użytkowników. Różnice między sezonami były większe niż różnice między budynkami, choć zimą i jesienią nieco wyższe wartości izolacyjności odzieży obserwowano w budynku B z wenty-

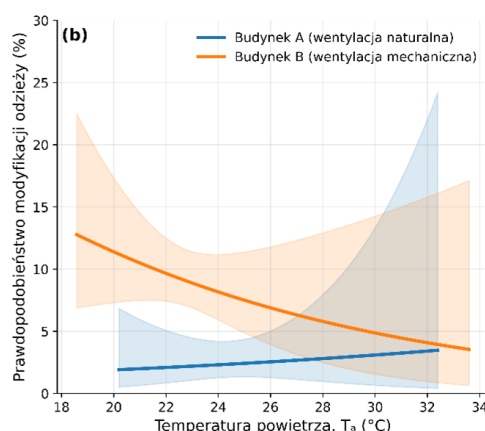
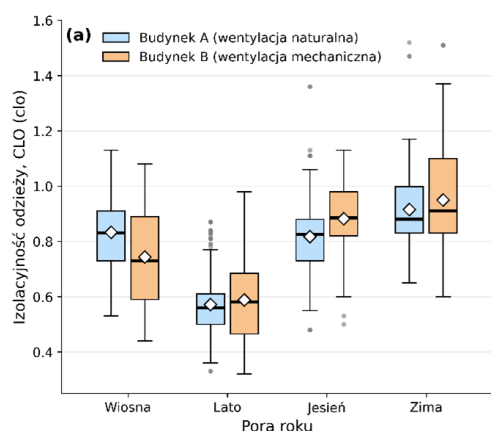
lacją mechaniczną.

Deklarowana modyfikacja odzieży w trakcie dnia była jednak stosunkowo rzadka. Udział odpowiedzi „Tak” w budynku A nie przekraczał 3,7% w żadnym sezonie. W budynku B modyfikacje odzieży były częstsze, szczególnie jesienią (12,6%) i wiosną (11,4%), ale nadal dotyczyły mniejszości obserwacji. Jest to spójne z Rysunkiem 7b, gdzie prawdopodobieństwo modyfikacji odzieży pozostawało na niskim poziomie, zwłaszcza w budynku A. W budynku B krzywa wskazuje na wyższe prawdopodobieństwo zmian odzieży przy niższych temperaturach, co może sugerować, że użytkownicy częściej reagowali na odczucie chłodu niż na przegrzewanie.

Z punktu widzenia eksploatacji budynków wyniki te pokazują, że adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy, a nie bieżący. Użytkownicy dostosowywali typowy poziom izolacyjności ubioru do pory roku, natomiast modyfikacje odzieży w ciągu dnia były rzadkie. W budynku z wentylacją naturalną większe znaczenie miały prawdopodobnie działania regulujące środowisko, takie jak otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku z wentylacją mechaniczną adaptacja przez odzież była częstsza, lecz nadal stanowiła działanie pomocnicze. Potwierdza to, że ocena komfortu cieplnego w biurach powinna uwzględniać zarówno parametry środowiska, jak i rzeczywiste możliwości oraz częstotliwość stosowania działań adaptacyjnych przez użytkowników.

Stosowanie systemów wspomagających PECS

Stosowanie PECS miało wyraźnie sezonowy charakter i było związane przede wszystkim z warunkami letnimi oraz wzrostem temperatury powietrza w pomieszczeniach. W obu biurach przez większość roku dominował brak użycia PECS, natomiast latem ich udział wyraźnie wzrastał. W budynku A, z wentylacją naturalną, PECS stosowano latem w około 27% obserwacji, głównie w postaci osobistych wentylatorów. Oznacza to, że użytkownicy tego budynku wykorzystywali PECS jako dodatkowe wsparcie w warunkach podwyższonej temperatury, obok innych



Rysunek 7. Zachowania adaptacyjne użytkowników związane z odzieżą w budynkach A i B:

(a) sezonowy rozkład izolacyjności odzieży (CLO) w obu budynkach, (b) prawdopodobieństwo modyfikacji odzieży w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego T_a , wyznaczone na podstawie regresji logistycznej; zacieniowane obszary oznaczają 95% przedziały ufności. Źródło: opracowanie własne

