

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

**MODUŁOWY BUDYNEK PASYWNY
Z PREFABRYKATÓW FIRMY BETARD
W ZASTOSOWANIU W BUDOWNICTWIE
MIESZKANIOWYM I UŻYTECZNOŚCI
PUBLICZNEJ**

Raport serii PRE nr 6 /2024

Praca doktorska

Bartosz Witkowski

Słowa kluczowe:

Prefabrykacja betonowa

budynek pasywny

fizyka budowli

zmiana klimatu

analiza kosztowa

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz

Wrocław, wrzesień 2024

Autor:

mgr inż. Bartosz Witkowski

.....

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Budownictwa Ogólnego
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45
e-mail: bartosz.witkowski@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej we wrześniu 2024 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Autor	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem 6 egz.

Chciałbym wyrazić swoją wdzięczność wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób wspierali mnie w trakcie pisania niniejszej rozprawy doktorskiej.

Dziękuję mojemu promotorowi, Panu prof. dr. hab. inż. Krzysztofowi Schabowiczowi, za konstruktywną krytykę, motywację i wkład merytoryczny. Dziękuję za cenne wskazówki, inspirację oraz zaangażowanie, które umożliwiły mi ukończenie tej pracy.

Dziękuję firmie Betard sp. z o.o., jej Prezesowi, Panu Arturowi Dziechcińskiemu, oraz Panu Mateuszowi Moczce, opiekunowi pomocniczemu mojej rozprawy doktorskiej, za okazane wsparcie i pomoc w realizacji badań.

Dziękuję Mamie Alicji, Tacie Andrzejowi i najbliższej rodzinie za cierpliwość, zrozumienie oraz wsparcie emocjonalne.

Szczególne i najważniejsze podziękowania kieruję do mojej żony, Aleksandry – przede wszystkim za okazaną cierpliwość i wiarę w moje możliwości oraz pomyślne zakończenie pracy nad rozprawą.

Pusta strona

Spis treści

1.	Wprowadzenie w problematykę pracy.....	10
1.1.	Podstawowe informacje o budownictwie pasywnym	10
1.2.	Podstawowe informacje o prefabrykacji	11
1.2.1.	Prefabrykacja wczoraj i dziś	11
1.2.2.	Produkcja prefabrykatów betonowych	12
1.2.3.	Prefabrykacja a sytuacja gospodarcza	13
1.3.	Ceny energii nieodnawialnej.....	15
1.4.	Wymagania legislacyjne w Polsce i w Unii Europejskiej w zakresie fizyki budowli i zahamowania globalnego ocieplenia	20
1.4.1.	Działania Unii Europejskiej w zakresie zahamowania globalnego ocieplenia	20
1.4.2.	Warunki techniczne dotyczące wymagań w zakresie fizyki budowli	21
1.4.3.	Polityka klimatyczno-energetyczna w Polsce	23
1.5.	Betard sp. z o.o. i doktorat wdrożeniowy	24
1.6.	Budownictwo modułowe	27
2.	Problem naukowy, cel, zakres pracy, tezy rozprawy doktorskiej....	29
2.1.	Problem naukowy.....	29
2.2.	Cel rozprawy.....	30
2.3.	Zakres rozprawy	31
2.4.	Tezy rozprawy doktorskiej	32
2.5.	Oryginalne elementy pracy.....	33
3.	Analiza literatury przedmiotu	34
3.1.	Podstawowe parametry fizyki budowli	34
3.1.1.	Współczynnik przewodzenia ciepła	34
3.1.2.	Opór cieplny R.....	35
3.1.3.	Współczynnik przenikania ciepła (U)	35
3.1.4.	Współczynnik strat ciepła	37
3.1.5.	Mostki cieplne w budynku.....	37

3.1.6.	Skutki mostków termicznych – zmiany temperatur powierzchni wewnętrznych.....	42
3.2.	Podstawowe informacje o budownictwie pasywnym.....	44
3.2.1.	Izolacja termiczna w budynku pasywnym	44
3.2.2.	Szczelność powłoki budynku w standardzie pasywnym	46
3.2.3.	Potrójne oszklenie	47
3.2.4.	Minimalizacja mostków termicznych.....	48
3.2.5.	System wentylacyjny nawiewno – wywiewny z odzyskiem ciepła....	49
3.3.	Wpływ zmian klimatu na budynek.....	57
3.3.1.	Europejski zielony ład.....	58
3.3.2.	Emisje i charakterystyka energetyczna budynków.....	59
3.3.3.	Scenariusze zmian klimatu według IPCC.....	63
4.	Zakres badań własnych.....	64
4.1.1.	Etap 1 - Analiza przegród zewnętrznych przedmiotowego budynku pod kątem fizyki budowli	64
4.1.2.	Etap 2 - Wykonanie symulacji energetycznej przedmiotowego budynku.....	67
4.1.3.	Etap 3 – Eksport wyników symulacji energetycznej do arkusza PHPP 68	
4.1.4.	Etap 4 – Wyznaczenie rozwiązań do zastosowania w przedmiotowym budynku w celu osiągnięcia standardu pasywnego	68
4.1.5.	Etap 5 – Wykonanie symulacji energetycznej proponowanego budynku i eksport jej wyników do arkusza PHPP	69
4.1.6.	Etap 6 – Weryfikacja otrzymanych wyników symulacji energetycznej z wymaganiami budownictwa pasywnego.....	69
4.1.7.	Etap 7 – Analiza obecnego klimatu i prognozowanych zmian klimatycznych.....	69
4.1.8.	Etap 8 – Wykonanie symulacji energetycznej proponowanego budynku w obecnym i prognozowanym klimacie.....	70

4.1.9.	Etap 9 – Określenie czasu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na doprowadzenie przedmiotowego budynku do standardu pasywnego	70
5.	Wyniki badań i ich analiza.....	71
5.1.	Analiza podstawowych parametrów fizyki budowli.....	71
5.1.1.	Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła λ metodą ustalonego strumienia cieplnego	71
5.1.2.	Wyznaczenie oporu cieplnego R.....	75
5.1.3.	Wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła	76
5.1.4.	Określenie liniowego współczynnika przenikania ciepła według PN-EN ISO 10211:2017.....	77
5.1.5.	Punktowe mostki termiczne w ścianie trójwarstwowej.....	82
5.1.6.	Badania cieplno – wilgotnościowe ściany zewnętrznej.....	83
5.2.	Wykonanie symulacji energetycznej przedmiotowego budynku	85
5.2.1.	Model przedmiotowego budynku w programie SketchUp	85
5.3.	Założenia dla przedmiotowego budynku przyjęte do symulacji energetycznej wraz z wynikami tej symulacji	90
5.3.1.	Założenia dot. klimatu panującego na terenie lokalizacji przedmiotowego budynku	90
5.3.2.	Określenie współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych	92
5.3.3.	Powierzchnie przegród zewnętrznych.....	95
5.3.4.	Założenia dotyczące okien.....	96
5.3.5.	Przyjęte założenia dotyczące wentylacji.....	99
5.3.6.	Obliczenie obciążenia cieplnego budynku.....	104
5.3.7.	Zapotrzebowanie na ogrzewanie	107
5.3.8.	Roczne zapotrzebowanie na ciepło	115
5.3.9.	Podsumowanie i wnioski	120
5.4.	Budynek pasywny – modyfikacja założeń i symulacja energetyczna proponowanego budynku	122
5.4.1.	Ściana zewnętrzna proponowanego budynku – wdrożenie produktu	123

5.4.2.	Modyfikacja okien	127
5.4.3.	Dobór wentylacji nawiewno – wywiewnej z odzyskiem ciepła	132
5.4.4.	Obciążenie cieplne budynku	133
5.4.5.	Zapotrzebowanie na ogrzewanie w proponowanym budynku.....	135
5.4.6.	Roczne zapotrzebowanie na ciepło w proponowanym budynku ..	142
5.4.7.	Weryfikacja potrzeby dodatkowego systemu chłodzenia	146
5.4.8.	Fotowoltaika	151
5.4.9.	Zużycie energii pierwotnej.....	153
5.4.10.	Podsumowanie i wnioski	154
5.5.	Wpływ zmian klimatu na budynek – analiza obecnego i prognozowanego klimatu	156
5.5.1.	Aktualny klimat.....	156
5.5.2.	Klimat prognozowany – temperatura otoczenia	159
5.5.3.	Klimat prognozowany – temperatura punktu rosy	161
5.5.4.	Klimat prognozowany – promieniowanie	162
5.6.	Symulacja budynku w różnych klimatach Polski	164
5.6.1.	Sprawdzenie spełnienia przez proponowany budynek kluczowych parametrów budownictwa pasywnego w różnych lokalizacjach Polski	164
5.7.	Symulacja energetyczna proponowanego budynku w prognozowanych klimatach	166
5.7.1.	Weryfikacja spełnienia wybranych wymagań budownictwa pasywnego	167
5.7.2.	Podsumowanie kluczowych parametrów	172
6.	Analiza opłacalności wykonania proponowanego budynku pasywnego.....	176
6.1.	Wycena przedmiotowego budynku	177
6.2.	Wycena proponowanego budynku.....	179
6.3.	Określenie czasu zwrotu nakładu poniesionego w dodatkowe inwestycje	181

7.	Wnioski i uwagi końcowe	186
7.1.	Podsumowanie	186
7.2.	Wnioski.....	188
7.3.	Argumentacja potrzeby wdrożenia produktu.....	191
7.4.	Proponowane kierunki badań	191
7.5.	Praktyczne zastosowanie przeprowadzonych badań.....	192
8.	Bibliografia	194
9.	Spis tabel.....	205
10.	Spis rysunków	207

Wykaz najważniejszych oznaczeń, skrótów i definicji stosowanych w rozprawie

A – pole przegrody w [m^2]

$a_i(n)$ – współczynnik Shapiro – Wilka odczytywany z tablic kwantyli $W(\alpha, n)$ [159]

Budynek pasywny - budynkiem o ekstremalnie niskim zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania wnętrza ($15 \text{ kWh/m}^2\text{rok}$), w którym komfort termiczny zapewniony jest przez pasywne źródła ciepła takie jak: zyski od mieszkańców, urządzeń elektrycznych, ciepła odzyskanego w wyniku procesu wentylacji, dogrzewanie powietrza wentylującego budynek np. rekuperacji, słońca itp. W budynkach pasywnych dopuszczalne jest stosowanie grzejników [6] [44].

EP – wskaźnik zapotrzebowania budynku na nieodnawialną energię pierwotną [$\text{kWh/m}^2\text{rok}$]

GUS – Główny Urząd Statystyczny

IPCC – (z ang. *International Panel of Climate Change*) Międzynarodowy Zespół do Zmian Klimatu

K - liczba punktowych mostków termicznych

l_i - długość rozpatrywanego elementu, obliczona na podstawie wymiarów zewnętrznych [m]

M - liczba liniowych mostków termicznych

OZE – Odnawialne Źródła Energii

R – opór cieplny [$m^2\text{K/W}$]

RCP – z ang. Representative Concentration Pathways, tj. ścieżki koncentracji węgla w atmosferze.

s_λ – odchylenie średnie w próbie

Sekocenbud – biuletyn zawierający bazę cenową stosowaną do tworzenia kosztorysów metodą uproszczoną lub szczegółową

U – współczynnik przenikania ciepła przegrody [W/m²K]

U_i – współczynnik przenikania ciepła i-tego regularnego elementu oddzielającego środowisko wewnętrzne od otoczenia w różnych temperaturach [W/m²K]

W – wynik testu Shapiro – Wilka

WT – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (tekst jednolity z 2022 roku. poz. 1225)

Zielony Ład - pakiet inicjatyw politycznych, którego celem jest skierowanie UE na drogę transformacji ekologicznej w celu osiągnięcia neutralności klimatycznej w 2050 r.

λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału [W/mK]

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła k-tego mostka liniowego, [W/(m x K)]

χ – punktowy współczynnik przenikania ciepła [W/K]

\bar{X} - średnia arytmetyczna

θ_{si} – temperatura na powierzchni wewnętrznej [°C]

θ_e – temperatura środowiska zewnętrznego [°C]

θ_i – temperatura środowiska wewnętrznego [°C]

1. Wprowadzenie w problematykę pracy

1.1. Podstawowe informacje o budownictwie pasywnym

Idea budynku, który byłby niezwykle efektywny energetycznie narodziła się m.in. w wyniku zaobserwowania uzależnienia gospodarki od paliw kopalnych i braku stabilności ich cen. Dostrzeżono także, że w wyniku spalania paliw kopalnych na potrzeby ogrzania budynku, dochodzi do zanieczyszczenia powietrza w otoczeniu budynku, co może mieć wpływ na zdrowie jego mieszkańców. Poszukiwano zatem rozwiązań, które sprawiają, że budynki będą „zdrowe”, będą zapewniały komfort termiczny swoim użytkownikom, a koszty ich eksploatacji i ogrzewania będą przewidywalne i osiągalne przez cały okres życia budynku [1].

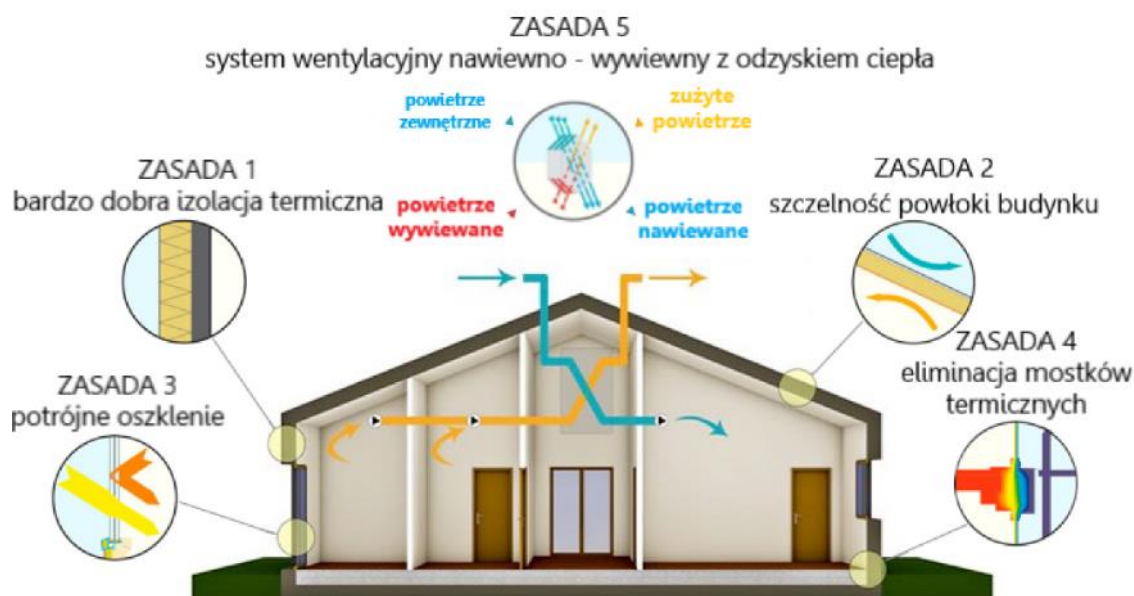
W 1988 roku, założyciel Instytutu Domu Pasywnego w Darmstadt, dr Wolfgang Feist zdefiniował pojęcie budynku pasywnego:

„Dom pasywny jest budynkiem o ekstremalnie niskim zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania wnętrza (15 kWh/m²/rok), w którym komfort termiczny zapewniony jest przez pasywne źródła ciepła takie jak: zyski od mieszkańców, urządzeń elektrycznych, ciepła odzyskanego w wyniku procesu wentylacji, dogrzewanie powietrza wentylującego budynek np. rekuperacji, słońca itp.” [2]

Warto podkreślić, uzupełniając powyższą definicję dr. Feista, że zasady budownictwa pasywnego dopuszczają możliwość stosowania grzejników, tj. punktowych źródeł ciepła, jednak ze względu na wysoką izolację termiczną w takich budynkach, ich rozmiary mogą być mniejsze niż w budynkach „tradycyjnych”, spełniających wyłącznie obecnie warunki techniczne. Ponadto należy zaznaczyć, że wymagania w zakresie zapotrzebowania budynku na energię do ogrzewania wnętrza (15kWh/m²rok) nie uwzględniają energii do przygotowania ciepłej wody użytkowej [3] [4].

Ideą budynku pasywnego jest zapewnienie jego użytkownikom komfortu klimatycznego zarówno latem jak i zimą, czyli w okresie, gdy ciepło jest zapewnione przez pasywne źródła ciepła oraz gdy jest odzyskiwane z wentylacji. Koncepcja budynku pasywnego narodziła się jako odpowiedź na potrzebę pogodzenia efektywności energetycznej budynku, optymalnego komfortu termicznego, wysokiej jakości powietrza w pomieszczeniach i oszczędzania zasobów

naturalnych. W efekcie wykreowano pięć podstawowych filarów, które towarzyszą już od etapu projektowania budynków pasywnych (Rys. 1.1) [5].



Rys. 1.1 - Schemat przedstawiający pięć zasad budownictwa pasywnego [6]

1.2. Podstawowe informacje o prefabrykacji

1.2.1. Prefabrykacja wczoraj i dziś

Idea prefabrykacji w budownictwie sięga historią do czasów rzymskich, kiedy to przy wykorzystaniu wapna, gipsu, wody, kamiennego kruszywa oraz popiołu wulkanicznego produkowano kompozyt przypominający dzisiejszy beton. Kolejnym krokiem w historii nawiązującym do prefabrykacji było wynalezienie współczesnego betonu z cementu portlandzkiego w 1824 roku i początki stosowania żelbetu do produkcji siatkobetonowych donic [7].

Kształtowanie sektora budowlanego wraz z rozwijającym i zmieniającym się przemysłem zaczęło rozszerzać produkcję masową poprzez opracowywanie nowych materiałów i technologii budowlanych, zwłaszcza po okresie rewolucji przemysłowej. Pierwszym najważniejszym przykładem standaryzacji i masowej produkcji jest budynek Crystal Palace z 1850 r. w Londynie. W 1891 r. w budynku w Biarritz we Francji zastosowano prefabrykowane belki żelbetowe, a w 1900 r. w Ameryce po raz pierwszy użyto prefabrykowanych żelbetowych płyt dachowych [8]. Kolejne próby prefabrykacji zostały podjęte chociażby przez takiego architekta jak Le Corbusier, którego koncepcja budynku z prefabrykatów Domino z 1914 r. stanowiła przez lata inspirację dla przyszłych pokoleń projektantów. Pomimo dużego zainteresowania system ten został rozpowszechniony dopiero po drugiej wojnie światowej. W wyniku powojennego wyżu demograficznego i co za tym idzie

wysokiego popytu na mieszkania, ta technologia upowszechniła się i wykorzystywano ją do szybkiego stawiania bloków mieszkalnych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych. „Wielka płyta” wzięła swoją nazwę od ścian zewnętrznych warstwowych, które składały się z trzech wzajemnie połączonych warstw – zewnętrznej z betonu zbrojonego, izolacyjnej ze styropianu lub wełny mineralnej oraz nośnej z betonu zbrojonego. Warstwa nośna budynku miała grubość 140-150 mm i nie podlegała ona bezpośredniemu oddziaływaniu czynników atmosferycznych [9] [10]. Jako warstwę izolacyjną do 1982 r. stosowano płyty styropianowe o grubości 50-60 mm, a w następnych latach płyty nieco grubsze. Warstwę zewnętrzną – elewacyjną pełniła płyta betonowa zbrojona o grubości 60 mm. Jej głównym zadaniem była osłona warstw wewnętrznych, a w szczególności warstwy izolacyjnej przez czynnikami atmosferycznymi i uszkodzeniami mechanicznymi [11].

W Polsce po okresie tzw. „wielkiej płyty”, prefabrykacja betonowa zaczęła powracać do łask dopiero w latach 90. ubiegłego wieku, kiedy to dostrzeżono korzyści płynące z badanego systemu nie tylko w sektorze mieszkaniowym, ale także przemysłowym. Elementy i przegrody wykonane w prefabrykacji betonowej coraz częściej są także rozpatrywane w kontekście budownictwa pasywnego, a na rynku pojawiają się certyfikowane materiały stanowiące komponent domu pasywnego [12] [13].

1.2.2. Produkcja prefabrykatów betonowych

Beton prefabrykowany to beton, który jest produkowany w jednym miejscu do wykorzystania w innym miejscu jako materiał mobilny. Największa część światowej produkcji prefabrykatów prowadzona jest w wyspecjalizowanych zakładach dostawców, jednak w niektórych przypadkach z przyczyn m.in. ekonomicznych, geograficznych, skali produktu lub z powodu utrudnionego dostępu, część elementów jest przygotowywana przy samym placu budowy [14]. Fabryka dostawcy komercyjnego zazwyczaj obejmuje obiekty do produkcji asortymentów o podobnym charakterze w zależności od specjalizacji firmy, elementów ramowych, okładziny, belek mostowych itp. W związku z tym sprzęt jest często wysoce zmechanizowany, uwzględniający szybkie dozowanie i dystrybucję betonu, a także posiadający instalację do przyspieszonego utwardzania produktu [15] [16].