Figure 7. Occupants' clothing-related adaptive behaviour in buildings A and B: (a) the seasonal distribution of clothing insulation (CLO) in both buildings, (b) the probability of clothing modification as a function of indoor air temperature T_a , estimated using logistic regression; the shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

działań adaptacyjnych, takich jak otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku B, z wentylacją mechaniczną, udział PECS latem był znacznie wyższy i wynosił około 54%, przy czym dominowało stosowanie klimatyzatorów strefowych. Również model logistyczny potwierdzał silniejszą reakcję użytkowników budynku B na wzrost temperatury – prawdopodobieństwo użycia PECS rosło tam gwałtownie po przekroczeniu około 24–25°C, podczas gdy w budynku A wzrost był bardziej stopniowy. Wyniki te wskazują, że mimo obecności ogólnej instalacji HVAC w budynku B użytkownicy często potrzebowali do-

datkowej lokalnej regulacji warunków cieplnych. Może to świadczyć o zróżnicowaniu warunków na stanowiskach pracy lub niedopasowaniu parametrów pracy systemu do indywidualnych oczekiwań użytkowników. Z punktu widzenia eksploatacji budynków, PECS należy więc traktować nie tylko jako element poprawy komfortu indywidualnego, ale także jako sygnał potencjalnych problemów z równomiernością i skutecznością regulacji środowiska wewnętrznego.

Dyskusja

Uzyskane wyniki pokazują, że różnice między budynkami nie sprowadzają się wyłącznie do rodzaju wentylacji, lecz wynikają z połączenia warunków sezonowych, zakresu temperatury, działania instalacji oraz dostępnych form adaptacji. Budynek A, z wentylacją naturalną i bez aktywnego chłodzenia, był bardziej podatny na sezonowe wahania temperatury, szczególnie latem. Budynek B, z wentylacją mechaniczną i chłodzeniem, charakteryzował się bardziej stabilnymi warunkami temperaturowymi, ale mimo to użytkownicy często korzystali z dodatkowych działań adaptacyjnych, zwłaszcza PECS. Oznacza to, że sama obecność systemu HVAC nie gwarantuje pełnego dopasowania warunków do potrzeb użytkowników.

Zależność TSV od temperatury powietrza była dodatnia w obu budynkach, ale niskie wartości R^2 wskazują, że temperatura wyjaśniała tylko niewielką część zmienności ocen cieplnych. Również zastosowanie bardziej złożonych modeli, takich jak wielomiany czy funkcje spline, poprawiało dopasowanie jedynie nieznacznie. Dopiero uwzględnienie sezonu, wilgotności, izolacyjności odzieży i działań adaptacyjnych poprawiało opis danych, a najwyższe dopasowanie uzyskano po uwzględnieniu efektu użytkownika. Wynik ten jest istotny praktycznie: komfort cieplny w biurach należy traktować jako zjawisko zależne nie tylko od parametrów powietrza, ale również od lokalnych warunków stanowiskowych i indywidualnych preferencji.

Temperatury neutralne wyznaczone z regresji liniowej

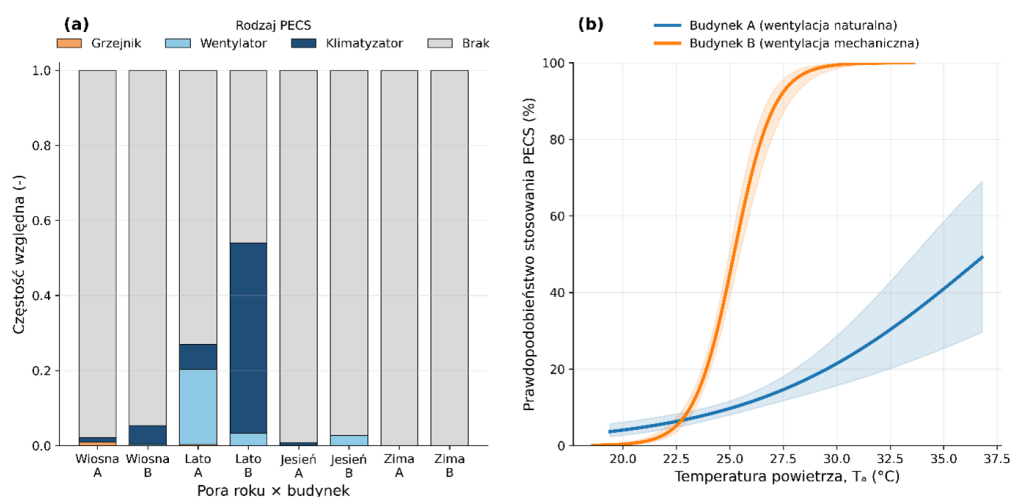
wyniosły około $21,1^{\circ}\text{C}$ w budynku A oraz $22,1^{\circ}\text{C}$ w budynku B. Różnica ta jest niewielka i, co ważne, nie potwierdza prostego założenia, że użytkownicy budynku z wentylacją naturalną osiągają neutralność cieplną przy wyższej temperaturze (de Dear & Brager, 2002). Z tej przyczyny wyników nie należy interpretować jako dowodu większej tolerancji cieplnej w którymkolwiek z budynków. Bardziej uzasadnione jest wskazanie, że użytkownicy obu obiektów reagowali na zmiany temperatury podobnie pod względem średniego trendu TSV, ale posługiwali się innymi mechanizmami adaptacji.

Największe różnice między budynkami ujawniły się właśnie w zachowaniach użytkowników. W budynku A dominowały działania związane z bezpośrednią regulacją środowiska, przede wszystkim otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku B częściej obserwowano stosowanie PECS, zwłaszcza latem. Jest to ważna informacja eksploatacyjna: częste użycie lokalnych klimatyzatorów lub innych urządzeń wspomagających może wskazywać nie tyle na większy komfort, ile na lokalne niedopasowanie pracy instalacji HVAC do potrzeb użytkowników.

Wyniki dotyczące akceptowalności cieplnej pokazują, że neutralne odczucia cieplne nie powinny być traktowane jako wystarczający wskaźnik jakości środowiska cieplnego. W części przypadków użytkownicy oceniali warunki jako bliskie neutralnym, ale udział głosów wskazujących na wyraźną akceptowalność był umiarkowany. Dla praktyki projektowej i eksploatacyjnej oznacza to konieczność łączenia oceny odczucia cieplnego z oceną akceptowalności oraz uwzględniania udziału osób deklarujących brak dyskomfortu.

Ograniczeniem badań jest liczba analizowanych budynków i uczestników oraz fakt, że kampanie pomiarowe obejmowały wybrane okresy w poszczególnych sezonach. Wyniki należy więc traktować jako charakterystykę badanych budynków, a nie jako uniwersalne wartości projektowe. Mimo to analiza ta ma znaczenie praktyczne, ponieważ pokazuje, że skuteczna strategia zapewnienia komfortu

powinna łączyć stabilną pracę instalacji z możliwością lokalnej, intuicyjnej regulacji środowiska przez użytkowników. Wyniki te wskazują również na potencjał rozwiązań mixed-mode, czyli systemów hybrydowych łączących wentylację naturalną, możliwość adaptacji użytkowników oraz wsparcie mechaniczne uruchamiane wtedy, gdy warunki przekraczają możliwości regulacji pasywnej.



Rysunek 8. Stosowanie PECS w budynkach A i B: (a) częstość względna użycia poszczególnych typów PECS w zależności od pory roku i budynku, (b) prawdopodobieństwo stosowania PECS w funkcji temperatury powietrza T_a , oszacowane metodą regresji logistycznej. Zaciemnione obszary oznaczają przedziały ufności 95%. Źródło: opracowanie własne

Figure 8. Use of PECS in Buildings A and B: (a) relative frequency of different PECS types by season and building, (b) probability of PECS use as a function of indoor air temperature T_a , estimated using logistic regression. Shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