Stosowana obecnie prefabrykacja ma nie tylko zapewnić relatywnie krótki czas budowy, z którego będą wynikały odpowiednio oszczędności. Obecne

rozwiązania są powiązane także z wysoką jakością wykonania przy zastosowaniu wysokiej klasy izolacji i odpowiednich rozwiązań technologicznych. Co więcej, elementy i przegrody prefabrykowane coraz częściej znajdują zastosowanie w budynkach energooszczędnych, a także w tych o najwyższej klasie energooszczędności [17].

Należy zaznaczyć, że według danych Głównego Inspektora Nadzoru Budowlanego, konstrukcje prefabrykowane żelbetowe wraz z konstrukcjami żelbetowymi monolitycznymi należą także do najbezpieczniejszych form budowy, na których sporadycznie dochodzi do katastrof budowlanych (<1% wg danych na 2021 rok) [18].

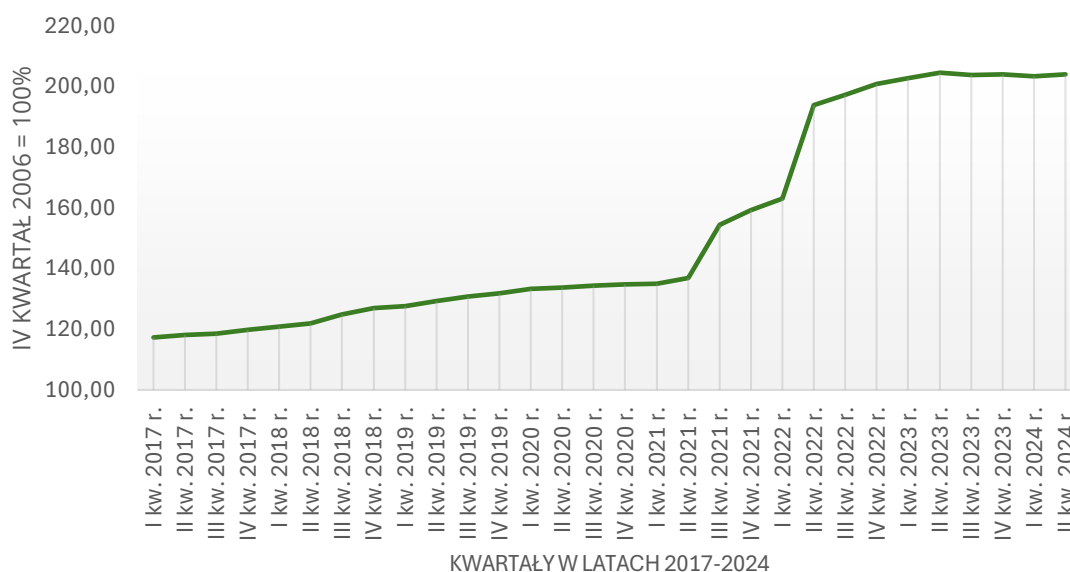
1.2.3. Prefabrykacja a sytuacja gospodarcza

Rosnąca inflacja, brak wykwalifikowanych pracowników i wzrost kosztów czynników produkcji, a także cyklicznie podnoszona płaca minimalna stanowią jedne z głównych czynników wpływających na niestabilność rynku budowlanego, a co za tym idzie na poszukiwanie przez inwestorów i wykonawców alternatywnych rozwiązań pozwalających w jak największym stopniu uniezależnić się od wyżej wskazanych czynników. W ostatniej dekadzie polski rynek budowlany już kilkakrotnie doświadczał wręcz skokowych ruchów w zakresie cen podstawowych materiałów budowlanych, które doprowadziły w konsekwencji do upadku znaczących podmiotów wykonawczych. Pierwszym takim przypadkiem była organizacja Euro 2012, która przyniosła niespotykaną do tej pory liczbę inwestycji, a wraz z nią wzrost cen takich materiałów jak np. stal czy mieszanka mineralno – asfaltowa. Kolejny taki przypadek to regularny wzrost cen od 2017 r. czynników produkcji, tj. materiałów, robocizny i najmu sprzętu [19]. Ten trend pomimo chwilowych stagnacji, utrzymał się w wyniku kolejnych niespodziewanych sytuacji geopolitycznych. Trwająca od 2020 r. pandemia COVID-19 spowodowała ograniczenia w produkcji, a także utrudnienia w pozyskiwaniu pracowników spoza granicy kraju. Następnie czynnikiem destabilizacji rynku polskiego i światowego była inwazja Rosji na Ukrainę. W pierwszych tygodniach wojny skokowy wzrost zanotowała stal, którą Polska importowała w dużej ilości z Ukrainy i Białorusi. Braki kadrowe odczuli także polscy wykonawcy, którzy dotychczas korzystali z siły roboczej zza wschodniej granicy. Na poniższych wykresach (Rys. 1.2, Rys. 1.3, Rys. 1.4) przedstawiono wykresy zmian cen czynników produkcji pomiędzy I kwartałem 2017 r. a II kwartałem 2024 r. Dane te pochodzą z biuletynu cen Sekocenbud i są one otrzymywane na podstawie wyników ankiet

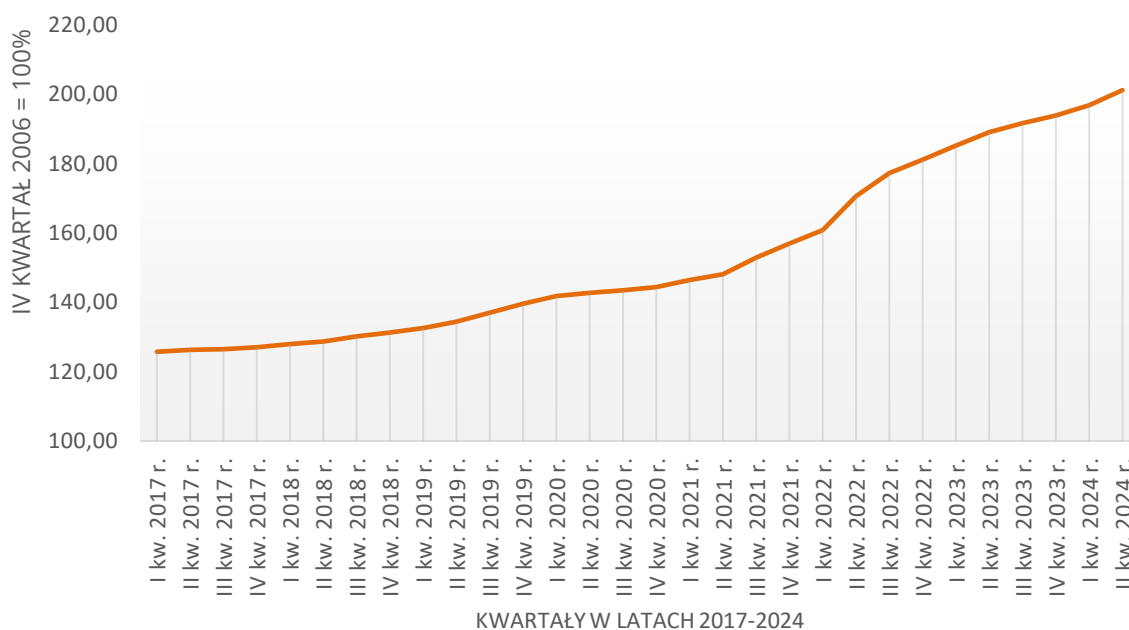
przeprowadzonych przez wydawnictwo z wykonawcami i producentami materiałów [129]. Poniższe wykresy zmian cen czynników produkcji wskazują na wzrost od kilkudziesięciu (ceny materiałów i najmu sprzętu) do kilkuset procent (stawka robocizny) na przestrzeni ostatnich siedmiu lat. Najbardziej zauważalne skoki zostały dostrzeżone w zakresie materiałów budowlanych - Rys. 1.3, w szczególności na skutek wystąpienia wspomnianych już okoliczności, tj. pandemii COVID-19 i inwazji Rosji na Ukrainę.



Rys. 1.2 – Wykres zmian poziomu stawki Robocizny kosztorysowej dla robót ogólnobudowlanych – brutto według danych Sekocenbud [129]



Rys. 1.3 – Wykres zmian poziomu cen materiałów budowlanych według danych Sekocenbud [129]



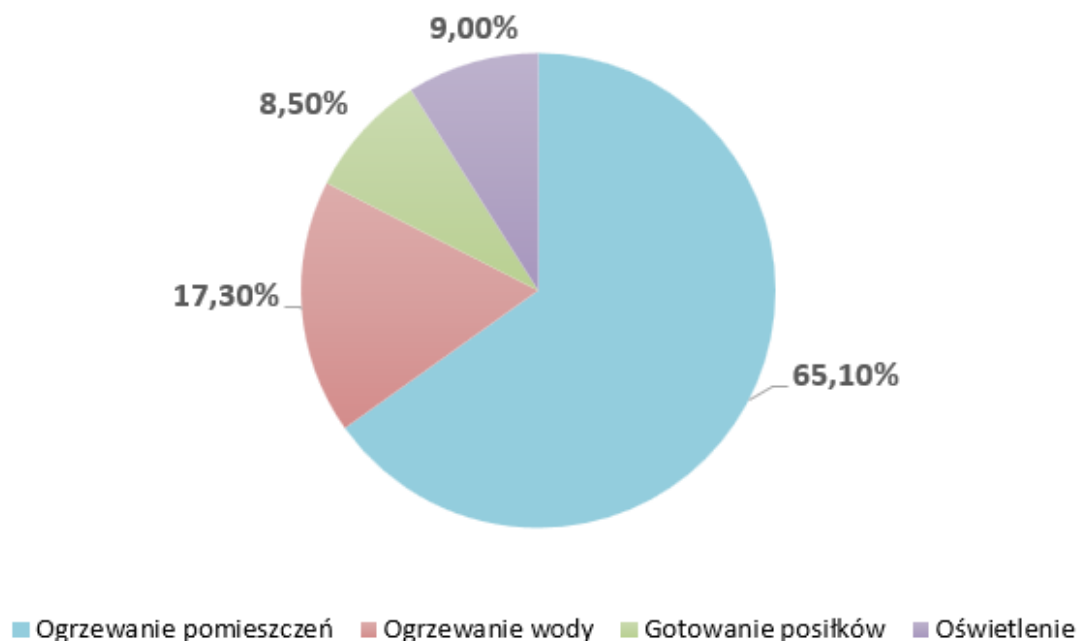
Rys. 1.4 - Wykres zmian poziomu cen najmu sprzętu budowlanego według danych Sekocenbud [129]

Dane przedstawione na powyższych wykresach wskazują na niestabilność rynku budowlanego w ostatnich latach, przez co wykonawcy i inwestorzy są zmuszeni do poszukiwania bezpieczniejszych inwestycji z krótszym czasem realizacji. Standardowe konstrukcje monolityczne są długotrwałe, wymagają dużego zaangażowania pracowników fizycznych, są zależne od warunków pogodowych, a ponadto są bardzo wrażliwe na niestabilność rynkową ze względu na długi czas ich trwania. Właśnie dlatego to prefabrykacja staje się alternatywą dla tradycyjnych konstrukcji jako odpowiedź na potrzebę ograniczenia ryzyka długotrwałego wzrostu cen i braków kadrowych.

1.3. Ceny energii nieodnawialnej

Coraz częściej przedmiotem debaty publicznej staje się zagadnienie rosnących kosztów energii nieodnawialnej, co odbija się na różnych sektorach gospodarki, a w znaczącym stopniu dotyka także budownictwa. Według danych GUS udział gospodarstw domowych w krajowym zużyciu energii stanowi 20,2% dla 2021 roku. Jest to wzrost o 20,9% w porównaniu z 2002 r. Zgodnie z danymi GUS pokazanymi na Rys. 1.5, 82,40% całkowitego zużycia energii w gospodarstwach

domowych przeznacza się na ogrzewanie pomieszczeń (65,10%) i przygotowanie ciepłej wody użytkowej (17,30%).



Rys. 1.5 - Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych według kierunków użytkowania (wyrażona w procentach) [132]

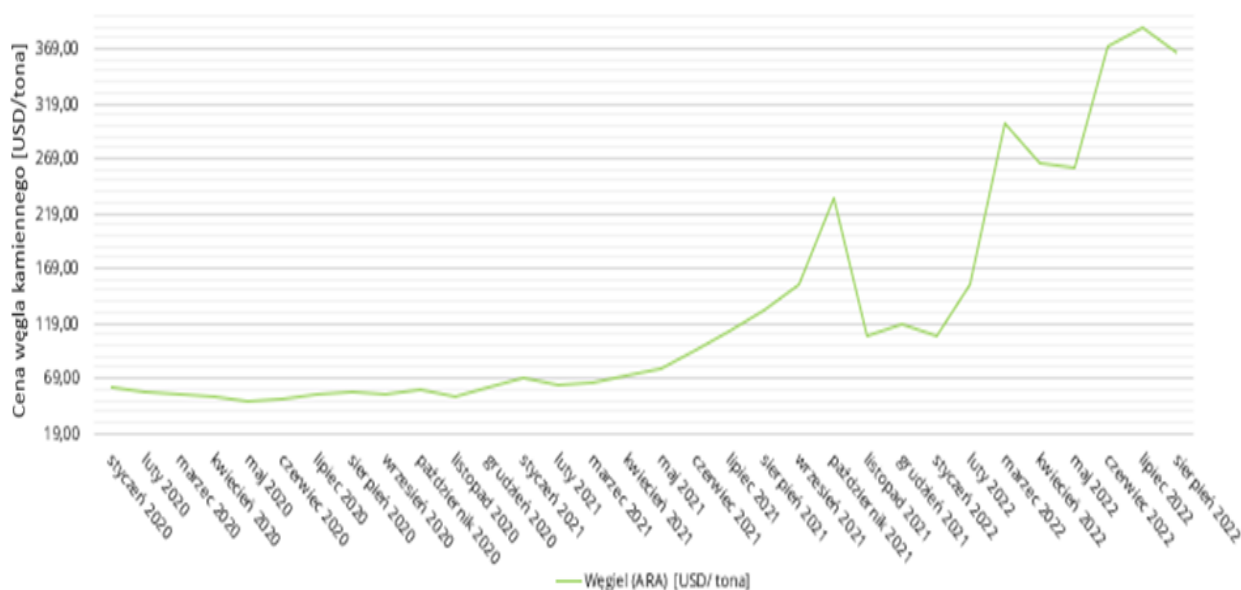
Są to obszary największego zapotrzebowania na energię nie tylko w gospodarstwach domowych, ale także w budynkach komercyjnych i użyteczności publicznej. Skala wzrostu kosztów ponoszonych względem energii nieodnawialnej w dużej mierze jest odzwierciedleniem światowych cen podstawowych surowców energetycznych – na Rys. 1.6 przedstawiono notowania cen gazu ziemnego, na Rys. 1.7 notowania cen ropy naftowej oraz na Rys. 1.8 notowania cen węgla. Dane te stanowią rynkowe ceny surowców, powszechnie dostępne w notowaniach giełdowych [142].



Rys. 1.6 – Notowania gazu ziemnego (USD / mln Btu) [142]

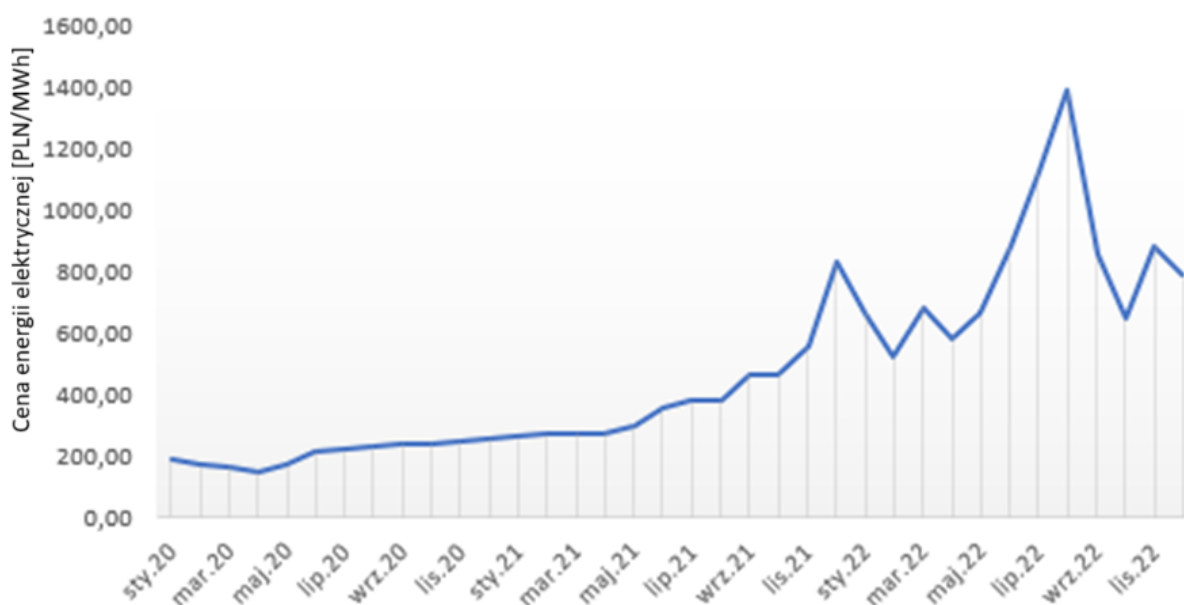


Rys. 1.7 – Notowania ropy naftowej (USD / baryłka) [142]



Rys. 1.8 - Notowania węgla kamiennego (USD / tona) [142]

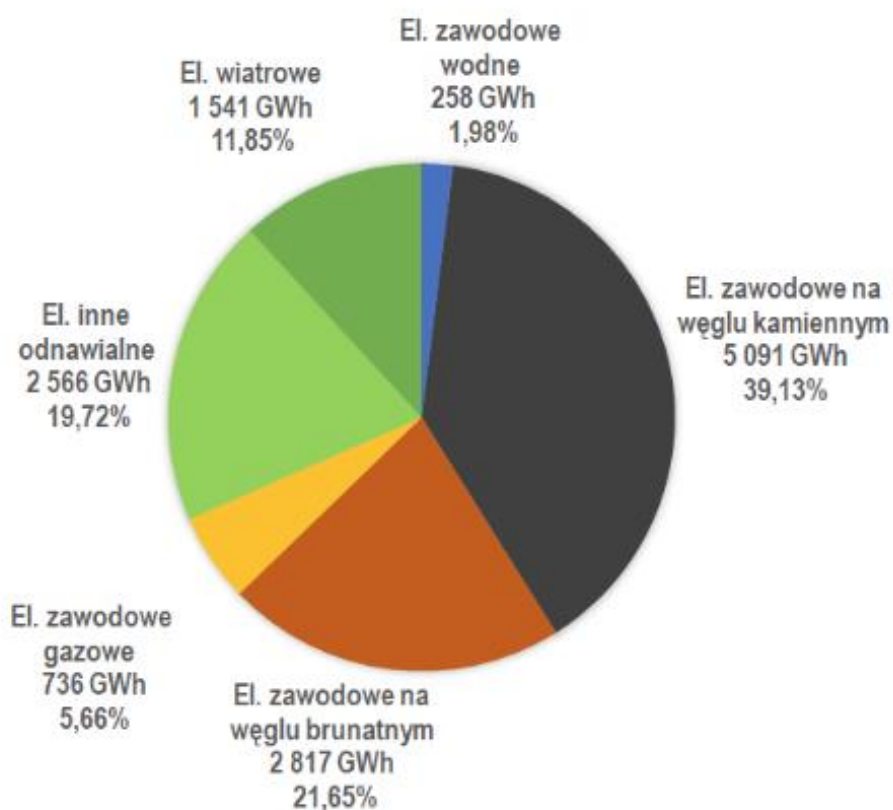
Dane, pokazane w formie krzywej na wykresie, dla wszystkich trzech opisanych surowców, wskazują na znaczący wzrost cen, a od drugiej połowy 2021 r. zauważalna jest także duża niestabilność w postaci skokowych wzrostów i spadków. Powyższe notowania są odzwierciedleniem zaburzenia sytuacji geopolitycznej w wyniku wojny w Ukrainie, która skutkowałą naruszeniem łańcuchów dostaw surowców i destabilizacją rynku. Konsekwencje omówionych ruchów stały się widoczne bezpośrednio w cenie energii, o czym świadczą dane zebrane na Rys. 1.9.



Rys. 1.9 – Wykres miesięcznej ceny energii elektrycznej (BASE) [PLN/MWh] [142]

Ceny energii elektrycznej rosną od II kwartału 2020 roku, tj. od czasu wybuchu pandemii COVID-19. Największe skoki zostały jednak zaobserwowane na początku 2022 roku oraz w III kwartale 2022 roku. Niemniej utrzymująca się tendencja wskazuje na wzrost 3-4 – krotny energii na przestrzeni trzech ostatnich lat.