Wnioski

Analiza wyników badań terenowych przeprowadzonych w dwóch budynkach biurowych o skrajnie odmiennych strategiach wentylacyjnych (budynek A – naturalna, budynek B – mechaniczna) pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Temperatura powietrza wpływa na odczucie ciepłe, ale nie wyjaśnia go w pełni. Niskie wartości R^2 wskazują, że sama temperatura powietrza nie jest wystarczającym wskaźnikiem komfortu cieplnego użytkowników.
- Temperatury neutralne były zbliżone w obu budynkach: 21,1°C w budynku A oraz 22,1°C w budynku B. Nie potwierdzono więc przesunięcia temperatury neutralnej w stronę wyższych wartości w budynku z wentylacją naturalną.
- Różnice między budynkami ujawniły się przede wszystkim w sposobie adaptacji użytkowników. W budynku A dominowało otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych, natomiast w budynku B częściej wykorzystywano PECS, szczególnie latem.
- Neutralne odczucie ciepłe nie zawsze oznaczało akceptowalne warunki, dlatego ocena komfortu powinna obejmować oba wskaźniki oraz udział użytkowników deklarujących akceptowalność i brak dyskomfortu.
- Adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy. Użytkownicy zmieniali poziom izolacyjności odzieży w zależności od pór roku, natomiast bieżące modyfikacje ubioru w ciągu dnia były rzadkie.
- Zastosowanie PECS może być sygnałem lokalnych problemów z komfortem. Szczególnie w budynku z wentylacją mechaniczną częste użycie klimatyzatorów lokalnych wskazuje na potrzebę lepszego dopasowania warunków do stanowisk pracy.
- Wyniki wspierają stosowanie rozwiązań hybrydowych typu mixed-mode. Najkorzystniejsze podejście powinno łączyć stabilną pracę instalacji z możliwością lokalnej regulacji środowiska przez użytkowników, zamiast opierać się wyłącznie na utrzymywaniu jednej stałej temperatury zadanej. Pozwala to wykorzystać potencjał adaptacyjny użytkowników w okresach umiarkowanych oraz zapewnia wsparcie mechaniczne, np. podczas fal upałów.

Podziękowania

Niniejsza praca powstała w ramach projektu „Cyfrowy awatar budynek-człowiek do projektowania i eksploatacji efektywnych energetycznie budynków z zaawansowanym modelem termicznym użytkowników” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS w programie Weave (nr grantu 2022/47/I/ST8/02272). Autorzy składają podziękowania wszystkim uczestnikom badań za zaangażowanie, poświęcony czas i udział w ankietach prowadzonych w budynkach biurowych. Szczególne podziękowania kierowane są do H11 Boutique Office za wsparcie udzielone podczas realizacji badań.

Bibliografia

- ASHRAE. (2023). ANSI/ASHRAE Standard 55-2023 Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- Brager, G., Paliaga, G., de Dear, R., Olesen, B., Wen, J., Nicol, F., & Humphreys, M. (2004). Operable windows, personal control, and occupant comfort. *ASHRAE Transactions*, 110, 17–35.
- de Dear, R., & Brager, G. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34, 549–561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- de Dear, R. J., Akimoto, T., Arens, E. A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K. W. D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S. C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., & Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23(6), 442–461. <https://doi.org/10.1111/ina.12046>
- Dennis, A. (2017). Global trends in thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices in six climates. *University of California, Berkeley* <https://escholarship.org/uc/item/203955bs>
- Fanger, P. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill.
- Frontczak, M., Goins, J., Arens, E., Zhang, H., & Wargocki, P. (2011). Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *Indoor Air*, 22, 119–131. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00745.x>
- Fuhrmann, M., Lipczyńska, A., & Ferdyn-Grygierek, J. (2025). Spersonalizowane systemy kontroli środowiska (PECS) jako klucz do indywidualizacji komfortu cieplnego w nowoczesnym budownictwie. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(6), 19–25. <https://doi.org/10.15199/9.2025.6.3>
- Graham, L., & Parkinson, T. (2021). Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys. *Buildings and Cities*, 2, 166–184. <https://doi.org/10.5334/bc.76>
- Gupta, R., & Howard, A. (2019). Comparative evaluation of the link between measured and perceived indoor environmental conditions in naturally and mechanically ventilated office environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(4), 042080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/4/042080>
- Khoshbakht, M., Zhang, F., Zomorodian, M., & Gou, Z. (2023). Thermal sensitivity and adaptive comfort in mixed-mode office buildings in humid subtropical climate. *Building Research & Information*, 52, 1–15. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2256430>
- Khovalyg, D., Bivolarova, M. P., Shinoda, J., Al-Assaad, D., Vellei, M., Bandurski, K., Chinazzo, G., Kazanci, O. B., Kim, J., Kramer, T., Lipczyńska, A., Liu, S., Pasut, W., Rawal, R., Sekhar, C., Sun, R., Wu, Z., Afshari, A., Martinez-Alcaraz, P., Andre, M., Zaniboni, L. (2025). Personalized Environmental Control Systems (PE-

- CS): Systematic Review of Benefits for Thermal Comfort, Air Quality, Health, and Human Performance. *Building and Environment*, 286, 113541. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113541>
- Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018). Personal comfort models – A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control. *Building and Environment*, 132, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>
- Kim, J., Zhou, Y., Schiavon, S., Raftery, P., & Brager, G. (2018). Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning. *Building and Environment*, 129, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.011>
- Lamsal, P., Bajracharya, S. B., & Rijal, H. B. (2023). A Review on Adaptive Thermal Comfort of Office Building for Energy-Saving Building Design. *Energies*, 16(3), 1524. <https://doi.org/10.3390/en16031524>
- Liu, J., Yao, R., & McCloy, R. (2013). An investigation of thermal comfort adaptation behaviour in office buildings in the UK. *Indoor and Built Environment*, 23, 675–691. <https://doi.org/10.1177/1420326X13481048>
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, Special Issue on Thermal Comfort Standards, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków—Wentylacja budynków—Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki—Moduł M1-6. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2026). PN-EN ISO 7730:2026-03 Ergonomia środowiska termicznego—Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowa-
- niem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- Rawal, R., Shukla, Y., Vardhan, V., Asrani, S., Schweiker, M., de Dear, R., Garg, V., Mathur, J., Prakash, S., Diddi, S., Ranjan, S. V., Siddiqui, A. N., & Somani, G. (2022). Adaptive thermal comfort model based on field studies in five climate zones across India. *Building and Environment*, 219, 109187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109187>
- Rijal, H., Humphreys, M., & Nicol, J. (2019). Behavioural Adaptation for the Thermal Comfort and Energy Saving in Japanese Offices. *Journal of the Institute of Engineering*, 15, 14–25. <https://doi.org/10.3126/jie.v15i2.27637>
- Rupp, R. F., Parkinson, T., Kim, J., Toftum, J., & de Dear, R. (2022). The impact of occupant's thermal sensitivity on adaptive thermal comfort model. *Building and Environment*, 207, 108517. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108517>
- Rupp, R., Kim, J., Toftum, J., Brager, G., & Dear, R. (2025). Ten Questions Concerning the Application of Adaptive Thermal Comfort in Mixed-Mode Buildings. *Building and Environment*, 284, 113490. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113490>
- Shrestha, B., Rai, Y., Rijal, H. B., & Shrestha, R. (2025). A Review of the Importance of Window Behavior and Its Impact on Indoor Thermal Comfort for Sustainability. *Architecture*, 5(4), 100. <https://doi.org/10.3390/architecture5040100>
- Wang, Z., de Dear, R., Luo, M., Geng, Y., & Zhu, Y. (2018). Individual Difference in Thermal Comfort: A Literature Review. *Building and Environment*, 138, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.040>
- Zagreus, L., Huizenga, C., Arens, E., & Lehrer, D. (2004). Listening to the occupants: A Web-based indoor environmental quality survey. *Indoor Air*, 14(8), 65–74. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00301.x>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.



Szczegóły: <https://pzits.bialystok.pl/xii-podlaska-konferencja-cieplownicza>

Podsumowanie konferencji INNOBUILD 2026

W dniach 20–22 maja 2026 roku na Politechnice Białostockiej odbyła się międzynarodowa konferencja INNOBUILD 2026, poświęcona zagadnieniom zrównoważonego budownictwa oraz dekarbonizacji sektora budowlanego. W wydarzeniu uczestniczyło około 200 osób, reprezentujących 40 uczelni, 10 stowarzyszeń naukowych, instytucji i firm oraz 25 krajów.