Kolejnym czynnikiem obrazującym poziom zależności pomiędzy ceną surowców, a ceną energii elektrycznej w Polsce jest tzw. miks energetyczny, czyli struktura produkcji energii elektrycznej na przykładzie danych z maja 2024 r. Według danych wskazanych na poniższym wykresie kołowym (Rys. 1.10) 66,4% całkowitej produkcji pochodzi ze źródeł nieodnawialnych, w tym aż 60,8% pochodzi z węgla. Tylko niespełna 33,6% udziału w produkcji stanowi energia odnawialna [145].



Rys. 1.10 – Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce, dane na maj 2024 r. [145]

1.4. Wymagania legislacyjne w Polsce i w Unii Europejskiej w zakresie fizyki budowli i zahamowania globalnego ocieplenia

1.4.1. Działania Unii Europejskiej w zakresie zahamowania globalnego ocieplenia

W wyniku postępującego ocieplenia klimatu i rosnącego zagrożenia z nim związanego, wspólnota międzynarodowa z Unią Europejską na czele, podjęły ważne ruchy w celu zahamowania globalnego ocieplenia. Pierwszy znaczący krok został postawiony w 2009 roku w Kopenhadze podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu. Pomimo osiągnięcia tzw. „porozumienia kopenhaskiego”, dokument nie został przyjęty jako decyzja ONZ, aczkolwiek zatwierdzenie tego dokumentu przez 140 Państw stało się jasnym sygnałem na otwartość przywódców krajów do dialogu w sprawie ochrony klimatu. I tak podczas konferencji w Cancún w 2010 roku w oficjalnej decyzji wydanej przez ONZ przyznano, że nie wolno dopuścić, by globalne ocieplenie przekroczyło wyższy poziom niż 2 °C w porównaniu do czasów poprzedzających epokę przemysłową [155]. Pomimo kolejnych corocznych konferencji, dopiero w 2015 roku w Paryżu wspólnota międzynarodowa wypracowała kompromis w postaci porozumienia klimatycznego, będącego pierwszym w historii prawnie wiążącym porozumieniem w skali światowej w dziedzinie klimatu. Za główne założenia porozumienia paryskiego przyjęto następujące ustalenia:

- ograniczenie ocieplenia do 1,5 °C.
- osiągnięcie zerowych emisji netto w dłuższym terminie.

Co ważne, przed konferencją paryską 187 krajów zobowiązało się do redukcji emisji, której głównym celem jest ograniczenie wzrostu temperatury do 2,7 – 3,5 °C do końca stulecia [155].

Niezwykle istotnym punktem konferencji klimatycznej w Paryżu było zdefiniowanie mechanizmów finansowych, zgodnie z którymi kraje już rozwinięte będą przekazywać rozwijającym się krajom ok. 100 miliardów dolarów w skali roku na inwestycje mające na celu adaptację do zmian klimatycznych i ograniczenie emisji. Właśnie w głównej mierze od ilości wyemitowanego dwutlenku węgla zależy wzrost temperatury powierzchni naszej planety. W odniesieniu do przyszłości, strony ustaliły, że wspólne będą dążyć do poprawy zdolności społeczeństwa do radzenia sobie z negatywnymi skutkami zmian klimatycznych. Kraje rozwinięte zobowiązały się także do pomocy

i udzielenia stałego wsparcia dla krajów rozwijających się, umożliwiając im szybsze przystosowanie się do zmian. Swoje zaangażowanie zaoferowała także Unia Europejska, która podejmuje kroki dążące do ograniczenia emisji o co najmniej 40 % do 2030 r. Ostatecznie porozumienie paryskie zostało ratyfikowane przez Unię Europejską 5 października 2016 roku, co pozwoliło na wejście porozumienia w życie już 4 listopada 2016 r. [20]

Kolejne ustalenia nastąpiły 14 lipca 2021 roku, kiedy to Komisja Europejska przyjęła pakiet legislacyjnych propozycji „Fit for 55” („Gotowi na 55”), którego celem w ramach Europejskiego Zielonego Ładu jest wzmocnienie Unii Europejskiej jako światowego lidera klimatycznego. Wskazany pakiet ma na celu aktualizację prawodawstwa w zakresie klimatu na 2030 r., po to by osiągalność neutralności klimatycznej w 2050 r. była jak najbardziej prawdopodobna. Głównym założeniem pakietu jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z 1990 r.

Pakiet „Gotowi na 55” poza głównym założeniem, mówi także o nowelizacji dyrektywy dotyczącej odnawialnych źródeł energii. Zaproponowano w nim zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii z 32% do 40% osiągniętego do 2030 r. Rada Europejska i Parlament Europejski w marcu 2023 r. osiągnęły wstępne porozumienie polityczne dotyczące nowelizacji dyrektywy [20].

1.4.2. Warunki techniczne dotyczące wymagań w zakresie fizyki budowli

Od 1 stycznia 2021 roku zmianie uległy przepisy Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r., dotyczące warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [127] w zakresie energooszczędności budynków (Dz. U. 2021. 2351 oraz z 2022. poz.88). Wprowadzone przepisy zakładają sukcesywne zmniejszanie zapotrzebowania budynków na energię przy równoległym korzystaniu z zasobów energetycznych ze źródeł odnawialnych. Zmiany, które nastąpiły w polskich przepisach są następstwem dyrektywy 2010/31/UE z 19 maja 2010 roku w sprawie charakterystyki energetycznej. Wszystkie te zmiany mają na celu zwiększenie energooszczędności budynków. Wymagania i zmiany dotyczą inwestorów, którzy otrzymali pozwolenie na budowę po 1 stycznia 2021 roku. Odnoszą się one także do wartości wskaźnika EP (Rys. 1.11) czyli zapotrzebowania na energię pierwotną budynku. Od 2014 roku zmniejszono zapotrzebowanie z wartości 120 kWh/(m²rok) do 95 kWh/(m²rok) w 2017 roku, a od 2021 roku wartość ta ponownie uległa aktualizacji do wartości 70 kWh/(m²rok).



Rys. 1.11 - Zapotrzebowanie na Energię pierwotną budynku w zależności od panujących Warunków Technicznych [127]

W rozporządzeniu Ministra Infrastruktury zmianie uległy także współczynniki przenikania ciepła przegród budynku. W Tabeli 1.1 wskazano wartości obowiązujące od 2014, 2017 i 2021 roku w podziale na poszczególne przegrody. Pogrubiono wartości aktualnie obowiązujące.

Tabela 1.1 - Wartość współczynników przenikania ciepła określonych przez obowiązujące Warunki Techniczne [127]

Rodzaj przegrody i temperatura w pomieszczeniu	$U_{C(max)} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$		
	od 1.01.2014	od 1.01.2017	od 1.01.2021
Ściany zewnętrzne:			
$t_i \geq 16^\circ C$	0,25	0,23	0,20
$8^\circ C \leq t_i < 16^\circ C$	0,45	0,45	0,45
$t_i < 8^\circ C$	0,90	0,90	0,90
Dachy, stropodachy i stropy pod nieogrzewanymi poddaszami lub przejazdami:			
$t_i \geq 16^\circ C$	0,20	0,18	0,15
$8^\circ C \leq t_i < 16^\circ C$	0,30	0,30	0,30
$t_i < 8^\circ C$	0,70	0,70	0,70
Podłogi na gruncie:			
$t_i \geq 16^\circ C$	0,30	0,30	0,30
$8^\circ C \leq t_i < 16^\circ C$	1,20	1,20	1,20
$t_i < 8^\circ C$	1,50	1,50	1,50

Rodzaj przegrody i temperatura w pomieszczeniu	$U_{C(max)} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$		
	od 1.01.2014	od 1.01.2017	od 1.01.2021
Stropy nad pomieszczeniami nieogrzewanymi i zamkniętymi przestrzeniami podpodłogowymi:			
$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,25	0,25	0,25
$8^\circ\text{C} \leq t_i < 16^\circ\text{C}$	0,30	0,30	0,30
$t_i < 8^\circ\text{C}$	1,00	1,00	1,00
Okna (z wyjątkiem okien połaciowych), drzwi balkonowe i powierzchnie przezroczyste nieotwieralne:			
$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	1,30	1,10	0,90
$t_i < 16^\circ\text{C}$	1,80	1,60	1,40
Okna połaciowe:			
$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	1,50	1,30	1,10
$t_i < 16^\circ\text{C}$	1,80	1,60	1,40
Drzwi w przegrodach zewnętrznych lub w przegrodach między pomieszczeniami ogrzewanymi i nieogrzewanymi:	1,70	1,50	1,30

1.4.3. Polityka klimatyczno-energetyczna w Polsce

W następstwie działań Unii Europejskiej i nakreślonej polityki dążenia do neutralności klimatycznej w 2050 r., Ministerstwo Klimatu i Środowisko przedstawiło uchwałę przyjętą przez Radę Ministrów jako „Politykę Energetyczną Polski do 2040 r.”. Opiera się ona na trzech podstawowych filarach:

- sprawiedliwa transformacja,
- zeroemisyjny system energetyczny,
- dobra jakość powietrza.

Na tej podstawie, określono najważniejsze elementy polityki energetycznej Polski do 2040 r., a mianowicie:

- „W 2030 r. udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w końcowym zużyciu energii brutto wyniesie co najmniej 23%.
- W przypadku energetyki wiatrowej na morzu – moc zainstalowana osiągnie: ok. 5,9 GW w 2030 r. i do ok. 11 GW w 2040 r.

- W 2033 r. uruchomiony zostanie pierwszy blok elektrowni jądrowej o mocy ok. 1-1,6 GW. Kolejne bloki będą wdrażane co 2-3 lata, a cały program jądrowy zakłada budowę 6 bloków.
- Do 2030 r. nastąpi redukcja emisji gazów cieplarnianych (GHG) o ok. 30 proc. w stosunku do 1990 r.
- Do 2040 r. potrzeby cieplne wszystkich gospodarstw domowych pokrywane będą przez ciepło systemowe oraz przez zero- lub niskoemisyjne źródła indywidualne.
- Redukcja wykorzystania węgla w gospodarce będzie następować w sposób zapewniający sprawiedliwą transformację.
- Rozbudowie ulegnie infrastruktura gazu ziemnego, ropy naftowej i paliw ciekłych, a także zapewniona zostanie dywersyfikacja kierunków dostaw"[141].

1.5. Betard sp. z o.o. i doktorat wdrożeniowy

Betard sp. z o.o. to firma, która od 1990 roku specjalizuje się w produkcji elementów prefabrykowanych dla obiektów mieszkaniowych, przemysłowych, konstrukcji inżynierskich, mostowych, drogowych i hydrotechnicznych. Na początku swojej działalności firma skupiała się na produkcji powtarzalnych elementów ściennych i stropowych. Na przestrzeni ponad 30 lat spółka rozbudowała się do 9 zakładów produkcyjnych, w których łącznie produkuje się około 300 produktów, przeznaczonych dla wszystkich typów budownictwa. Firma dysponuje liniami technologicznymi pozwalającymi na produkcję nietypowych prefabrykatów wykonanych na indywidualne zamówienie klientów. Na Rys. 1.12 przedstawiono zdjęcie hali produkcyjnej z uformowaną ścianą prefabrykowaną.



Rys. 1.12 – Zdjęcie uformowanej ściany prefabrykowanej w zakładzie Betard [130]

Firma Betard postanowiła także wziąć udział w 2020 roku programie „Doktorat wdrożeniowy”, będący nową inicjatywą programową Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, którego głównym celem jest połączenie świata nauki i biznesu, osiągając obopólne korzyści. Doktorant, przygotowując rozprawę doktorską, pod opieką opiekuna naukowego i pomocniczego z ramienia przedsiębiorstwa, ma za zadanie usprawnić działanie firmy.

Główny produkt firmy Betard dla obiektów kubaturowych – ściany trójwarstwowe powstają w halach prefabrykacji producenta. W pierwszej kolejności jednak powstaje projekt elementów prefabrykowanych w oprogramowaniu CAD. Wraz z projektem elementu i zbrojenia powstaje także projekt deskowania, czyli rysunki form ze sklejki drewnianej przez co istnieje możliwość dostosowania kształtu i rozmiaru elementu do wymogów projektowych. W projekcie deskowania uwzględniono są już otwory okienne oraz otwory technologiczne. Dzięki temu zabiegowi ściana po zamontowaniu na budowie, jest gotowa pod prace instalacyjne i montażowe [130]. Ścianę trójwarstwową przed montażem z widoczną izolacją i otworami okiennymi przedstawiono na Rys. 1.13.



Rys. 1.13 – Zdjęcie ściany trójwarstwowej z widoczną izolacją
źródło: [Materiały własne]

Betonowanie przestrzeni pomiędzy płytami odbywa się po oczyszczeniu i zwilżeniu wewnętrznych powierzchni płyt. Mieszanka betonowa powinna mieć konsystencję dopasowaną do grubości rdzenia ściany i układu kratownic. Beton należy układać równomiernie, poziomymi warstwami. Do wypełnienia prefabrykatu warto zastosować mieszankę betonową samozagęszczalną. Ważne jest, by w przypadku zastosowania prefabrykowanych ścian zespolonych w kondygnacjach podziemnych, piwnicznych, garażowych oraz kondygnacji, gdzie wymagana jest szczelność przeciwwilgociowa/przeciwwodna lub istnieje zjawisko wystąpienia wilgoci, penetracji wody zastosować materiały hydroizolacyjne [21] [22].

Ciężar ściany zespolonej jest niewielki i wynosi ok. 300–350 kg/m², co umożliwia montaż dźwigiem o niewielkim udźwigu. Ściany zespolone montuje się na wcześniej przygotowanym podłożu, w którym powinny być zabetonowane wytyki, czyli pręty startowe. Wytyki startowe wyznaczają położenie ścian i pozwalają na ich prawidłowe połączenie z płytą fundamentową. Po ustawieniu elementu prefabrykowanego w odpowiednim miejscu należy go zabezpieczyć podporami ukośnymi i skontrolować jego ułożenie w pionie. Podpory należy

umocować do tulei montażowych, mieszczących się w prefabrykacie oraz do podłoża betonowego. Uzyskany kąt pomiędzy podporą a ścianą powinien wynosić około 40-50°. Dopiero po zamocowaniu wszystkich podpór można odpiąć haki dźwigu i przystąpić do układania kolejnego elementu ściany [22]. Na Rys. 1.14 dla zobrazowania przedstawiono zamontowane ściany zespolone zabezpieczone podporami ukośnymi.



Rys. 1.14 - Zamontowane ściany zespolone zabezpieczone podporami ukośnymi [23]

1.6. Budownictwo modułowe

W kontekście dalszych działań mających na celu optymalizację zużycia materiałów, minimalizację błędów wykonawczych, niezależność od czynników zewnętrznych i minimalizację ryzyka wzrostu cen czynników produkcji w długoterminowej perspektywie, coraz częściej poruszane jest zagadnienie wykorzystania budownictwa modułowego. Ma ono przede wszystkim zastosowanie w inwestycjach posiadających powtarzalną formę jak hotele czy szpitale. Niemniej coraz częściej w ofertach producentów spotyka się modułowe

formy budynków jednorodzinnych. W szczególności w niestabilnych jak obecnie czasach forma ta jest w pewien sposób rozwiązaniem na wysokie koszty roboczogodziny i wzrost cen materiałów. Przygotowanie potrzebnych elementów w hali produkcyjnej następuje równolegle z pracami fundamentowymi, robotami ziemnymi i robotami instalacyjnymi, przez co znacznie skraca się czas trwania całej budowy. Ponadto takie rozwiązanie sprawdza się w przypadkach, gdy placem budowy jest niewielka działka, gdzie problematyczne jest rozstawienie dużej liczby sprzętu. Połączenie prefabrykacji z modułową formą budynku i ich proces wytwarzania w hali produkcyjnej umożliwia eliminację błędów wykonawczych, które mogą wydarzyć się na tradycyjnej budowie.

2. Problem naukowy, cel, zakres pracy, tezy rozprawy doktorskiej

2.1. Problem naukowy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest modułowy budynek mieszkalny w zabudowie szeregowej, zlokalizowany w Bielawie w województwie dolnośląskim (dalej jako: **przedmiotowy budynek**). Ściany zewnętrzne w przedmiotowym budynku to tworzące moduły prefabrykowane ściany trójwarstwowe, wyprodukowane i dostarczone przez firmę Betard sp. z o.o.

W rozprawie problem naukowy dotyczy spełnienia założeń budownictwa pasywnego dla przedmiotowego budynku. W związku z tym sformułowano następujące pytania badawcze, których odpowiedzi były celem badań i przeprowadzonych analiz. A mianowicie:

1. Czy przedmiotowy budynek modułowy, składający się ze ścian trójwarstwowych produkcji firmy Betard sp. z o.o., może osiągnąć założenia budownictwa pasywnego oraz aktualnych Warunków Technicznych?
2. Jeżeli przedmiotowy budynek nie spełnia wymogów budownictwa pasywnego, to jakie rozwiązania korygujące należy zaproponować, by przedmiotowy budynek osiągnął te założenia?
3. Jaki wpływ na charakterystykę energetyczną przedmiotowego budynku doprowadzonego do standardu pasywnego (dalej jako: **proponowany budynek**) będzie miała zmiana jego lokalizacji?
4. Jaki wpływ na charakterystykę energetyczną proponowanego budynku będzie miała prognozowana zmiana klimatu?
5. Czy i w jakim okresie nastąpi zwrot poniesionych nakładów finansowych wynikających z doprowadzenia przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego, w wyniku zmniejszenia zapotrzebowania na energię ciepłą i wykorzystania odnawialnych źródeł energii?

Do rozwiązania problemu naukowego wykorzystano wyniki badań na modelach numerycznych w celu symulacji rzeczywistych zjawisk w postaci charakterystyki energetycznej budynku. Dodatkowo wykorzystano metodę empiryczną z wykorzystaniem badań próbek elementów betonowych w aparacie płytowym, w celu określenia współczynnika przewodzenia ciepła λ . Do analizy

wpływu zmian klimatu na charakterystykę energetyczną proponowanego budynku, wykorzystano opracowane przez Międzynarodowy Zespół do Zmian Klimatu (IPCC) scenariusze zmiany koncentracji węgla w atmosferze oraz wykonano symulacje energetyczne w prognozowanych warunkach klimatycznych. W ostatniej części rozprawy, przy pomocy dostępnych danych cen rynkowych, określono czas zwrotu poniesionych nakładów finansowych na doprowadzenie przedmiotowego budynku do spełnienia wymagań budownictwa pasywnego.

2.2. Cel rozprawy

Cele niniejszej rozprawy zostały przedstawione poniżej:

1. Opis i analiza podstawowych parametrów fizyki budowli przegród zewnętrznych przedmiotowego budynku.
2. Określenie charakterystyki energetycznej przedmiotowego budynku w wyniku symulacji energetycznej.
3. Opracowanie rozwiązań umożliwiających doprowadzenie przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego.
4. Wdrożenie na rynek ściany trójwarstwowej z wysokiej jakości izolacją termiczną, której współczynnik przenikania ciepła przegrody spełnia Warunki Techniczne [134] oraz wymogi budownictwa pasywnego.
5. Wyznaczenie wybranych czynników klimatotwórczych właściwych dla różnych klimatów znajdujących się w Polsce oraz dla przewidywanych przyszłych klimatów Polski na podstawie dostępnych scenariuszy zmian koncentracji węgla wyznaczonych przez Międzynarodowy Zespół do Zmian Klimatu (IPCC).
6. Weryfikacja spełnienia wymagań budownictwa pasywnego przez proponowany budynek znajdujący się w różnych klimatach – aktualnych i prognozowanych.
7. Opracowanie rekomendacji rozwiązań do zastosowania w budynkach zabezpieczających je przed negatywnym wpływem zmiany klimatu na charakterystykę energetyczną i przegrzewanie się proponowanego budynku.
8. Porównanie kosztu budowy przedmiotowego i proponowanego budynku w standardzie pasywnym.
9. Określenie czasu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na dostosowanie przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego.