Konferencję otworzyła i przewodniczyła jej dr hab. inż. Dorota Anna Krawczyk, prof. PB, prorektor ds. współpracy międzynarodowej Politechniki Białostockiej. Funkcję wiceprzewodniczącej pełniła prof. Eugenia Rossi di Schio z University of Bologna, Włochy. W organizację wydarzenia zaangażowani byli pracownicy Katedry Budownictwa Zrównoważonego i Instalacji budowlanych Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej oraz Dział Projektów Międzynarodowych Erasmus+ i NAWA Politechniki Białostockiej.

Jednym z najważniejszych punktów programu były wystąpienia zaproszonych gości plenarnych i keynote speakers. Wśród nich znalazł się prof. Paweł Wargocki (Technical University of Denmark), światowej klasy ekspert w dziedzinie jakości środowiska wewnętrznego, który podkreślił znaczenie jakości powietrza w budynkach dla zdrowia i efektywności użytkowników. Obok niego wystąpili także: prof. Manuel Alcázar-Ortega (Polytechnic University of Valencia, Hiszpania), prof. Peter Gorder

(University of Colorado Colorado Springs, Stany Zjednoczone) oraz prof. Paolo Valdiserri (University of Bologna, Włochy).

Podczas konferencji zaprezentowano ponad 100 referatów naukowych w formie wystąpień ustnych i posterów w ramach 7 sesji tematycznych:

- Systemy HVAC, komfort cieplny i jakość powietrza wewnętrznego
- Charakterystyka energetyczna budynków
- Integracja odnawialnych źródeł energii i systemy inteligentne (Smart Systems)
- Strategie termomodernizacji i dekarbonizacji
- Architektura zrównoważona i zielona infrastruktura
- Materiały zrównoważone i gospodarka o obiegu zamkniętym
- Polityka, standardy i perspektywy społeczne

Istotnym elementem wydarzenia były również prezentacje projektów oraz sesje posterowe młodych naukowców: studentów i doktorantów, którzy przedstawili innowacyjne rozwiązania w zakresie zielonych technologii i budownictwa przyszłości.

Konferencja INNOBUILD 2026 potwierdziła rosnącą rolę Politechniki Białostockiej jako ważnego ośrodka naukowego, integrującego międzynarodowe środowisko badawcze wokół idei zrównoważonego rozwoju. Organizatorzy podkreślają, że wydarzenie ma charakter cykliczny i w kolejnych latach będzie rozwijane jako platforma wymiany wiedzy oraz inicjowania nowych projektów badawczych i edukacyjnych.

Organizatorami konferencji są Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej oraz Dział Projektów Międzynarodowych Erasmus+ i NAWA Politechniki Białostockiej.

INNOBUILD 2026 jest organizowana w ramach inicjatywy ACROSS European Cross-Border University.

across EUROPEAN UNIVERSITY
FOR CROSS-BORDER
KNOWLEDGE SHARING



Konferencja odbyła się w ramach 75-lecia Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej. Konferencja jest współfinansowana przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (NAWA) w ramach projektu „Wspólnie ku doskonałości – Politechnika Białostocka w działaniach sojuszu Across-PB Across”. Projekt jest finansowany przez Unię Europejską ze środków Unii Europejskiej z Funduszu Europejskiego dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 (FERS) w ramach projektu NAWA pt. „Wsparcie sojuszy Uniwersytetów Europejskich” o numerze FERS.01.05-IP.08-0219/23.

Nadchodzące Wydarzenia

Poniżej prezentujemy zestawienie nadchodzących wydarzeń związanych z działalnością Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych. Obejmuje ono konferencje, szkolenia, seminaria oraz inne inicjatywy organizowane przez PZITS, jego oddziały terenowe, a także przedsięwzięcia objęte patronatem Zrzeszenia.

Tematyka wydarzeń koncentruje się na aktualnych zagadnieniach związanych m.in. z efektywnością energetyczną, nowoczesnymi rozwiązaniami instalacyjnymi, gospodarką wodno-ściekową, bezpieczeństwem eksploatacji oraz wymaganiami środowiskowymi i formalno-prawnymi. Spotkania te stanowią okazję do poszerzenia wiedzy, wymiany doświadczeń oraz nawiązywania wartościowych kontaktów zawodowych.

III Konferencja-Branża wod.-kan. – ochrona i bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej. Reagowanie w sytuacjach kryzysowych

III Konferencja „Bezpieczeństwo infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej” to wydarzenie poświęcone zagadnieniom ochrony infrastruktury krytycznej, zapewnienia ciągłości dostaw wody oraz budowania odporności przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych na zagrożenia techniczne, organizacyjne i cybernetyczne.

W programie konferencji przewidziano dyskusję dotyczące bezpieczeństwa obiektów infrastruktury krytycznej, zarządzania kryzysowego, cyberbezpieczeństwa systemów IT i OT oraz przygotowania przedsiębiorstw na sytuacje nadzwyczajne. Wydarzenie stanowi również platformę wymiany doświadczeń pomiędzy przedstawicielami branży wod.-kan., administracji publicznej, ekspertami ds. bezpieczeństwa oraz specjalistami zajmującymi się ochroną infrastruktury. Konferencja będzie okazją do zapoznania się z aktualnymi wyzwaniami oraz rozwiązaniami wspierającymi bezpieczeństwo i niezawodność systemów wodociągowo-kanalizacyjnych.

Termin: 14–16 września 2026 r.

Miejsce: Hotel Mercure, ul. Armii Krajowej 22, Gdynia

Szczegóły: ckintegrator.pl/conference/konferencja-branza-wod-kan-ochrona-i-bezpieczestwo-infrastruktury-krytycznej

Szkolenie: Zgrzewanie doczołowe i elektrooporowe rur z tworzyw sztucznych

Szkolenie poświęcone jest zagadnieniom związanym ze zgrzewaniem doczołowym i elektrooporowym rur z tworzyw sztucznych, stosowanych w sieciach oraz instalacjach sanitarnych. Program obejmuje zarówno część teoretyczną, jak i praktyczną, umożliwiając uczestnikom zdobycie wiedzy na temat prawidłowego wykonywania połączeń zgrzewanych zgodnie z obowiązującymi normami i wymaganiami technicznymi.

W trakcie szkolenia omawiane są rodzaje i metody zgrzewania, zasady doboru urządzeń i materiałów, najczęściej występujące błędy wykonawcze oraz sposoby ich eliminowania. Uczestnicy mają również możliwość zapoznania się z nowoczesnymi technologiami stosowanymi przy budowie i eksploatacji rurociągów z tworzyw sztucznych.

Szkolenie skierowane jest do projektantów, wykonawców, eksploataatorów sieci i instalacji, inspektorów nadzoru oraz wszystkich osób zainteresowanych podnoszeniem kwalifikacji w zakresie technologii łączenia rur z polietylenu. Zajęcia prowadzone są przez doświadczonych specjalistów, a ich istotnym elementem są ćwiczenia praktyczne pozwalające na zdobycie umiejętności niezbędnych w codziennej pracy zawodowej.

Termin: 23–25 września, 8:00–18:00

Miejsce: budynek NOT, ul. J. Piłsudskiego 74, 50-020 Wrocław

Szczegóły: www.pzits.not.pl/zgrzew.html

Szkolenie: Pompownie ścieków – oszczędzanie energii oraz zapobieganie awariom – monitorowanie pracy pompowni ścieków

Szkolenie poświęcone jest zagadnieniom związanym z projektowaniem, doбором oraz eksploatacją systemów kanalizacji ciśnieniowej. Program obejmuje omówienie zasad działania kanalizacji ciśnieniowej, doboru pomp ściekowych oraz przykładowych rozwiązań wykorzystujących pompy zatapialne.

Uczestnicy zapoznają się również z rodzajami pomp stosowanych w tłoczniach ścieków, porównaniem tradycyjnych pompowni i tłoczni, a także metodami zabezpieczania obiektów przed skutkami uderzeń hydraulicznych. W ramach szkolenia przedstawione zostaną także zagadnienia dotyczące pneumatycznych pompowni ścieków oraz oceny pracy i niezawodności przepompowni i tłoczni ścieków w praktyce eksploatacyjnej.