2.3. Zakres rozprawy

Zakres rozprawy doktorskiej został przedstawiony w poniższych punktach i jest związany z celem niniejszej pracy:

1. Dokonanie krytycznego przeglądu literatury w zakresie najważniejszych informacji dotyczących rozwiązań stosowanych w budynkach pasywnych.
2. Przeprowadzenie analizy podstawowych parametrów fizyki budowli, w tym współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych budynku, uwzględniając także wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ otrzymane w wyniku badania aparatem płytowym z osłoniętą płytą grzejną.
3. Przeprowadzenie symulacji komputerowej w zakresie wyznaczenia następujących mostków termicznych:
 - a) liniowego mostka termicznego na styku ściany zewnętrznej i płyty fundamentowej,
 - b) liniowego mostka termicznego w narożu ściany zewnętrznej,
 - c) punktowych mostków termicznych przez łączniki w ścianie zewnętrznej.
4. Wykonanie modelu przedmiotowego budynku w oprogramowaniu do projektowania i modelowania budynków - SketchUp wraz ze zdefiniowaniem przegród, lokalizacji, orientacji budynku oraz panującego klimatu.
5. Konwersja wyników symulacji energetycznej do arkusza kalkulacyjnego dla budynków pasywnych - PHPP i ich weryfikacja pod kątem wymagań budownictwa pasywnego.
6. Opracowanie i weryfikacja rozwiązań korygujących do zastosowania w przedmiotowym budynku, celem spełnienia wymagań standardu budownictwa pasywnego.
7. Weryfikacja otrzymanych wyników symulacji energetycznej proponowanego budynku po wprowadzonych zmianach i potwierdzenie, że powyższe zmiany doprowadziły przedmiotowy budynek do spełnienia wszystkich kryteriów budynku pasywnego.
8. Wdrożenie na rynek przy udziale autora niniejszej pracy, ściany trójwarstwowej z wysokiej jakości izolacją termiczną, której współczynnik przenikania ciepła przegrody spełnia Warunki Techniczne [134] oraz wymogi budownictwa pasywnego.

9. Wyznaczenie zmiany wybranych czynników klimatotwórczych na podstawie dostępnych scenariuszy zmiany koncentracji węgla opracowanych przez Międzynarodowy Zespół do Zmian Klimatu (IPCC).
10. Wykonanie symulacji energetycznej proponowanego budynku w standardzie pasywnym w prognozowanym klimacie dla roku 2030 i 2050.
11. Weryfikacja otrzymanych wyników symulacji energetycznej proponowanego budynku i ponowna analiza pod kątem spełnienia przez ten budynek kryteriów budownictwa pasywnego.
12. Określenie rekomendacji zabezpieczających obecnie projektowane budynki przed wpływem prognozowanej zmiany klimatu na charakterystykę energetyczną budynku.
13. Analiza porównawcza przedmiotowego i proponowanego budynku w zakresie kosztowej wartości inwestycji.
14. Określenie w jakim czasie dodatkowo poniesione nakłady finansowe potrzebne na osiągnięcie przez przedmiotowy budynek standardu pasywnego zostaną zrekompensowane przez prognozowane oszczędności wynikające z mniejszego zapotrzebowania na energię cieplną i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii.
15. Opracowanie wniosków końcowych.
16. Podanie kierunków dalszych badań.

2.4. Tezy rozprawy doktorskiej

W rozprawie doktorskiej przedstawiono następujące tezy:

1. Rozpatrywana w pracy ściana trójwarstwowa produkowana przez Betard sp. z o.o. może stanowić przegrodę zewnętrzną w budynku o standardzie pasywnym.
2. W wyniku ocieplania się klimatu, budynki, także te o najwyższej efektywności energetycznej, należy projektować uwzględniając możliwość ich przegrzewania się w przyszłości.
3. Koszt budowy proponowanego budynku w standardzie pasywnym jest wyższy od kosztu przedmiotowego budynku. Zwrot dodatkowo poniesionych nakładów finansowych w wyniku zmniejszenia zapotrzebowania na energię cieplną i wykorzystanie odnawialnych źródeł

energii jest możliwy w co najmniej kilkunastoletniej perspektywie czasowej, która jest też zależna od czynników rynkowych i geopolitycznych.

2.5. Oryginalne elementy pracy

Za oryginalne elementy pracy, wypełniające luki naukowe w literaturze przedmiotu należy uznać:

1. Wykorzystanie rezultatów badania współczynnika przewodzenia ciepła materiału aparatem płytowym z osłoniętą płytą grzejną do wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła ściany prefabrykowanej trójwarstwowej.
2. Opracowanie i weryfikacja rozwiązań zaproponowanych w przedmiotowym budynku w celu spełnienia wymagań standardu budownictwa pasywnego.
3. Weryfikacja otrzymanych wyników symulacji energetycznej budynku po wprowadzonych zmianach i potwierdzenie, że powyższe zmiany doprowadziły przedmiotowy budynek do spełnienia wszystkich kryteriów budynku pasywnego.
4. Wdrożenie na rynek przy udziale autora niniejszej pracy, ściany trójwarstwowej z wysokiej jakości izolacją termiczną, której współczynnik przenikania ciepła przegrody spełnia Warunki Techniczne oraz wymogi budownictwa pasywnego.
5. Wyznaczenie prognozowanych wartości wybranych czynników klimatotwórczych na podstawie dostępnych scenariuszy zmiany koncentracji węgla w atmosferze opracowanych przez Międzynarodowy Zespół do Zmian Klimatu (IPCC).
6. Przedstawienie i analiza rezultatów symulacji energetycznej właściwej dla proponowanego budynku w prognozowanym klimacie dla roku 2030 i 2050.
7. Wyznaczenie rekomendacji na podstawie analizy otrzymanych wyników symulacji energetycznej proponowanego budynku w prognozowanym klimacie, zabezpieczających obecnie projektowane budynki przed wpływem zmian klimatu na charakterystykę energetyczną i przegrzewanie się budynku.
8. Określenie czasu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na doprowadzenie przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego zrekompensowanych przez prognozowane oszczędności wynikające z mniejszego zużycia energii i wykorzystania OZE.

3. Analiza literatury przedmiotu

Analiza literatury przedmiotu dotyczy zagadnień bezpośrednio poruszanych w niniejszej rozprawie, przedstawiając aktualny stan wiedzy na ich temat zarówno w skali kraju, jak i świata. Przegląd przedstawia również opracowane dostępne narzędzia, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia badań i odpowiedzi na tezy przedstawione w akapicie 2.4 niniejszej pracy.

3.1. Podstawowe parametry fizyki budowli

3.1.1. Współczynnik przewodzenia ciepła

Współczynnik przewodzenia ciepła, określany także jako wartość λ jest miarą szybkości przenikania różnic temperatur przez materiał. Przy występowaniu niższej przewodności cieplnej materiału, wolniejsze jest także przenikanie przez ten materiał różnic temperatur, co się wiąże z lepszymi właściwościami izolacyjnymi. Sprowadza się to do wniosku, że im niższa przewodność cieplna materiału, tym także mniej energii jest wymaganej do utrzymania komfortowych warunków wewnątrz. Współczynnik przewodzenia ciepła wyraża ilość ciepła w Watach, przepływająca w 1s przez 1m² homogenicznej warstwy materiału o grubości 1m prostopadle do powierzchni, w momencie, gdy różnica temperatur na przeciwległych powierzchniach tego prostopadłościanu wynosi 1K [24].

Dostępnych jest wiele metod pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych i można je podzielić na dwie grupy:

- metody nieustalonego strumienia cieplnego,
- metody ustalonego strumienia cieplnego.

Metody ustalonego strumienia cieplnego to takie, w których strumień ciepła przechodzi przez próbkę i to te metody stanowią temat normalizacji i są stosowane w badaniach certyfikujących wyroby budowlane [25].

Do metod ustalonego strumienia cieplnego zalicza się:

- aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną,
- aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego,
- skrzynka grzejna,
- aparat rurowy do badania otulin rur.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ zależy od nie tylko od rodzaju materiału, ale także od:

- wilgotności,
- temperatury,
- czasu produkcji,
- grubości próbki, w zależności czy nie przekracza wartości granicznej [26].

3.1.2. Opór cieplny R

Po otrzymaniu współczynnika przewodzenia ciepła λ można wyliczyć opór cieplny poszczególnych warstw przegrody R_i . W kolejnym kroku należy uwzględnić także opór przejmowania ciepła po obu stronach przegrody, tj. wewnętrznej (R_{si}) oraz zewnętrznej (R_{se}). Współczynnik ten należy określić dla wszystkich materiałów, z jakich zrobiona jest ściana, w średnich warunkach wilgotnościowych [133]. W przypadku elementu składającego się z kilku warstw opór cieplny należy obliczyć w następujący sposób:

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (3.1)$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodzenia ciepła w W/(mK),

d – grubość warstwy w m.

3.1.3. Współczynnik przenikania ciepła (U)

Jest to współczynnik wyrażający ilość energii przepływającej przez 1m² przegrody w ciągu 1 sekundy przy różnicy temperatur 1K po obu stronach przegrody. Oznacza się go literą U i wyraża w W/(m²K) [24]. Do wyliczenia wartości współczynnika uwzględnia się zastosowany materiał w poszczególnych warstwach przegrody, grubości warstw, a także rodzaj danej przegrody. W kolejnym kroku uwzględnia się braki i nieszczelności izolacji oraz mostki termiczne. Do wykazania wartości U konieczna jest znajomość współczynnika przewodzenia ciepła λ (lambda), wyznaczonego doświadczalnie. Współczynnik ten należy określić dla wszystkich materiałów, z jakich zrobiona jest ściana, w średnich warunkach wilgotnościowych. Współczynnik przenikania ciepła U wyznaczamy z następującego wzoru:

$$U = 1/R, \quad (3.2)$$

gdzie

R to jest całkowity opór cieplny przegrody.

Współczynnika przewodzenia ciepła λ służy natomiast do wyliczenia oporu cieplnego poszczególnych warstw przegrody $R_i = d_i/\lambda_i$, gdzie d_i stanowi grubość warstwy w metrach. W kolejnym kroku należy uwzględnić także opór przejmowania ciepła po obu stronach przegrody, tj. wewnętrznej (R_{si}) oraz zewnętrznej (R_{se}) [24]. Poniżej w **Tabela 3.1** przedstawiono wartości oporu przejmowania ciepła w zależności od rodzaju przegrody.

Tabela 3.1 - Opory przejmowania ciepła dla różnych rodzajów przegród [133]

Rodzaj przegrody	Opory przejmowania ciepła [m ² xK/W]	
	R _{si}	R _{se}
Ściana zewnętrzna	0,13	0,04
Ściana zewnętrzna zagłębiona w gruncie	0,13	-
Ściana wewnętrzna pomiędzy pomieszczeniami ogrzewanymi	0,13	0,13
Ściana wewnętrzna przy pomieszczeniu nieogrzewanym	0,13	0,13
Stropodach niewentylowany	0,10	0,04
Strop pod nieogrzewanym strychem	0,10	0,10
Strop nad nieogrzewaną piwnicą	0,17	0,17
Podłoga na gruncie	0,17	-

Znając całkowitą wartość oporu cieplnego będącego sumą oporu warstw przegrody i oporu przejmowania ciepła po jej obu stronach, można wyliczyć współczynnik przenikania ciepła U , który jest odwrotnością całkowitego oporu cieplnego. Obliczenia dokonuje się zakładając uproszczenia, że strumień ciepła jest stały w czasie i prostopadły do powierzchni. Zakłada się, że długość i szerokość przegrody są nieskończone, ciepło jest przejmowane jednakowo na całej powierzchni, a warstwy przegrody są izotropowe i jednorodne. W obliczeniach należy także uwzględnić poprawki wynikające z niedoskonałości przegrody jak chociażby nieszczelności [27].

3.1.4. Współczynnik strat ciepła

Współczynnik strat ciepła H_{tr} wyrażony w jednostce [W/K] jest sumą współczynników strat ciepła wszystkich elementów obudowy budynku tj. podłogi na gruncie, dachu lub stropodachu, ścian zewnętrznych, otworów okiennych i drzwiowych. Gdy natomiast współczynnik strat ciepła będzie dotyczył tylko jednej przegrody, to obliczone straty ciepła będą stratami wyłącznie przez daną przegrodę [24]. Współczynnik strat ciepła wyraża się następującym wzorem:

$$H_{tr} = \sum_n A_n U_n + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \quad (3.3)$$

gdzie:

A – pole przegrody w m²;

U – współczynnik przenikania ciepła przegrody wyliczony wg normy PN-EN ISO 6946, [W/(m² x K)];

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła k-tego mostka liniowego, [W/(m x K)];

l – długość k-tego mostka liniowego [m];

χ – wartość j-tego mostka punktowego [W/K].

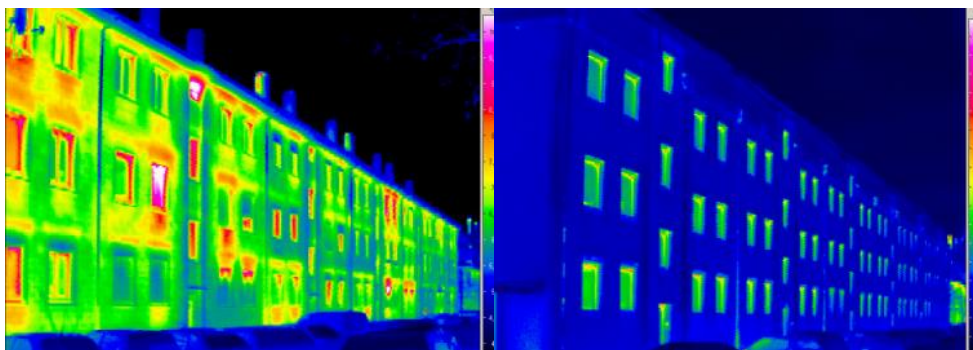
3.1.5. Mostki cieplne w budynku

Większość istniejących budynków w Polsce charakteryzuje się bardzo wysokim zużyciem energii, głównie ze względu na złą jakość przegród zewnętrznych, które często pozbawione są izolacji termicznej. W budynkach o tak złej jakości cieplnej, straty całkowite są bardzo wysokie, co prowadzi do niskiego poziomu komfortu życia. W budynkach nieocieplonych dyspersja zachodzi niemal równomiernie w całej przegrodzie cieplnej, uwzględniając mostki termiczne, punkty nieciągłości lub niejednorodności materiału [28].

Mostki cieplne, zwane również mostkami termicznymi są to miejsca w przegrodach budynku, przez które ucieka ciepła, a co za tym idzie w tym elemencie przegrody współczynnik przenikania ciepła jest znacznie wyższy niż w sąsiadujących elementach przegrody [29]. Mostki cieplne powodują zmiany strumienia ciepła oraz temperatury powierzchni w stosunku do wartości w przegrodach bez mostków [30]. Stanowią one ryzyko wystąpienia powierzchniowej kondensacji pary wodnej lub rozwoju pleśni w wyniku obniżenia temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody. Wyróżniamy następujące mostki termiczne:

- punktowe mostki cieplne powstają w miejscach, gdzie dochodzi do punktowego zmniejszenia oporu termicznego. Przyczyną może być przebicie struktury izolacji termicznej np. poprzez łącznik,
- liniowe mostki cieplne powstają wskutek braku termoizolacji lub niestarannie ułożonego ocieplenia. Występują też często w miejscach połączeń dwóch lub więcej elementów,
- geometryczne mostki cieplne, które powstają, gdy powierzchnia przyjmująca ciepło jest znacznie mniejsza od powierzchni oddającej, co się dzieje zazwyczaj w narożach ścian [6].

Jak widać po prawej stronie zdjęcia na Rys. 3.1, powierzchnia zewnętrzna budynku po termomodernizacji charakteryzuje się niską temperaturą, zbliżoną do powietrza zewnętrznego, a mostki termiczne, jeśli występują, są widoczne na kamerze termowizyjnej w porównaniu z resztą konstrukcji. W szczególności zauważalne są szklane powierzchnie okien oraz ich krawędzie, których temperatura na powierzchni zewnętrznej jest wyższa niż temperatura ściany.



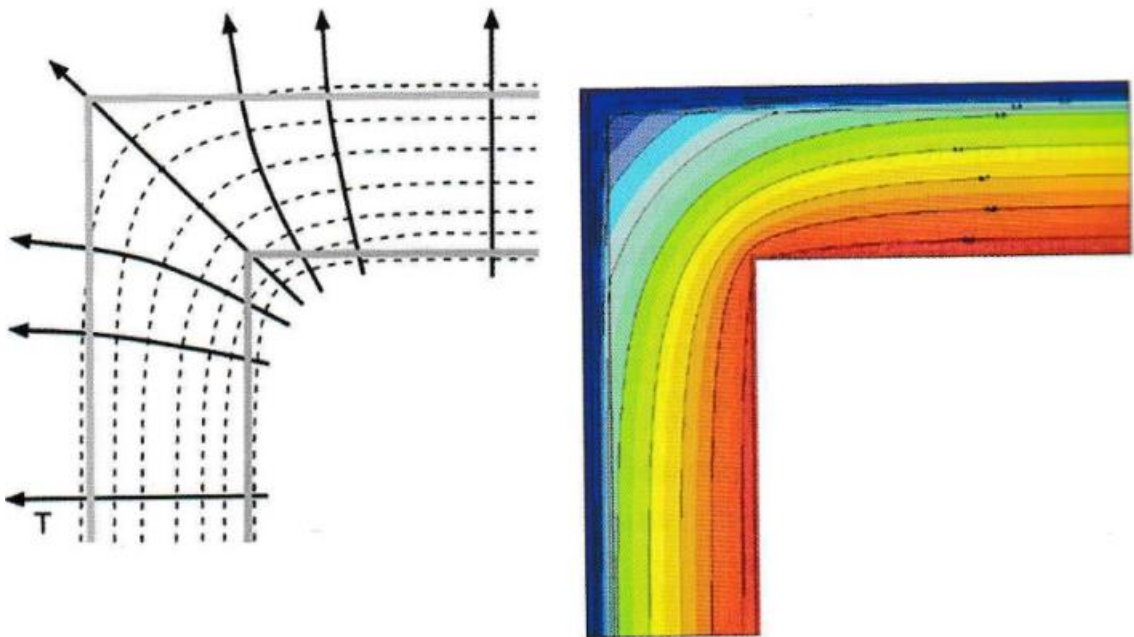
Rys. 3.1 - Przykład zdjęcia termowizyjnego pokazującego budynek mieszkalny przed i po renowacji przy Tevesstrasse w Frankfurtie [6]

Przepływ ciepła rozproszonego przez całą przegrodę cieplną, przy różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem i środowiskiem zewnętrznym, rozchodzi się według przepływów trójwymiarowych. Teoretycznie, aby obliczyć całkowite rozproszenia budynku, wystarczyłoby obliczyć rzeczywisty przepływ ciepła, tworząc trójwymiarowy model budynku, jednak dla uproszczenia obliczeń możliwa jest analiza bilansu energetycznego różnicując przepływy ciepła na jednowymiarowe, dwuwymiarowe i trójwymiarowe [6] [31].

Obliczenie ww. jednowymiarowych przepływów ciepła w konstrukcji definiuje się jako obliczenie dyspersji poprzez tzw. elementy regularne [32]. Jednakże przegroda cieplna składa się nie tylko z jednorodnych elementów konstrukcyjnych,

ale istnieją różne obszary niejednorodności/nieciągłości, na przykład obszary, w których występuje zmiana kierunku izolacji ze względu na geometrię samego budynku lub zmniejszenie, zwiększenie lub przerwanie samej izolacji (np. belka dachowa, balkony itp.) [33] [6].

Obszary te, zdefiniowane odpowiednio jako „geometryczne” i „strukturalne” mostki termiczne, stanowią część powłoki termicznej, dla której hipotezy dotyczące przepływu jednowymiarowego nie mogą zostać zastosowane, w związku z czym konieczne jest zdefiniowanie przepływu dwuwymiarowego. Obserwując ścianę zbudowaną z jednorodnych i izotropowych warstw o przewodności λ , izotermy są równoległe do powierzchni samej ściany i prostopadłe do kierunku przepływu. W przypadku braku ciągłości izotermy mają tendencję do zakrzywiania się, szczególnie tam, gdzie wpływ mostka termicznego jest większy, co powoduje pogrubienie przepływu ciepła [34] [35]. Na Rys. 3.2 przedstawiono rozkład izoterm w narożu ściany.



Rys. 3.2 - Rozkład izoterm w narożu ściany [6]

Straty ciepła odpowiadające tym obszarom niejednorodności są reprezentowane przez przepływy dwuwymiarowe i obliczane przy użyciu współczynnika L_{2D} [W/mK]:

$$L_{2D} = \sum_{i=1}^N U_i * l_i + \psi, \text{ gdzie} \quad (3.4)$$

ψ - to współczynnik liniowego mostka termicznego,

U_i – współczynnik przenikania ciepła i -tego regularnego elementu oddzielającego środowisko wewnętrzne od otoczenia w różnych temperaturach [W/m²K],

l_i - długość rozpatrywanego elementu, obliczona na podstawie wymiarów zewnętrznych [m],

N - liczby regularnych elementów rozpatrywanego węzła.

Dlatego w kategoriach fizycznych budynku współczynnik liniowego mostka termicznego Ψ reprezentuje poprawkę, którą należy wprowadzić w obliczeniach przepływu ciepła przez regularne elementy L_{1D} (obliczonego zgodnie z UNI EN ISO 6946), aby uzyskać przepływ dwuwymiarowy L_{2D} (już bliższy przepływowi rzeczywistemu niż przepływ jednowymiarowy) [24].