Wykładowcy: Damian Rackiewicz (WILO)

Termin: 17 listopada 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza

Oddział Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych w Białymstoku zaprasza do udziału w XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza, która odbędzie się w dniach 8–9 października 2026 r. w Hotel Natura Mazur Resort & Conference. Wydarzenie od lat stanowi jedno z ważniejszych spotkań środowiska branży ciepłowniczej i instalacyjnej w Polsce, integrując przedstawicieli przedsiębiorstw ciepłowniczych, projektantów, producentów technologii oraz środowiska naukowego.

Hasłem przewodnim tegorocznej edycji jest: „Między efektywnością a bezpieczeństwem – bez kompromisów i bez złudzeń”. Organizatorzy podkreślają, że konferencja ma być przestrzenią rzeczowej dyskusji o rzeczywistych wyzwaniach sektora ciepłowniczego, decyzjach technologicznych oraz rozwiązaniach sprawdzających się w praktyce eksploatacyjnej. Program wydarzenia obejmuje wystąpienia ekspertów, prezentacje nowoczesnych technologii oraz dyskusje dotyczące efektywności energetycznej, bezpieczeństwa eksploatacji i modernizacji systemów ciepłowniczych.

Dotychczasowe edycje konferencji potwierdziły znaczenie wydarzenia jako platformy wymiany doświadczeń pomiędzy praktyką przemysłową a środowiskiem naukowym. Rosnące zainteresowanie uczestników i partnerów sprawia, że Podlaska Konferencja Ciepłownicza z roku na rok umacnia swoją pozycję jako istotne wydarzenie branżowe zarówno w regionie, jak i w skali kraju.

Termin: 8–9 października 2026 r.

Miejsce: Warchały, Hotel Natura Mazur Resort & Conference

Szczegóły: pzits.bialystok.pl/xii-podlaska-konferencja-cieplownicza

Aby być na bieżąco z konferencjami, szkoleniami, seminariami oraz innymi wydarzeniami organizowanymi przez Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, zapraszamy do regularnego odwiedzania [kalendarium wydarzeń PZITS](#) oraz do zapisania się do [newslettera PZITS](#). Publikowane są tam informacje o nadchodzących konferencjach, szkoleniach, webinarach i inicjatywach branżowych, a także aktualności dotyczące działalności Zrzeszenia, patronatów, wydarzeń oddziałów terenowych oraz nowych publikacji i materiałów technicznych.

Regularne śledzenie kanałów informacyjnych PZITS pozwala na bieżąco zapoznawać się z tematyką najważniejszych wydarzeń branżowych, terminami rejestracji, zmianami w programach spotkań oraz informacjami organizacyjnymi dotyczącymi udziału w wydarzeniach. To również możliwość szybkiego dostępu do informacji o nowych inicjatywach, działaniach środowiska inżynierskiego oraz kierunkach rozwoju branży sanitarnej, instalacyjnej, gazowniczej, ciepłowniczej i wodociągowo-kanalizacyjnej.

Newsletter stanowi także źródło wiedzy o działalności poszczególnych oddziałów PZITS, konkursach, wydarzeniach naukowo-technicznych, projektach realizowanych we współpracy z uczelniami i partnerami branżowymi oraz przedsięwzięciach objętych patronatem Zrzeszenia. Dzięki temu członkowie i sympatycy PZITS mogą łatwiej planować udział w interesujących ich spotkaniach oraz korzystać z możliwości rozwoju zawodowego i wymiany doświadczeń.



Platforma wiedzy dla specjalistów infrastruktury medycznej

TECHMEDIS to polska platforma wiedzy techniczno-medycznej, której celem jest wspieranie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia. Projekt integruje środowisko naukowe, inżynieryjne i medyczne, tworząc przestrzeń współpracy między badaniami B+R, uczelniami, a praktyką techniczną w szpitalach i przychodniach.

Szczegóły:

www.techmedis.pl





JUBILEUSZOWE



Forum Ciepłowników Polskich
Polish District Heating Forum

Serdecznie zapraszamy do udziału
w XXX Forum Ciepłowników Polskich!

Międzyzdroje
13-16 września 2026

www.fcp.org.pl



Izba Gospodarcza
Ciepłownictwo Polskie