Dlatego też, po zdefiniowaniu jednowymiarowego przepływu ciepła L_{1D} i dwuwymiarowego przepływu ciepła L_{2D} , możliwe jest przedstawienie całkowitego rzeczywistego przepływu ciepła L_{3D} [W/K] jako dwuwymiarowego przepływu skorygowanego współczynnikiem χ [W/K], zdefiniowanym jako współczynnik punktowego mostka cieplnego, który w najbardziej ogólnym przypadku przyjmuje postać:

$$L_{3D} = \sum_{i=1}^N U_i * A_i + \sum_{j=1}^M \psi_j * l_j + \sum_{n=1}^K \chi_n, \text{ gdzie} \quad (3.5)$$

A_i - powierzchnia i -tego elementu obliczona na podstawie wymiarów zewnętrznych [m²],

M - liczba liniowych mostków termicznych,

K - liczba punktowych mostków termicznych.

Ostatecznie χ oznacza zatem korektę dwuwymiarowego przepływu ciepła w celu uzyskania rzeczywistych strat ciepła.

Rozpatrywany liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego, oddzielającego dwa rozpatrywane środowiska, Ψ , wyraża się wzorem:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j * l_j, \text{ gdzie} \quad (3.6)$$

U_j – współczynnik przenikania ciepła j komponentu 1-D, oddzielającego dwa rozpatrywane środowiska,

l_j – długość w obrębie modelu geometrycznego 2-D, do którego stosuje się wartość U_j ,

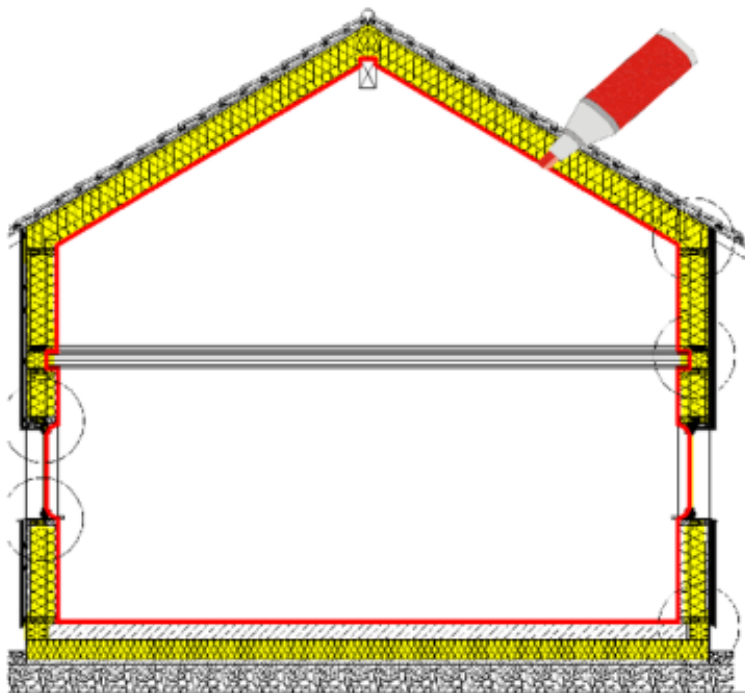
N_j – liczba komponentów 1-D.

Obliczenia komputerowe z zastosowanie dwuwymiarowego modelu geometrycznego można stosować do określenia wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła połączeń ściana – podłoga. L_{2D} uzyskuje się za pomocą obliczeń komputerowych całego detalu.

Do wykonania obliczeń wykorzystuje się program THERM, który jest działającym w systemie operacyjnym Microsoft Windows programem komputerowym. Przy użyciu programu THERM można modelować dwuwymiarowy przepływ ciepła, w których mostki termiczne stanowią istotny problem. Analizy dokonane przy użyciu THERM umożliwiają prawidłowe oszacowanie wydajności energetycznej i ustalenie miejscowych pól temperatury [6] [36].

Obliczenia dwuwymiarowego przepływu ciepła bazują na metodzie elementów skończonych, która umożliwia modelowanie skomplikowanych geometrycznie przekrojów. Graficzny interfejs umożliwia wykreślenie przekrojów analizowanych elementów o znanych wymiarach. Każdy przekrój jest reprezentowany przez kombinację poligonów. Któremu przypisuje się własności materiałowe, a następnie definiuje się warunki brzegowe. Po wykreowaniu modelu dalsze obliczenia przeprowadza się automatycznie [28] [27].

Istnieje możliwość uniknięcia uwzględniania mostków termicznych jako wkładu do programu PHPP, w którym wykonywana jest analiza przedmiotowego budynku. Muszą jednak zaistnieć konkretne warunki, które będą spełnione. Bardzo skuteczną metodą uzyskania projektu pozbawionego mostków termicznych jest tak zwana „reguła ołówka” lub „reguła flamastra” pokazana na Rys. 3.3. Aby przegroda była wolna od mostków termicznych, musi istnieć możliwość zamknięcia przegrody termicznej w ciągłym konturze zewnętrznym w stosunku do izolacji nie odrywając ołówka od papieru. Ogólnie rzecz biorąc, stosuje się grubość ołówka odpowiadającą grubości izolacji, aby była stała i nieprzerwana, ale podejście to może znaleźć zastosowanie tylko w krajach charakteryzujących się małą zmiennością klimatyczną, takich chociażby jak Polska [37] [38].



Rys. 3.3 - Reguła ołówka lub flamastra [1]

3.1.6. Skutki mostków termicznych - zmiany temperatur powierzchni wewnętrznych

W odróżnieniu od tego, co dzieje się w przypadku zwykłych elementów, w mostkach termicznych występuje zmiana w gęstości przepływu ciepła, która zazwyczaj powoduje obniżenie temperatury powierzchni wewnętrznej. Efekt ten jest bardziej uwydatniony w narożnikach lub krawędziach, gdzie przepływ powietrza jest ograniczony. Przykładowo te same elementy wyposażenia, takie jak meble, ograniczają nie tylko wymianę konwekcyjną z powietrzem wewnętrznym, ale także wymianę radiacyjną, zwiększając ryzyko obniżenia temperatury na powierzchni. Osadzanie się pary wodnej zawartej w powietrzu wewnętrznym na chłodnych powierzchniach wewnętrznych jest główną przyczyną powstawania kondensacji. Ryzyko to jest szczególnie uwydatnione w przypadku remontów, w których zapewnia się szczelność dzięki nowym oknom i drzwiom, które są bardziej hermetyczne niż poprzednie [34] [39]. Stare budynki, słabo izolowane, ograniczają ryzyko pleśni lub kondensacji dzięki ciągłej wentylacji gwarantowanej przez nieszczelne oprawy, co odwrotnie jest uwydatnione tam, gdzie wentylacja

jest znacznie zmniejszona, tj. odpowiednio do (nieizolowanych) pojemników. Obecność przeciągów z jednej strony pozwala na zmniejszenie wilgotności bezwzględnej pomieszczeń wewnętrznych, z drugiej sprzyja zwiększeniu strat ciepła. Konsekwencje powstawania kondensacji lub pleśni mają charakter higieniczno-sanitarny, konstrukcyjny i mieszkaniowy [118]. Para wodna zawarta w powietrzu wewnętrznym może przylegać i kondensować na porach struktur wewnętrznych i przenikać kapilarnie do wnętrza konstrukcji, aż dojdzie do nasycenia. Proces ten powoduje stopniowy wzrost przewodności cieplnej samych materiałów, silnie zależnych od zawartości wilgoci, a tym samym wzmacniających efekt mostka termicznego, co prowadzi do rozprzestrzeniania się pleśni na całej powierzchni [28] [40]. Tworzenie się pleśni na powierzchniach wewnętrznych jest zjawiskiem septycznym, pleśń ma negatywny wpływ na zdrowie: podrażnia drogi oddechowe, powoduje bóle głowy czy trudności z koncentracją [41]. Na Rys. 3.4 pokazano skutki kondensacji wilgoci w miejscach konstrukcyjnych.



Rys. 3.4 - Skutki kondensacji wilgoci w miejscach konstrukcyjnych [31]

Ostatecznie pleśń może również prowadzić do chorób przewlekłych, takich jak alergiczny nieżyt nosa, astma czy nadwrażliwe zapalenie płuc. Z tego powodu zasadnicze znaczenie ma utrzymanie odpowiedniego poziomu wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach oraz odpowiednio wysokich temperatur powierzchni wewnętrznych, aby zapobiec tworzeniu się pleśni na ścianach,

szczególnie w miejscach o niższych temperaturach, takich jak mostki termiczne. Aby ocenić spełnienie tzw. „kryterium higienicznego”, czyli braku pleśni ze względu na stosunkowo wysokie wartości wilgotności powierzchni wewnętrznej, w normie UNI EN ISO 13788 wprowadzono bez jednostkowy parametr, zwany czynnikiem temperatury na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} , który obliczamy przy założeniu, że opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej wynosi R_{si} .

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}, \text{ gdzie:} \quad (3.7)$$

θ_{si} – temperatura na powierzchni wewnętrznej,

θ_e – temperatura środowiska zewnętrznego,

θ_i – temperatura środowiska wewnętrznego.

Wartość czynnika temperatury na powierzchni wewnętrznej powinna być mniejsza niż projektowy czynnik temperatury na powierzchni wewnętrznej, wyznaczany za pomocą wzoru:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}, \text{ gdzie} \quad (3.8)$$

θ_{si} – minimalna dopuszczalna temperatury powierzchni.

Określone wymagania w Warunkach Technicznych, jakim odpowiadać powinny budynki i ich usytuowanie (Dz.U.nr 75, poz. 690), dopuszczają na przyjęcie minimalnej wartości współczynnika $f_{Rsi} = 0,72$ na określonych warunkach w p.2.2.2 Załącznika nr 2.

3.2. Podstawowe informacje o budownictwie pasywnym

3.2.1. Izolacja termiczna w budynku pasywnym

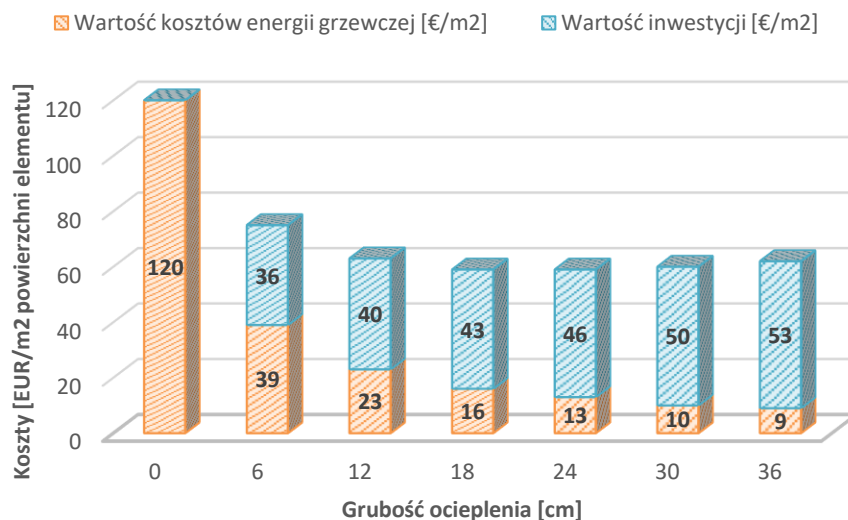
Zastosowana izolacja termiczna stanowi główny czynnik stanowiący ochronę cieplną budynku i ma bezpośredni wpływ na pozostałe zapotrzebowanie na ciepło. Optymalną ochronę cieplną najłatwiej osiągnąć przy możliwie niewielkiej powierzchni zewnętrznej, a co za tym idzie przy jak najbardziej zwartej bryle budynku [121]. Nie oznacza to jednak, że koniecznością jest rezygnacja z elementów architektonicznego kształtowania bryły, ponieważ wszelkie nowe możliwości mogą zostać zastosowane poza powłoką termiczną oraz w samym jej wnętrzu [42][45]. Dobrze zwarta bryła zapewnia jednak mniejsze koszty

inwestycyjne poprzez brak konieczności stosowania dodatkowych ograniczeń strat ciepła [33]. Poniżej w Tabeli 3.2 przedstawiono wymagania względem izolacji cieplnej przegród w budynkach pasywnych, a także w budynkach zaprojektowanych według Warunków Technicznych obowiązujących od 01.01.2021 r. [134] [43].

Tabela 3.2 – Wartości współczynnika przenikania ciepła w podziale na przegrody zewnętrzne dla budynku pasywnego i nowych Warunków Technicznych 2021 [134] [44]

	Budynek pasywny	Nowe budownictwo wg WT 2021
Rodzaj przegrody	Współczynnik przenikania ciepła U_c [W/(m ² x rok)]	Współczynnik przenikania ciepła U_c [W/(m ² x rok)]
Dach	≤0,15	≤0,15
Okna	≤0,80	≤0,90
Ściana zewnętrzna	≤0,15	≤0,20
Płyta fundamentowa	≤0,15	≤0,30

Analizując powyższą tabelę można zauważyć, że wymagania dotyczące nowego budownictwa według WT2021 nie odbiegają znacząco od wymagań względem budynków pasywnych [45]. Powyższe zjawisko można określić trendem, do którego dąży branża budowlana, co także powoduje rozwój w produkcji materiałów o wysokiej jakości właściwościach izolacyjnych. Mimo wszystko w dalszym ciągu wymagania względem budynków pasywnych są bardziej restrykcyjne, a co za tym idzie do zaizolowania przegrody zewnętrznej, jak np. ściany zewnętrznej, będziemy potrzebowali grubszej warstwy izolacji termicznej lub materiału o korzystniejszym współczynniku przewodzenia ciepła λ [W/(mK)] [37]. Niemniej jednak Passivhaus Institut w Darmstadt, na podstawie powstałych już budynków pasywnych w Niemczech, dokonał analizy zależności kosztów energii grzewczej i inwestycji od grubości ocieplenia, co zostało przedstawione na Rys. 3.5.



Rys. 3.5 - Wykres zależności kosztów względem grubości ocieplenia [46]

Według wykonanych badań, optymalny zakres grubości izolacji oscyluje między 18 a 30 cm izolacji termicznej. Jest to sygnał, że przy zastosowaniu grubszej warstwy izolacji, wartość inwestycji nie jest już tak skutecznie równoważona przez oszczędności wynikające z mniejszych kosztów energii grzewczej. Należy zatem mieć na uwadze, że bardziej opłacalne będzie niekiedy zastosowanie izolacji o korzystniejszym współczynniku przewodzenia ciepła [35] [47].

3.2.2. Szczelność powłoki budynku w standardzie pasywnym

Bardzo wysoki procent szkód budowlanych jest spowodowanych przez nieszczelności w budynku. Przepływ powietrza przez szczeliny z zewnątrz do wewnątrz budynku przez parcie wiatru może spowodować wdmuchiwanie wody opadowej do konstrukcji. Natomiast przy przepływie strumienia z wewnątrz na zewnątrz budynku ciepłe, wilgotne powietrze z pomieszczenia oziębia się przenikając przez nieszczelność, wskutek czego zmienia się jego wilgotność, gdyż zimne powietrze może zaabsorbować tylko niewielką ilość pary wodnej. Prowadzi to do skraplania się nadmiaru wilgoci, która wnika w nieszczelność i powoduje zawilgocenie konstrukcji. Poza znaczącymi szkodami, nieszczelność przyczynia się także do pogorszenia ochrony przeciwdźwiękowej oraz zwiększonych strat ciepła [48] [49].

Kontroli szczelności budynku można dokonać za pomocą testu szczelności np. Blower Door Test - Rys. 3.6 [44]. Polega on na zamontowaniu w otworze drzwiowym elastycznej membrany z wentylatorem, który ma za zadanie utrzymać w całym budynku podciśnienie o wartości 50 Pa. Pomiar określa ilość powietrza

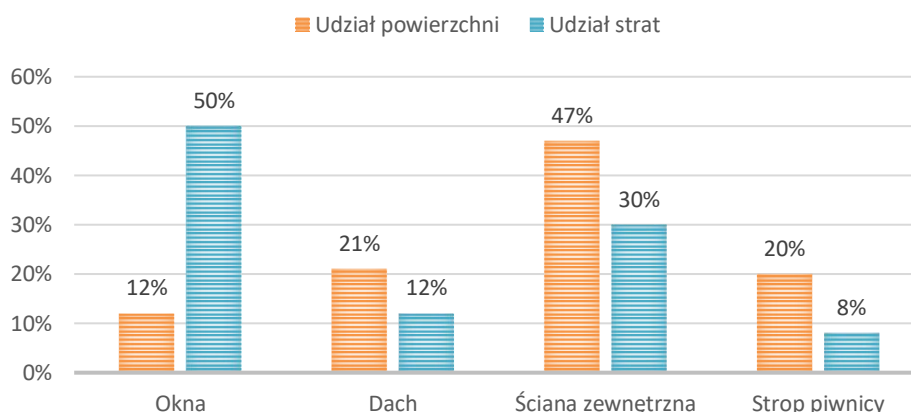
napływającego poprzez nieszczelności. Wartością graniczną w zakresie szczelności powietrznej budynku pasywnego jest $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$, gdzie „n” oznacza ilość wymian powietrza w budynku w ciągu jednej godziny, jeśli różnica ciśnień wewnątrz i na zewnątrz budynku wynosi 50 Pa [31] [50].



Rys. 3.6 - Blower Door Test [6]

3.2.3. Potrójne oszklenie

Okna w budynkach pasywnych odgrywają znaczącą rolę w wyrównaniu strat ciepła poprzez pasywne zyski z promieniowania słonecznego. Ważne jest jednak, by stosować się przy tym do zasad projektowych, które ograniczają dowolne rozmieszczenie przeszkleń w budynku. W obrębie Europy środkowej od marca do listopada budynki wymagają w bardzo małym stopniu aktywnego dogrzania, jednak równolegle nie wykazują dalszego zużycia ciepła. Ogólną sytuację komplikują miesiące zimowe, kiedy to niskim temperaturom towarzyszy także niski poziom nasłonecznienia, a co za tym idzie we wskazanym okresie straty ciepła są najwyższe. Na Rys. 3.7 przedstawiono udział powierzchni przegród wraz z udziałem straty ciepła przez przenikanie w budynku pasywnym. Według danych przedstawionych przez Passivhaus Institut w Darmstadt, okna pomimo niewielkiego udziału (12%) w sumie powierzchni wszystkich przegród zewnętrznych ogrzewanych, generują przeszło połowę straty ciepła w wyniku przenikania. Zatem nawet najlepsze transparentne przegrody mają wyraźnie wyższą przewodność cieplną w porównaniu z nieprzezroczystymi ścianami czy dachami [51] [52].



Rys. 3.7 – Wykres udziału powierzchni danej przegrrody wraz z udziałem straty przez przenikanie [1]

3.2.4. Minimalizacja mostków termicznych

Mostki termiczne to miejsca w budynku skąd ucieka ciepło. W budynkach pasywnych najczęściej występują one w narożach, przyłączach i przejściach instalacji, styków materiałów o różnej przewodności cieplnej [3]. W wyniku jednak dokładnego i starannego projektu oraz rzetelnego wykonania można w znaczącym stopniu ograniczyć straty ciepła spowodowane mostkami termicznymi. W budownictwie pasywnym przede wszystkim należy unikać konstrukcyjnych przebiegów przez powłokę termiczną, gdyż powstaje wtedy tzw. „żebro chłodzące”, w wyniku którego następuje znacząca strata ciepła. Według literatury „Podstawy budownictwa pasywnego” [44], w celu ograniczenia strat z tytułu mostków termicznych, należy się stosować do czterech reguł przedstawionych w Tabeli 3.3:

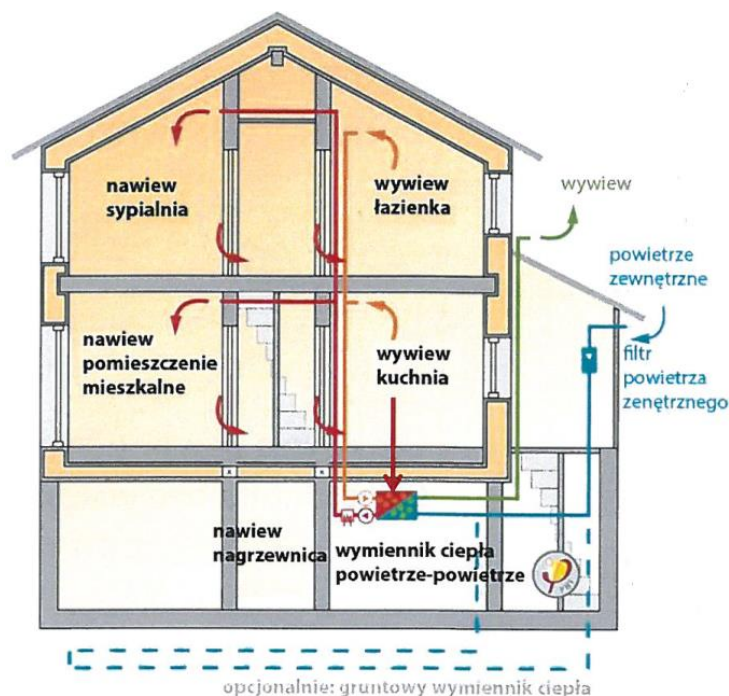
Tabela 3.3 - Reguły godne zastosowania w celu ograniczenia mostków termicznych [44]

Reguła unikania	W miarę możliwości nie przerywać warstwy izolacyjnej.
Reguła przenikania	Jeśli przerwanie warstwy izolacyjnej jest nieuniknione, należy zadbać o to by opór cieplny materiału izolacyjnego był możliwie duży; np. przez zastosowanie gazobetonu lub drewna.
Reguła połączenia	W połączeniach elementów budowlanych – odpowiednie warstwy izolacji łączyć ze sobą w sposób ciągły pełną powierzchnią przekroju.
Reguła geometryczna	Wybierać krawędzie o kątach możliwie rozwartych.

3.2.5. System wentylacyjny nawiewno – wywiewny z odzyskiem ciepła

Świeże powietrze jest podstawą komfortu i dobrego samopoczucia użytkownika budynku. Naturalnym odruchem w budynku tradycyjnym w celu zaczerpnięcia świeżego powietrza jest wietrzenie budynku za pomocą otwierania okien. Jest to jednak sposób niewystarczający, ponieważ wietrzenie odbywa się poprzez wytworzenie przeciągu w określonych i ograniczonych kierunkach. Sposób ten sprawdzi się latem w klimacie umiarkowanym, gdy temperatura zewnątrz w nocy jest niższa niż ta panująca wewnątrz budynku. Problem ten jednak pojawia się w klimacie gorącym i wilgotnym, gdzie wentylacja naturalna nie spełnia swojej roli. Wietrzenie powietrza zarówno przez nieszczelności, jak i przez okna jest w dużej mierze przypadkowe i nie może stanowić jedynej formy wentylacji w budynkach pasywnych [30] [53].

Ponadto miarą dobrej wentylacji jest także stężenie dwutlenku węgla w powietrzu, którego koncentracja powinna być mniejsza niż 0,1% [54]. Według tej wartości wymagane jest zapewnienie jednej osobie około 25-30 m³ świeżego powietrza na godzinę. Wentylacji naturalnej nie można zrealizować jako dostosowanej do potrzeb, ponieważ jej efektywność jest zależna od warunków atmosferycznych. W budynkach pasywnych nie można także zastosować wyłącznie wentylatorów, które by zajmowały się tylko wywiewem zużytego powietrza z pomieszczeń typu łazienka, toaleta czy kuchnia, ponieważ będą one generowały zbyt duże straty ciepła jak na standard budynku pasywnego [45]. Z tego powodu w budynkach pasywnych stosuje się także rekuperację, czyli odzysk ciepła z powietrza wywiewanego [28] [55]. Ciepło zawarte w powietrzu wywiewanym z pomieszczeń, w których mogą powstawać nieprzyjemne zapachy, tj. kuchnia, łazienka, służy do wstępnego podgrzania świeżego powietrza z zewnątrz, które następnie jest nawiewane do pomieszczeń mieszkalnych i sypialni - Rys. 3.8. Warto tu podkreślić, że odzysk ciepła musi być niezwykle efektywny i w budynkach pasywnych sprawność takich urządzeń powinna wynosić co najmniej 75%. Osiągnięcie takiej sprawności jest możliwe poprzez zastosowanie dużych przeciwprądowych wymienników ciepła lub kilkukrotnych wymienników krzyżowych [6] [41].



Rys. 3.8 – Schemat pracy wentylacji nawiewno – wywiewnej z rekuperacją [41]

W domu pasywnym priorytetem jest zapewnienie mieszkańcom jakości środowiska poprzez zastosowanie najbardziej energooszczędnej strategii w odniesieniu do klimatu, w którym jest on zbudowany: koncepcja ta musi obowiązywać na całym świecie, począwszy od zimnego (i suchego) do klimatu tropikalnego (i wilgotnego). Realną stałą musi być zawsze komfort. W momencie, w którym definiujemy przegrodę zamkniętą ze względu na środowisko zewnętrzne, pojawia się potrzeba jej wietrzenia, aby zapewnić mieszkańcom świeże powietrze, którym będą w niej oddychać, będzie higienicznie doskonałe, a jednocześnie dostarczane bez zakłócania warunków komfortu cieplnego określonych przez UNI EN ISO 7730 [56].

Jeżeli powyższe założenia dotyczą każdej zamkniętej przestrzeni, jaka jest różnica pomiędzy systemem wentylacji budynku sklasyfikowanego jako „budynek o niskim zużyciu energii” a systemem wentylacji budynku pasywnego? Główna różnica polega na tym, że w pierwszym przypadku system wentylacji jest systemem niezbędnym, ale i „dodatkowym” do tego, który odpowiada za klimatyzację pomieszczeń. W budynkach pasywnych te dwa systemy (wentylacja i klimatyzacja) w określonych warunkach klimatycznych i dzięki bardzo niskim obciążeniom cieplnym mogą stanowić jeden system [57] [58].

Głównym powodem, dla którego konieczna jest wentylacja otoczenia, jest zapewnienie zdrowia jego mieszkańców: wentylacja w sposób ciągły usuwa z domu nieprzyjemne zapachy i niezdrowe powietrze, zastępując je powietrzem

zewnątrznym. W domu pasywnym priorytetem jest zawsze zdrowie mieszkańców, a efektywność energetyczna jest jej pozytywnym skutkiem. Wentylacja w budynku pasywnym musi być zaprojektowana tak, aby utrzymywać poziom wilgotności względnej powietrza w optymalnym zakresie pomiędzy 40% a 60%, usuwając zanieczyszczenia obecne w samym powietrzu. Wśród tych substancji zanieczyszczających znajduje się CO₂ wytwarzany przez nas poprzez oddychanie oraz inne substancje uwalniane przez meble lub materiały budowlane, a także powstające w wyniku czynności prowadzonych w środowisku wewnętrznym jak na przykład gotowanie, zwane LZO („lotne związki organiczne”) [54].

Zbyt wysoka wilgotność względna prowadzi do namnażania się zarazków i bakterii, które powodują powstawanie pleśni na powierzchniach wewnętrznych i mogą skutkować pogorszeniu się zdrowotności otoczenia, natomiast zbyt niska wilgotność względna może powodować problemy z oddychaniem, nieżyt nosa i suchość błon śluzowych. Pierwsza sytuacja ma miejsce szczególnie wtedy, gdy pomieszczenia wewnętrzne są zbyt słabo wentylowane i kumulują się wysokie wartości wilgotności bezwzględnej, natomiast druga jest typowa dla nadmiernej wentylacji, zwłaszcza zimą, kiedy powietrze wewnętrzne wymieniane jest na zimne powietrze zewnętrzne charakteryzujące się niskim poziomem wilgotności bezwzględnej [59] [60].

Wentylacja może między innymi oczyszczać powietrze w pomieszczeniach, jednocześnie filtrując napływające powietrze zewnętrzne i wywiewane powietrze wewnętrzne. Wymiana powietrza prowadzi jednak do nieuniknionej utraty ciepła w zimie (lub niepożądanego zysku w lecie), co wiąże się z koniecznością dostarczenia (lub usunięcia) ciepła z powietrza zewnętrznego, aby przywrócić mu optymalne warunki cieplno - wilgotnościowe. Z tego powodu systemy odzyskiwania ciepła mogą przyczynić się do zmniejszenia zużycia energii poprzez ograniczenie rozproszenia (lub niepożądanego wkładu w lecie) i nadal gwarantując zdrowe i komfortowe świeże powietrze [47] [55]. Odzysk ciepła staje się efektywny i wygodny tylko wtedy, gdy jego wykorzystanie przynosi zysk netto, czyli jeśli temperatura na wlocie nie spada w sezonie grzewczym i nie podnosi temperatury powietrza zewnętrznego w okresie chłodzenia. W przeciwnym razie, jak ma to miejsce na przykład w przypadku letniej lub sezonowej wentylacji nocnej, energetycznie korzystne staje się wykluczenie mechanizmu odzyskiwania ciepła poprzez bezpośrednie wprowadzenie powietrza zewnętrznego po jego odpowiednim przefiltrowaniu [61] [33].

Główne sposoby wentylacji pomieszczenia to:

- „Niekontrolowana” wentylacja spowodowana przeciągami: ten rodzaj „niekontrolowanej” wymiany powietrza występuje zawsze w każdej zamkniętej obudowie. Przedostawanie się powietrza zewnętrznego przez przeciągi, będące skutkiem połączonego działania wiatru lub różnic temperatur, a przede wszystkim brak możliwości wystarczającej wymiany powietrza wewnętrznego w zależności od potrzeb, nie może być skuteczną metodą gwarantującą trwałą zdrowotność powietrza wewnętrznego i samego budynku. W rzeczywistości wilgotne powietrze przenikające przez konstrukcję budynku może przyczynić się do powstania pleśni, a także spowodować znaczne i „niekontrolowane” straty energii.
- Wentylacja poprzez ręczne otwieranie okien: ta wentylacja, najczęściej stosowana w istniejących budynkach, chociaż umożliwia wymianę powietrza w razie potrzeby, w dalszym ciągu stwarza szereg aspektów niepewności (brak wiatru lub dostosowanej temperatury), które sprawiają, że to rozwiązanie nie jest niezawodne, mimo że pełni zasadniczą rolę w niektórych sytuacjach, na przykład w celu wyeliminowania przegrzania w lecie.
- Wentylacja mechaniczna jedno- lub dwustrumieniowa: wentylacja ta realizowana jest za pomocą „dedykowanego” urządzenia, programowalnego i aktywnego nawet pod nieobecność mieszkańców w budynku. Jest to obecnie najbardziej niezawodne rozwiązanie zapewniające wystarczające zapewnienie dobrej jakości powietrza, usunięcie wilgoci i zanieczyszczeń z wnętrza budynków oraz utrzymanie poziomu komfortu higienicznego stale powyżej wartości progowych [6] [62].

Jeśli chodzi o wentylację przez okna, liczne badania i analizy potwierdzają, że przy tego rodzaju wentylacji trudno jest uzyskać dobrą jakość powietrza, a w niektórych przypadkach można nawet pogorszyć jakość powietrza wewnętrznego, wprowadzając do pomieszczeń zanieczyszczenia i zapachy obecne na zewnątrz. W każdym przypadku okna należy otwierać przynajmniej co cztery godziny, całkowicie wymieniając całe powietrze wewnątrz budynku. Wiele budynków i mieszkań nie są dostatecznie wentylowane ze względu na fakt, że często nie jest możliwe odkrycie zależności pomiędzy jakością powietrza wewnętrznego a ilością świeżego powietrza, jaka faktycznie byłaby konieczna ze względu na komfort przy ręcznym otwieraniu okien. Należałoby założyć, że

posiadamy odpowiednie czynniki niezbędne do tego, aby wentylacja była skuteczna w momencie jej zaistnienia, czyli występuje odpowiednia prędkość wiatru i różnica temperatur pomiędzy środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym [41]. W rezultacie jakość powietrza wewnętrznego uzyskiwanego przy tego rodzaju wentylacji jest zwykle bardzo zła, co wiąże się z dużym ryzykiem wystąpienia wysokiego poziomu CO₂ i wilgotności wewnętrznej oraz możliwych zjawisk kondensacji w punktach obudowy słabszych termicznie. Odwrotne zjawisko nastąpi, jeśli pomieszczenia będą zbyt mocno wietrzone, wtedy może się zdarzyć, że w niektórych porach roku wilgotność powietrza spadnie poniżej optymalnego poziomu, a w ciepłych porach wtłacza zbyt gorące i wilgotne powietrze. W obu przypadkach skutkiem jest dyskomfort i duże zużycie energii na przywrócenie otoczenia do komfortowych warunków. Jednakże w domu pasywnym wentylacja naturalna poprzez ręczne otwieranie okien może przynieść znaczne korzyści, łączące niezawodność i efektywność wymiany realizowanej poprzez wentylację mechaniczną, zwłaszcza w przypadku wentylacji letniej i nocnej, dla których w określonych warunkach klimatycznych z energetycznego punktu widzenia można osiągnąć korzystne wyniki, które można obejść bez aktywnego systemu chłodzenia [25]. W domu pasywnym, charakteryzującym się doskonałym poziomem komfortu i wysokim poziomem szczelności, istotne jest zatem ciągłe wietrzenie pomieszczeń wewnętrznych w sposób niezawodny i energooszczędny. Konieczne jest usuwanie wilgotnego i zużytego powietrza tam, gdzie powstaje, głównie z kuchni i łazienek, ponieważ wewnętrzna wilgotność względna może szybko osiągnąć alarmowe poziomy wskaźników zdrowia i higieny w lokalizacjach, w których stosuje się centralne ogrzewanie, występują przeciągi i pęknięcia, a w szczególności w budynkach, w których jakość ciepła nie jest równomiernie rozłożona [63].

Zwiększenie szczelności w nowym budownictwie lub przy renowacji istniejącego budynku ze względów energooszczędnych (np. poprzez nałożenie taśm uszczelniających na obwód okien) z pewnością może przynieść optymistyczne rezultaty z punktu widzenia oszczędności energii, jednak ryzyko posiadania niskiej jakości i niezdrowego powietrza w pomieszczeniach wzrasta, jeśli interwencji nie towarzyszy montaż systemu wentylacji. Wentylacja mechaniczna, w związku z bardzo niskimi obciążeniami cieplnymi niezbędnymi, aby dom pasywny mógł utrzymać komfort cieplny, może również zintegrować w jeden system wewnętrzną klimatyzację i oczyszczanie, w tym filtrowanie [30] [64].

Różne systemy wentylacyjne można rozróżnić na przykład po architekturze systemu: w zależności od obecności jednej jednostki wentylacyjnej lub wielu jednostek. W przypadku budynków z wieloma mieszkaniami można go zdefiniować jako scentralizowany lub zdecentralizowany. To rozróżnienie istnieje również w przypadku pojedynczego budynku, jeśli zdecydujemy się na jedną jednostkę do wszystkich pomieszczeń lub na mniejsze urządzenia obsługujące każdy pokój/każde mieszkanie [65].

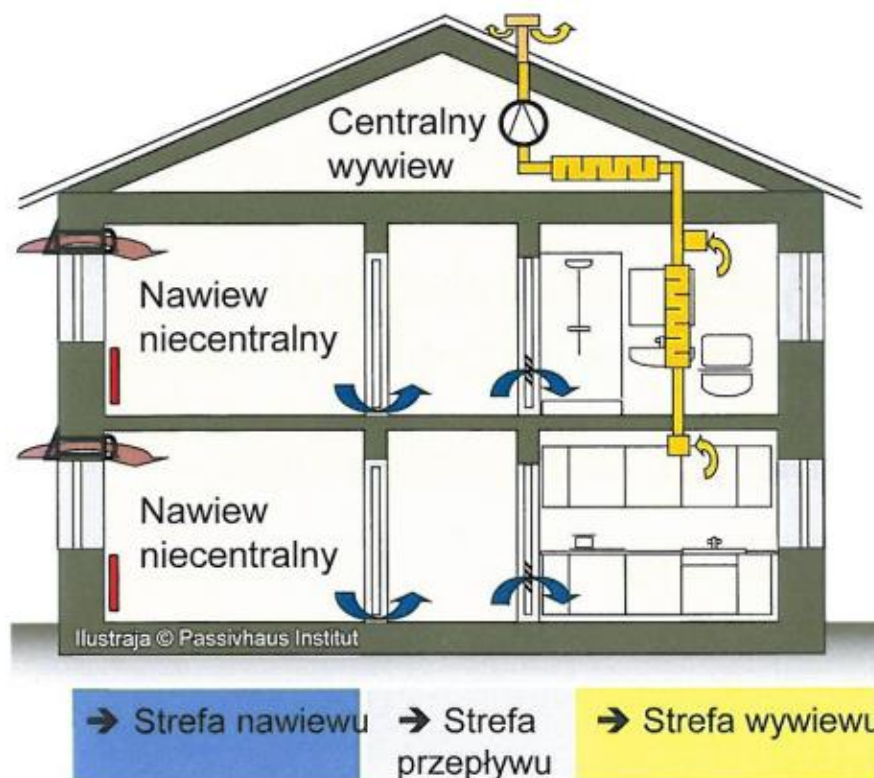
Strategia wentylacji pomieszczeń może stanowić dalsze rozróżnienie między różnymi systemami wentylacyjnymi: w celu wentylacji budynku każde pomieszczenie można wentylować indywidualnie lub można wytworzyć ukierunkowany przepływ powietrza poprzez utworzenie stref nadciśnienia i podciśnienia [54].

Często popełnianym błędem jest myślenie, że system wentylacji mechanicznej (niezależnie od typu) jest wbudowany w obudowę jako „niezależna” sieć, zapominając, że jego wydajność (higieniczna i mechaniczna), komfort akustyczny, opłacalność, zużycie energii elektrycznej oraz hałas wentylatora i łatwość konserwacji w dużej mierze zależą od jego interakcji z powłoką termiczną, a także od rozmieszczenia wewnętrznych przegród. Tylko prawidłowe rozplanowanie pomieszczeń i dokładne określenie stref wlotu, przesyłu i wyciągu może prowadzić do uzyskania prawidłowo dobranego, zrównoważonego systemu przy ograniczonej konserwacji [60].

W odniesieniu do domów pasywnych, systemy wentylacji mechanicznej można ogólnie podzielić na następujące typy:

- Wlot/wyciąg (lub podwójny przepływ) z odzyskiem ciepła: ten typ systemu jest najbardziej rozpowszechniony i odpowiedni dla wielu stref klimatycznych na całym świecie, od klimatu zimnego do cieplejszego. W polskich strefach klimatycznych system ten niewątpliwie może zagwarantować komfort i efektywność energetyczną;
- Systemy z samym wyciągiem powietrza (lub pojedynczym przepływem) bez odzysku ciepła – wentylacja wywiewna. Ważne jest, aby zawsze zapewnić punkty wlotu powietrza zewnętrznego (zwykle kratki umieszczone wysoko na ścianach obwodowych, odpowiednio wyciszone i przefiltrowane), aby zapobiec wtłaczaniu powietrza zewnętrznego przez najmniej szczelne punkty obudowy, powodując nieuniknione problemy, o których już wspomniano.

W tym układzie ważną rolę odgrywają komponenty jak centralny wentylator wywiewny ze sterowaniem, przewód powietrza wywiewanego z tłumikiem, anemostaty wywiewne, wyrzut powietrza, nawiewniki w ścianie zewnętrznej oraz otwory przepływające [57]. Na Rys. 3.9 przedstawiono schemat wentylacji wywiewnej bez pasywnego odzysku ciepła.



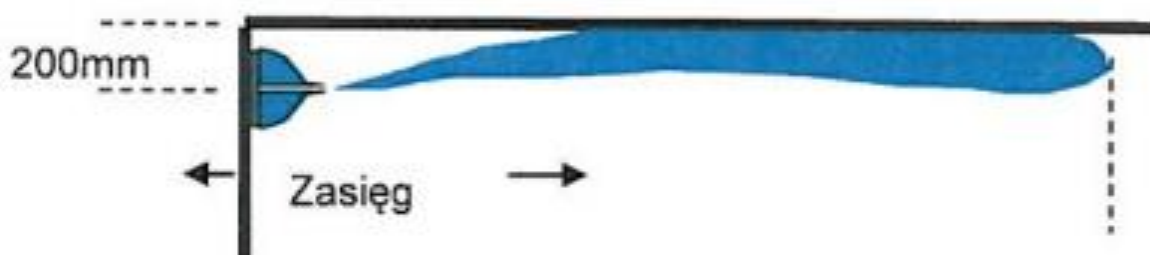
Rys. 3.9 - Wentylacja wywiewna bez pasywnego odzysku ciepła [6]

- Systemy wentylacji poszczególnych pomieszczeń z odzyskiem ciepła (wentylacja pojedyncza lub dwuciągowa) stworzone przede wszystkim w celu przezwyciężenia problemów instalacyjnych systemu podwójnego przepływu w przypadku przebudowy istniejących budynków. Ma tę zaletę, że jest łatwy w montażu i nie generuje wielkich kosztów, choć stwarza pewne strukturalne ograniczenia w efektywności odzysku ciepła, efektywności wymiany powietrza w obszarach krytycznych (takich jak łazienki i kuchnie) oraz zwiększa zużycie energii elektrycznej (przy tej samej liczbie obsługiwanych pokoi i natężeniu przepływu) w porównaniu do systemu z pojedynczym przepływem [66] [67].
- Wentylacja nawiewno - wywiewna z odzyskiem ciepła. Ten system wentylacji w budynku usuwa bezpośrednio zużyte powietrze z kuchni, łazienki i innych pomieszczeń, w których mogą tworzyć się nieprzyjemne zapachy [68]. Ciepło zawarte w tym powietrzu, jeśli jest to dogodne

energetycznie, wykorzystywane jest do wstępnego podgrzania powietrza regeneracyjnego napływającego z zewnątrz i wprowadzanego do pomieszczeń mieszkalnych i sypialni [69].

W zależności od wydajności wymiennika ciepła, od 75% aż do 95% energii cieplnej z powietrza wywiewanego może zostać przekazane do powietrza nawiewanego. Wysokiej jakości systemy gwarantują jakość wyciągu, a powietrze wprowadzane do wymiennika ciepła jest hermetyczne, dzięki czemu nie dochodzi do zanieczyszczeń pomiędzy powietrzem wywiewanym a powietrzem świeżym. Systemy kontrolowanej wentylacji mechanicznej dla domów pasywnych muszą także charakteryzować się ograniczonym poborem energii elektrycznej i być zaprojektowane tak, aby zapewnić cichą pracę, jeśli są instalowane w pomieszczeniach mieszkalnych [70].

Dla każdego z wymienionych powyżej siedmiu komponentów istnieje wiele produktów różniących się konstrukcyjnie i technologicznie. W szczególności jednostka centralna może posiadać rekuperatory statyczne, obrotowe lub regeneracyjne, które integrują nie tylko w odzysk ciepła jawnego, ale także odzysk ciepła utajonego zawartego w wilgoci zawartej w wywiewanym powietrzu. Kanały wewnętrzne mogą różnić się kształtem i materiałem, a także mogą mieć inną strukturę dystrybucji. Nawiewniki, w zależności od ich położenia, mogą różnić się rodzajem regulacji przepływu i być prostymi kratkami lub nawiewnikami, w których można wykorzystać efekt Coandy, tj. zjawiska fizycznego, w którym strumień gazu ma tendencję do przylegania do najbliższej powierzchni. Na Rys. 3.10 przedstawiono zjawisko Coandy.



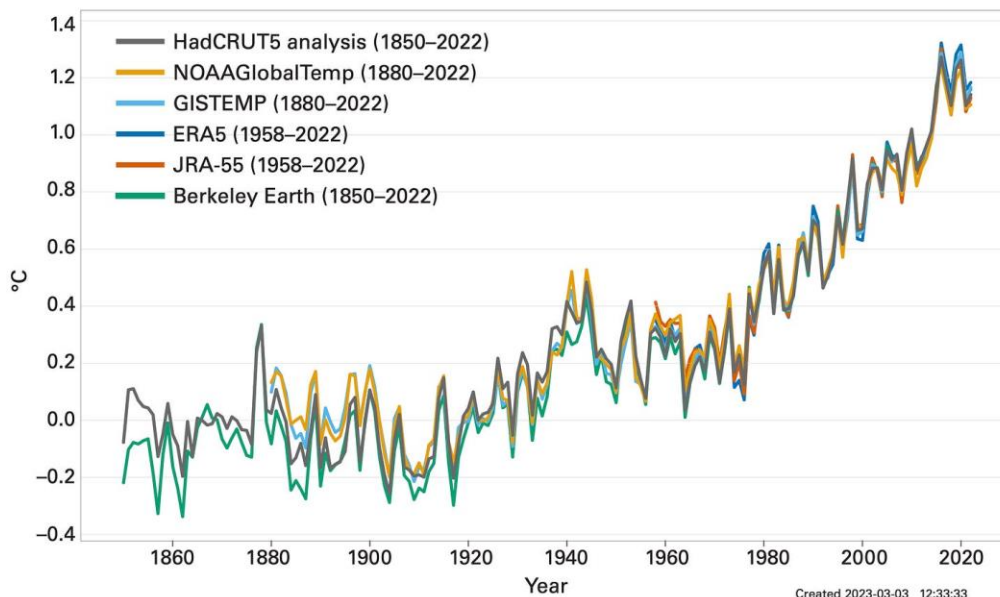
Rys. 3.10 - Zjawisko Coandy wykorzystane przez powietrze nawiewane z anemostatu [44]

Otwory wentylacyjne mogą różnić się kształtem, rodzajem regulacji oraz obecnością lub brakiem filtra: elementami przepuszczającymi powietrze mogą być proste kratki (wyciszone lub nie), szczeliny pod drzwiami przyłączeniowymi pomieszczeń (gwarantowane 15-20 mm do 40 m³/h przepływu) lub elementy przelotowe wkładane w opaski samych drzwi, a także kanały nawiewu powietrza zewnętrznego i wyrzutu powietrza wywiewanego, w zależności od tego, czy maszyna jest umieszczona wewnątrz, czy na zewnątrz przegrody termicznej. Mogą także różnić się między sobą grubością i rodzajem izolacji, materiałem oraz rodzajem kratki zewnętrznej dla pierwszego filtrowania powietrza zewnętrznego. Wreszcie mogą występować inne różnice w architekturze całego systemu, szczególnie w budynku z wieloma lokalami mieszkalnymi lub w budynku niemieszkalnym, takim jak szkoły lub biura, w których system wymaga dokładniejszych regulacji ze względu na nieregularną obecność użytkowników [71].

3.3. Wpływ zmian klimatu na budynek

Badania i pomiary czynników klimatycznych przeprowadzone w różnych częściach świata dowodzą, że klimat zdecydowanie się ociepla, a wzrostowa tendencja wysokości temperatury nabiera coraz większego rozpędu. Wzrost temperatury na świecie sprzyja wzrostowi intensywności i częstotliwości zjawisk klimatycznych oraz szeregu instrumentów pochodnych, które nie są obojętne na rozwój gospodarczy i społeczny świata. Dodatkowo mogą one prowadzić do coraz częstszego występowania anomalii pogodowych takich jak powódź, susza czy tornada. Ponadto, wynikiem globalnego wzrostu średniej temperatury powietrza i oceanów jest powszechne topnienie lodowców, które natomiast prowadzi do wzrostu średniego poziomu morza. Intensywność wzrostu temperatury jest zróżnicowana przestrzennie i charakteryzuje się większym natężeniem w wyższych szerokościach półkuli północnej. Globalny trend ocieplenia klimatu sprzyja rozszerzaniu się obszarów dotkniętych suszą, ale także zwiększa częstotliwość ekstremalnych opadów na innych obszarach. Niezależnie od tego, czy przyczyną tego trendu jest działalność człowieka, czy naturalna zmienność, dowody wskazują, że odczyty termometru ludzi na całym świecie stale rosną od początku rewolucji przemysłowej. Poza lokalnymi obserwacjami są także dane i one nie pozostawiają złudzeń. Według raportów Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC), przy obecnym poziomie emisji gazów cieplarnianych, możliwości ograniczenia ocieplania się klimatu szybko się kurczą. Obecnie znajdujemy się na

poziomie ocieplenia powierzchni Ziemi o $1,2^{\circ}\text{C}$ w porównaniu do czasów przedprzemysłowych (1850-1900). Celem nadrzędnym Porozumienia Paryskiego było ograniczenie ocieplenia do $1,5^{\circ}\text{C}$ i osiągnięcie neutralności klimatycznej w 2050 r. Żeby zbliżyć się do tego celu, musimy ograniczyć globalne emisje gazów cieplarnianych o 43% do 2030 r. [72] Na Rys. 3.11 przedstawiono średnie zmiany temperatury powierzchni Ziemi od ok. 1850 r.



Rys. 3.11 - Średnie zmiany temperatury powierzchni Ziemi od 1850 roku [136]

3.3.1. Europejski zielony ład

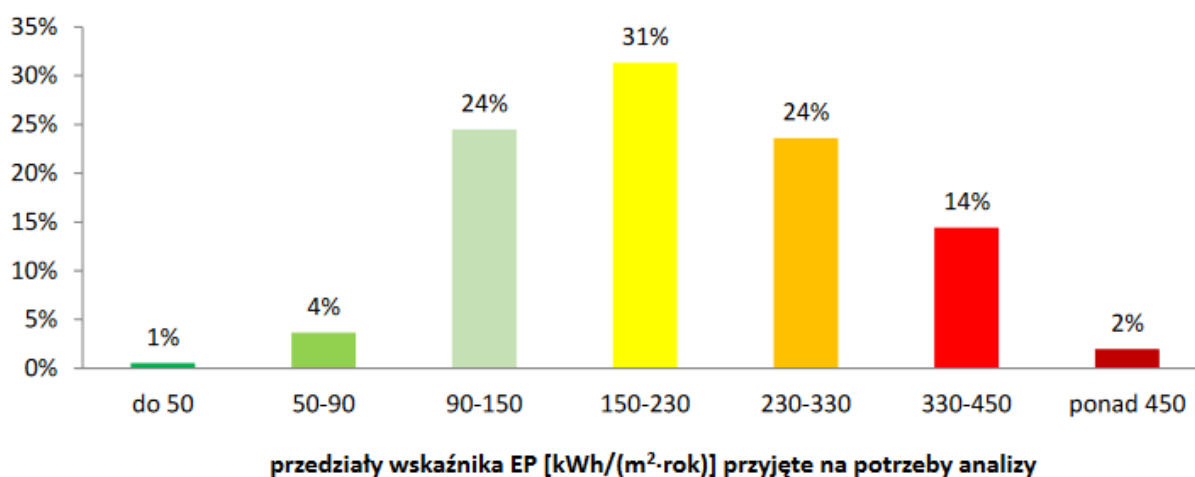
Jest to pakiet inicjatyw politycznych, zainicjowany przez Komisję Europejską w grudniu 2019 r. Celem tego pakietu jest skierowanie Unii Europejskiej na drogę do transformacji energetycznej, co ma skutkować osiągnięciem neutralności klimatycznej do 2050 r. Główną konkluzją Rady Europejskiej z dnia 12 grudnia 2019 r. było stwierdzenie, iż transformacja energetyczna w drodze do neutralności klimatycznej otworzy istotne możliwości w zakresie wzrostu gospodarczej, powstawaniu nowych modeli biznesowych i rynków, tworzeniu dodatkowych miejsc pracy i rozwoju technologicznego.

Jedną z inicjatyw „zielonego ładu” jest pakiet „Fit for 55” (z ang. „Gotowi na 55”), który ma wyklarować ambicje na konkretne przepisy. Państwa członkowskie Unii Europejskiej, które przyjęły ten akt zobowiązały się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55% do 2030 r. w odniesieniu do poziomu z 1990 r. Cel ten jest dla krajów UE prawnie wiążący [20].

3.3.2. Emisje i charakterystyka energetyczna budynków

Zgodnie ze sprawozdaniem Międzynarodowej Agencji Energetycznej, to właśnie budynki odpowiadają obecnie za 33% światowych emisji CO₂. Większość tych emisji wynika bezpośrednio i pośrednio z eksploatacji budynków, a 6,4% (dane z 2021 r.) – z budowy i produkcji materiałów budowlanych. Te wartości mogą się nieznacznie różnić między sobą w zależności od źródła i regionu, którego dotyczą, ale wskazują jedno – to właśnie w dużej mierze od branży budowlanej zależy wynik walki o ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a co za tym idzie o zatrzymanie ocieplania się klimatu [73].

Kluczowym aspektem w tej batalii staje się ograniczenie spalania paliw kopalnych, gdzie w przypadku budynków w znaczącym stopniu jest ono wykorzystywane do wytwarzania energii do ogrzewania budynku. Działanie powinno odbywać się dwutorowo – w pierwszej kolejności naszym celem powinno być zmniejszenie zapotrzebowania na energię istniejących już budynków. Według danych Krajowej Agencji Poszanowania Energii, wynika, że ponad 70% istniejących budynków charakteryzuje się wskaźnikiem wyższym niż 150 kWh/(m²rok), co jest uznawane za budynek nieefektywny energetycznie. Według aktualnych Warunków Technicznych dla nowych budynków wartość ta oscyluje wokół 70 kWh/(m²rok) w zależności od przeznaczenia budynku [137]. Na Rys. 3.12 przedstawiono rozkład budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej według przedziałów efektywności energetycznej budynków.

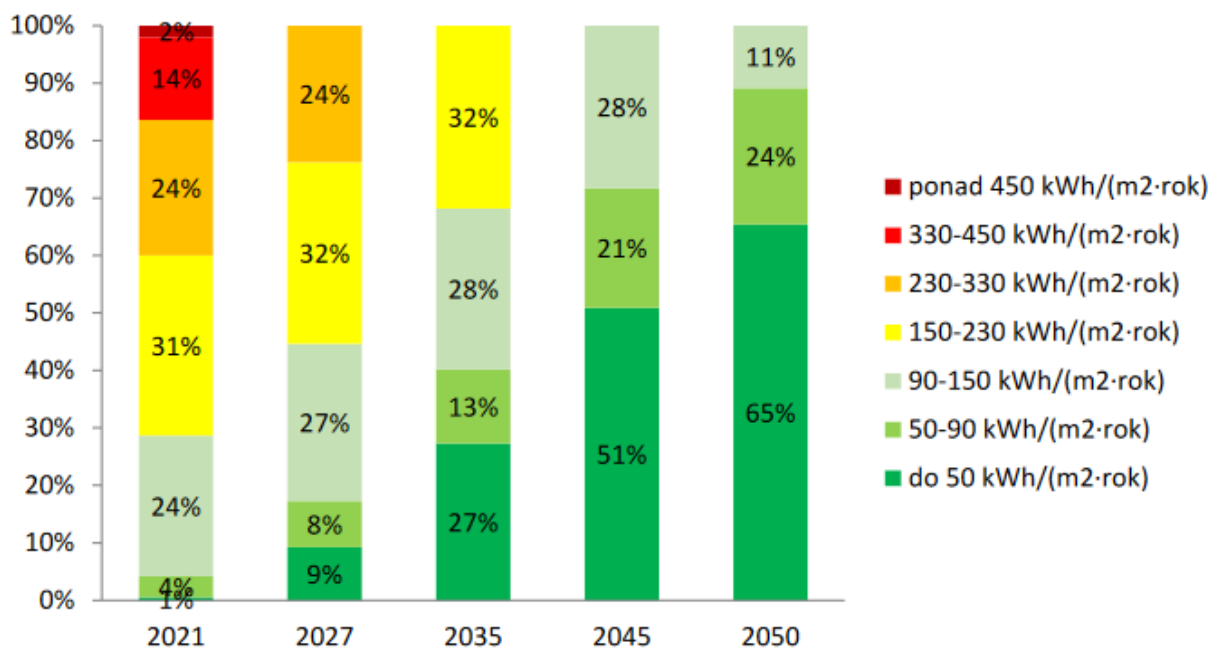


Rys. 3.12 - Rozkład budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej według przedziałów efektywności energetycznej budynków [137]

Jak pokazuje powyższy wykres, większość z nas mieszka w budynkach nieefektywnych energetycznie, które są pochłaniaczami ciepła i wymagają

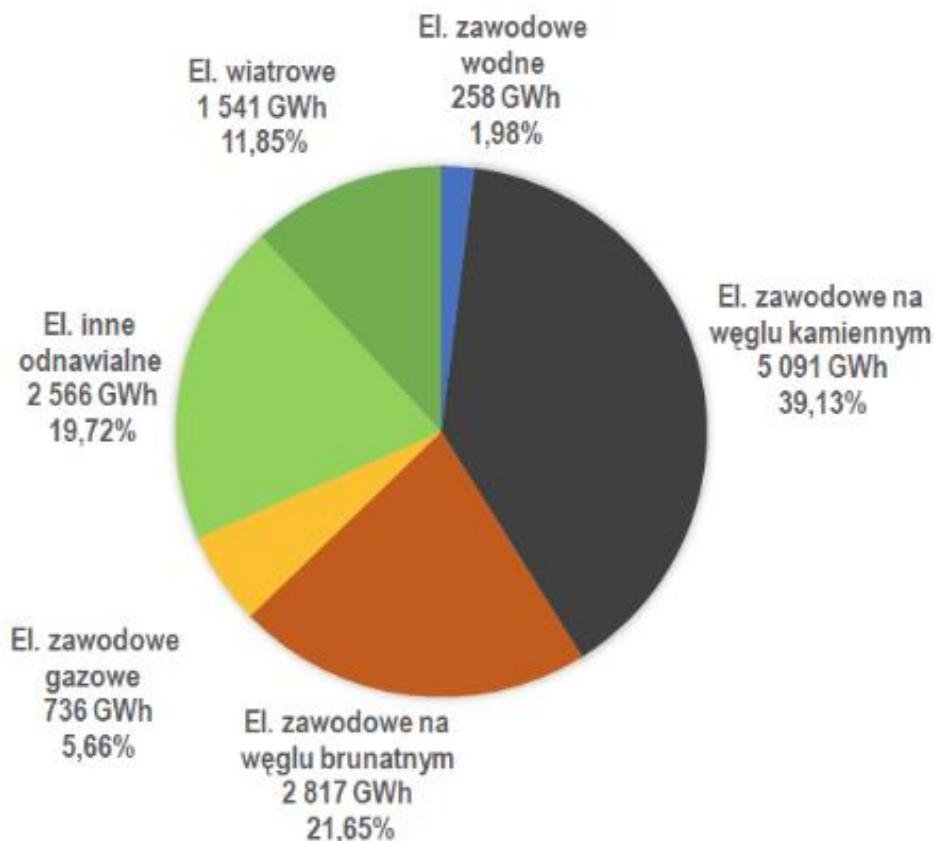
częstego dogrzewania. Termomodernizacja to potężne wyzwania, przed którym stanie branża i dotyczy to wszystkich zaangażowanych podmiotów. Zarówno wykonawców, którzy będą zmuszeni do rozszerzenia swojej oferty lub specjalizacji, a także inwestorów prywatnych i tych publicznych. Warto tu nadmienić o najnowszej Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej. W celu kontynuowania wysiłków na rzecz ograniczenia wzrostu temperatury do 1,5°C w art.6 niniejszej Dyrektywy, nadano wzorcową rolę budynków instytucji publicznych. Każde państwo członkowskie UE ma zapewnić, aby co najmniej 3% całkowitej powierzchni ogrzewanych lub chłodzonych budynków, które są własnością instytucji publicznych, było poddawane co roku renowacji w celu przekształcenia ich co najmniej w budynki o niemal zerowym zużyciu energii lub w budynki zeroemisyjne zgodnie z art. 9 Dyrektywy 2010/31/UE. Należy wspomnieć, że państwa członkowskie mogą zdecydować, które budynki powinny podlegać 3-procentowemu wymogowi renowacji, przy czym przy wyborze budynków do renowacji powinny należycie uwzględnić opłacalność i wykonalność techniczną. Pomimo istniejącego trendu i zwiększającej się świadomości społecznej i rynkowej w zakresie działań ESG, zmian klimatycznych i transformacji energetycznej, nie mieliśmy do tej pory tak konkretnych wytycznych, co do budynków instytucji publicznych.

Zgodnie z rekomendacją UE, przyjęto w Polsce 3 scenariusze renowacji budynków, który określa plan działań do 2050 r. W najbardziej ambitnym planie szybkiej i głębokiej termomodernizacji założono, że rozpocznie się ona od budynków charakteryzujących się najmniejszą efektywnością energetyczną, a średnie roczne tempo termomodernizacji wyniesie ok. 3%, co pokrywa się także z założeniem dotyczącym budynków instytucji publicznych [137].



Rys. 3.13 - Rozkład budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej w poszczególnych okresach według wskaźnika Energii Pierwotnej wyrażonego w kWh/(m²rok) [137]

Drugim znaczącym krokiem w drodze do neutralności klimatycznej w kontekście budynków jest transformacja energetyczna. Według stanu na maj 2024 r., co zostało przedstawione na Rys. 3.14, dominującym źródłem energii w Polsce jest węgiel, którego sumaryczny udział w produkcji energii elektrycznej stanowi 60,78%. OZE to natomiast 33,55%. Na przestrzeni ostatnich lat tendencja ta zmierza w stronę ograniczania udziału węgla (w 2010 r. węgiel stanowił 88% miks) i coraz większego wykorzystania OZE, co ma skutkować w 2040 r. osiągnięciem 51% udziału OZE w produkcji energii.



Rys. 3.14 - Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce [145]

W kontekście budownictwa ważnym aspektem są rosnące potrzeby chłodzenia w okresach letnich. Obecnie około 80% Polski jest obszarem wymagającym chłodzenia budynków przez okres ponad 21 dni, a duża część nawet ponad 40 dni w roku. Przykładowo, w 1980 r. w Warszawie odnotowano 11 dni w roku z temperaturą powyżej 32°C, podczas gdy w 2018 r. liczba ta wzrosła do 23 dni [137]. We Wrocławiu odnotowano wzrost z 5 do 11 dni w tych samych latach. Bez wątpienia wiele budynków w Polsce nie spełnia wymagań w zakresie komfortu cieplnego i ten problem będzie narastał, jeśli budynki nie będą modernizowane i wyposażone także w instalacje chłodzące.

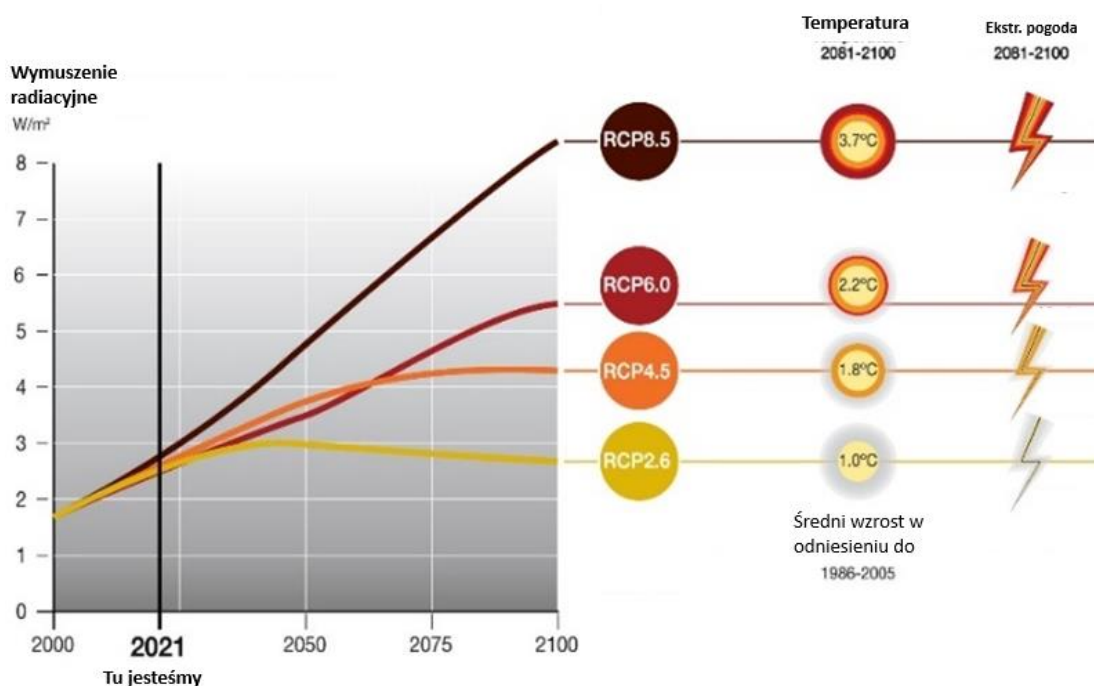
3.3.3. Scenariusze zmian klimatu według IPCC

Na wykresach przedstawiających dane prognozowane w latach 2030 i 2050 przedstawiono wyniki dla dwóch scenariuszy RCP (z ang. Representative Concentration Pathways), które dotyczą zmian koncentracji dwutlenku węgla CO₂ w atmosferze w XXI wieku -

Rys. 3.15. Oznaczenie dla każdego scenariusza odpowiada dodatkowemu wymuszeniu radiacyjnemu w 2100 w porównaniu z warunkami przedindustrialnymi. Na przykład w przypadku RCP 4.5 byłoby to dodatkowe 4,5 W/m² wymuszenie radiacyjne w 2100 r., a dla RCP 8.5 dodatkowe 8,5 W/m². Owe scenariusze zostały opracowane przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) jako podstawa prognoz klimatycznych [32]. Na podstawie przyjętych wartości koncentracji gazów cieplarnianych opracowano modele klimatu dla kolejnych lat. Zróżnicowane stężenie gazów definiuje także różne scenariusze emisji, a co za tym idzie także zmiany społeczno – gospodarcze.

Niewątpliwie najbardziej pesymistycznym obrazem zmian klimatu rozważanych przez IPCC jest scenariusz RCP 8.5 nazywany „biznes jak zwykle”. Przyjęto w nim założenia ekstremalne, aczkolwiek prawdopodobne, które stanowią punkt odniesienia do najgorszej możliwej prognozy klimatu. Na

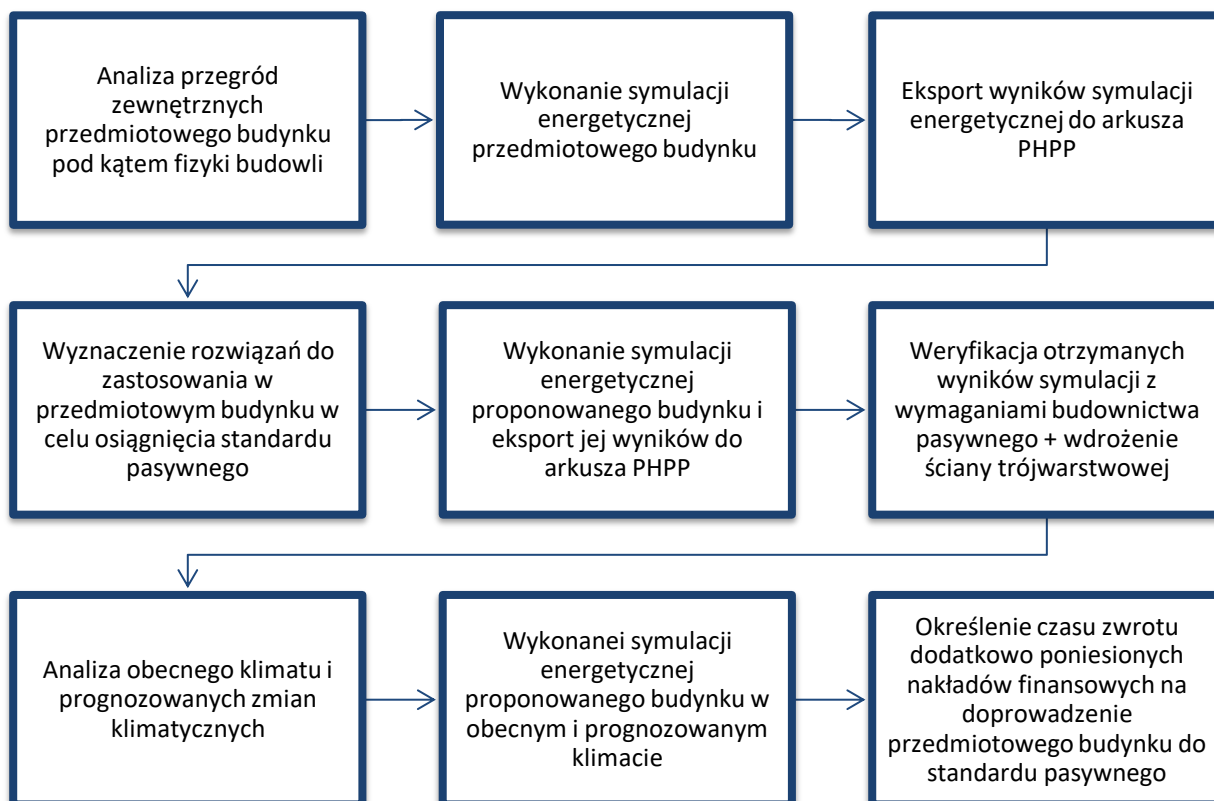
Rys. 3.15 przedstawiono wykresy scenariuszy zmian koncentracji węgla RCP.



Rys. 3.15 - Wykresy przedstawiające scenariusze zmian koncentracji węgla RCP [152]

4. Zakres badań własnych

Zakres badań własnych został przedstawiony na Rys. 4.1 w postaci grafu pokazującego poszczególne etapy badań. Każdy z etapów został następnie opisany celem uszczegółowienia i doprecyzowania wskazanego zakresu.



Rys. 4.1 – Graf przedstawiający zakres badań własnych

4.1.1. Etap 1 - Analiza przegród zewnętrznych przedmiotowego budynku pod kątem fizyki budowli

W pierwszej kolejności analizie poddane zostały podstawowe parametry fizyki budowli. Do wyznaczenia pierwszego parametru – współczynnika przewodzenia ciepła posłużono się metodą ustalonego strumienia cieplnego, którą stosuje się w badaniach certyfikujących wyroby budowlane. Do wyznaczenia współczynnika λ wykorzystano aparat płytowy FOX314 z osłoniętą płytą grzejącą, przedstawiony na Rys. 4.2. Procedura pomiarowa została przeprowadzona zgodnie z wymaganiami normowymi zawartymi w normie PN-EN 12667:2002 [131]. Współczynnik przewodzenia ciepła λ został zmierzony dla próbki o średniej

temperaturze 10°C. Pełne stanowisko badawcze stanowił aparat płytowy (FOX314), chłodziarka, laptop oraz waga laboratoryjna i suwmiarka elektroniczna. Pomiar przewodności cieplnej materiałów betonowych został wykonany z dokładnością do 2%.



Rys. 4.2 – Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejącą

Źródło: [Materiały własne]

Do badania przygotowano 12 próbek w postaci płyt betonowych o przekroju kwadratowym o wymiarach 300mm x 300 mm oraz grubości 30 mm. Na Rys. 4.3 pokazano pierwsze 3 próbki płyt betonowych, natomiast na Rys. 4.4 przedstawiono 9 kolejnych próbek wykorzystanych do badania.



Rys. 4.3 – 3 z 12 płyt betonowych o wymiarach 300mm x 300 mm x 3 mm, przeznaczonych do badania



Rys. 4.4 - 9 z 12 płyt betonowych o wymiarach 300mm x 300 mm x 3 mm, przeznaczonych do badania

W celu wykazania, że liczba próbek i liczba otrzymanych wyników jest wystarczająca, dokonano sprawdzenia zgodności rozkładu danych wykonując test Shapiro – Wilka.

4.1.2. Etap 2 - Wykonanie symulacji energetycznej przedmiotowego budynku

W kolejnym etapie wykonano model przedmiotowego budynku. Ściany tego budynku zostały wykonane z prefabrykatów w postaci ścian trójwarstwowych z termoizolacją wewnątrz w postaci płyty PIR. Model tego budynku został wykonany w oprogramowaniu SketchUp, który służy do projektowania i modelowania trójwymiarowego [39]. O wyborze tego oprogramowania zdecydowała możliwość wykorzystania w nim wtyczki DesignPH, która daje możliwość wykonania symulacji energetycznej programie SketchUp. Wskazane rozwiązanie jest rekomendowane projektantom budynków pasywnych przez Passivhaus Institut w Darmstadt, który jest ważnym ośrodkiem badawczym w zakresie budownictwa pasywnego, a także głównym certyfikatorem komponentów dedykowanych dla budynków w tym standardzie. Na Rys. 4.5 przedstawiono grafikę reklamującą użycie wtyczki DesignPH przez Passivhaus Institut.



Rys. 4.5 - Grafika reklamująca wtyczkę DesignPH [144]

Warto podkreślić, że dzięki wtyczce DesignPH, budynek i jego otoczenie można w pełni zdefiniować zadając odpowiednią lokalizację, definiując materiał poszczególnych warstw przegród budynku, określając zastosowanie instalacji wewnątrz budynku i czas ich działania. Tak zdefiniowany i zamodelowany budynek został poddany symulacji energetycznej i otrzymano wyniki zapotrzebowania na energię użytkową w zakresie ogrzewania, chłodzenia, wentylacji i oświetlenia. Całość tych działań została wykonana dla przedmiotowego budynku.

4.1.3. Etap 3 – Eksport wyników symulacji energetycznej do arkusza PHPP

Otrzymane wyniki zostały następnie wyeksportowane do arkusza kompatybilnego z wtyczką DesignPH i programem SketchUp, a mianowicie do arkusza PHPP. Jest to arkusz Excel, który po zaimplementowaniu wyników symulacyjnych, weryfikuje je w zakresie wymagań standardu budownictwa pasywnego, m.in. w kontekście zużycia energii użytkowej, współczynników przenikania ciepła przegród czy szczelności bryły.

4.1.4. Etap 4 – Wyznaczenie rozwiązań do zastosowania w przedmiotowym budynku w celu osiągnięcia standardu pasywnego

Na podstawie otrzymanych wyników i ich relacji względem wymogów budownictwa pasywnego, tj.:

- zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{rok})$
lub obciążenie cieplne budynku $\leq 10 \text{ W}/\text{m}^2$,
- zapotrzebowania na energię użytkową do chłodzenia $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{rok})$,
- zapotrzebowanie na energię pierwotną $\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{rok})$,
- szczelność powietrzna budynku $\leq 0,6/\text{h}^{-1}$ (przy różnicy ciśnień 50 Pa),
- częstość występowania nadmiernych temperatur $\leq 10\%$,

oraz współczynnika przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych określonych w Tabeli 4.1 wyznaczono zakres rozwiązań w celu osiągnięcia powyższych wymagań.

Tabela 4.1 – Minimalne wartości współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych w budynku pasywnym

Rodzaj przegrody	Współczynnik przenikania ciepła U_c [$\text{W}/(\text{m}^2\text{rok})$]
Dach	$\leq 0,15$
Okna	$\leq 0,80$
Ściana zewnętrzna	$\leq 0,15$
Płyta fundamentowa	$\leq 0,15$

4.1.5. Etap 5 – Wykonanie symulacji energetycznej proponowanego budynku i eksport jej wyników do arkusza PHPP

W następnym kroku do modelu zostają wdrożone modyfikacje wyznaczone w etapie 4 i wykonana zostaje symulacja energetyczna proponowanego budynku, a wyniki tej symulacji zostały eksportowane do arkusza kalkulacyjnego PHPP.

4.1.6. Etap 6 – Weryfikacja otrzymanych wyników symulacji energetycznej z wymaganiami budownictwa pasywnego

W kolejnym etapie zweryfikowano i sprawdzono czy otrzymane wyniki symulacji energetycznej proponowanego budynku spełniają wszystkie wymagania budownictwa pasywnego oraz sprawdzono możliwość wdrożenia ściany trójwarstwowej ze zwiększoną izolacją termiczną, spełniającą wymagania budownictwa pasywnego.

4.1.7. Etap 7 – Analiza obecnego klimatu i prognozowanych zmian klimatycznych

Badania obecnego klimatu w różnych regionach Polski przeprowadzono w oparciu o dane klimatyczne dostępne dla czterech różnych lokalizacji:

- Wrocławia,
- Suwałk,
- Zakopanego,
- Warszawy.

Dla ww. lokalizacji porównano następujące parametry:

- średnią miesięczną temperaturę,
- średniego miesięcznego promieniowania rozproszonego,
- średnią miesięczną prędkość wiatru.

Badania analizy zmian klimatu zostały przeprowadzone dla miasta Wrocławia w oparciu o dane klimatyczne dla stacji meteorologicznej Wrocław-Strachowice. Do wyznaczenia prognozowanych zmian czynników

klimatotwórczych wykorzystano program Meteonorm, który posługuje się scenariuszami zmian koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze, które są określane jako scenariusze RCP (z ang. Representative Concentration Pathways). Porównano następujące czynniki klimatotwórcze:

- średnia miesięczna temperatura otoczenia,
- średnia miesięczna temperatura punktu rosy,
- średnie miesięczne całkowite promieniowanie słoneczne.

4.1.8. Etap 8 – Wykonanie symulacji energetycznej proponowanego budynku w obecnym i prognozowanym klimacie

W kolejnym etapie dokonano sprawdzenia jak będzie zachowywał się proponowany budynek o standardzie pasywnym w różnych klimatach Polski, a także w prognozowanym klimacie określonym dla miasta Wrocławia. Uzyskano dzięki temu odpowiedź czy proponowany budynek dalej będzie spełniał wymogi budownictwa pasywnego w innym otoczeniu klimatycznym.

4.1.9. Etap 9 – Określenie czasu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na doprowadzenie przedmiotowego budynku do standardu pasywnego

W ostatnim etapie zbadano aspekt finansowy i zgodnie ze standardem kosztorysowym, porównano koszty potrzebne do wybudowania przedmiotowego budynku oraz proponowanego budynku w standardzie pasywnym. Następnie określono możliwe do osiągnięcia oszczędności w proponowanym budynku, dzięki zmniejszonemu zapotrzebowaniu na ogrzewanie oraz wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Dzięki temu zabiegowi, wyznaczono prognozowany czas zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na doprowadzenie przedmiotowego budynku do standardu pasywnego.

5. Wyniki badań i ich analiza

5.1. Analiza podstawowych parametrów fizyki budowli

W niniejszej części przedstawiono wyniki badań, będących częścią analizy parametrów fizyki budowli materiałów oraz przegród występujących w badanym obiekcie. W pierwszej kolejności dokonano wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła λ metodą ustalonego strumienia cieplnego przy wykorzystaniu aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną. Parametr ten określono dla warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej ściany zewnętrznej, którą stanowi ściana trójwarstwowa prefabrykowana produkcji firmy Betard. Następnie określono współczynnik przenikania ciepła wszystkich zewnętrznych warstw budynku, z zaznaczeniem, że pozostałe warstwy nie stanowiły przedmiotu produkcji firmy Betard, ale ze względu na konieczność sprawdzenia całego budynku pod względem kryteriów budynku pasywnego, dokonano także wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła pozostałych przegród. Dla ściany trójwarstwowej prefabrykowanej wyznaczono wartość współczynnika U zarówno z wykorzystaniem wartości λ otrzymanej w badaniu metodą ustalonego strumienia cieplnego, jak i wartości z tablic materiałowych producenta $\lambda = 1,7$ W/mK. W następnym kroku przebadano mostki termiczne występujące w miejscach braku ciągłości izolacji termicznej budynku. W ostatnim etapie analizy parametrów fizyki budowli dokonano sprawdzenia właściwości cieplno – wilgotnościowych przegrody trójwarstwowej prefabrykowanej przy wykorzystaniu kalkulatora Termo.

5.1.1. Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła λ metodą ustalonego strumienia cieplnego

W wyniku przeprowadzonego badania wykonanego w aparacie płytowym z osłoniętą płytą grzejną, otrzymano 17 wyników zebranych w formie Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Wyniki odczytanych pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła λ

Numer badania	Numer próbki	Temperatura dolnej płyty grzejnej [°C]	Temperatura górnej płyty grzejnej [°C]	Odczytany współczynnik λ [W/mK]
1	1	13	8	0,52286
2	1	13	8	0,51959
3	2	13	8	0,5754
4	3	13	8	0,52582
5	3	15	5	0,52223
6	3	18	3	0,519
7	3	20	0	0,44057
8	4	18	3	0,45025
9	5	18	3	0,52887
10	6	18	3	0,4143
11	7	18	3	0,4372
12	8	18	3	0,3406
13	9	18	3	0,42879
14	10	18	3	0,40012
15	11	18	3	0,37042
16	11	18	3	0,36453
17	12	18	3	0,45967
Średnia arytmetyczna λ				0,46001

Zanim określono wartość deklarowaną współczynnika przewodzenia ciepła, sprawdzono czy liczba otrzymanych siedemnastu wyników dla dwunastu przebadanych próbek jest wystarczająca. Dokonano tego sprawdzając zgodność rozkładu danych z założeniami testów statystycznych, wykonując test Shapiro-Wilka. Test ten jest przeznaczony do sprawdzenia normalności rozkładu zmiennej losowej. W pierwszej kolejności należy zdefiniować hipotezę zerową oraz alternatywną, które brzmią następująco:

- H_0 : Rozkład badanej cechy jest rozkładem normalnym,
- H_1 : Rozkład badanej cechy nie jest rozkładem normalnym.

Wzór na test normalności rozkładu Shapiro – Wilka ma następującą postać:

$$W = \frac{[\sum_i a_i(n)(X_{n-i+1} - X_i)]^2}{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \quad (5.1)$$

gdzie:

W – wynik testu Shapiro – Wilka

$a_i(n)$ – współczynnik Shapiro – Wilka odczytywany z tablic

$X_{n-i+1} - X_i$ – różnica między skrajnymi obserwacjami, przy czym $i=1$ to różnica między minimalną i maksymalną wartością

j – kolejne obserwacje w próbie

i – kolejne różnice między skrajnymi obserwacjami

\bar{X} – średnia arytmetyczna

Wyliczona wartość W przy użyciu kalkulatora naukowego „SciStatCalc” wyniosła:

W = 0,937

Z tablic rozkładu Shapiro-Wilka odczytano wartość krytyczną W^* dla przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$ przy 17 otrzymanych wynikach. Odczytana wartość krytyczna wynosi $W^* = 0,892$.

Następnie porównano i stwierdzono, że $W \geq W^*$, dzięki czemu nie ma podstaw, by odrzucić hipotezę zerową H_0 . Dowodzi to, że rozkład odchyłeń losowych jest rozkładem normalnym, a liczba otrzymanych wyników jest wystarczająca.

Na podstawie otrzymanych wartości w Tabela 5.1 dokonano procesu określenia wartości deklarowanej współczynnika przewodzenia ciepła. Wartość deklarowana cechy stanowi wartość oczekiwaną w generalnej populacji wyrobu i została wyznaczona na podstawie wyników pomiarów i określonej frakcji populacji przy zadanym poziomie ufności. Metoda ta opiera się na założeniu, że rozkład cechy, którą jest przewodność cieplna, jest rozkładem normalnym i może ona zostać obliczona w oparciu o średnią arytmetyczną i oczekiwanego odchylenia standardowego n danych [53].

Oczekiwana przewodność cieplna

$$\lambda_{es} = \lambda_m \pm k_2 s_\lambda \quad (5.2)$$

gdzie: λ_m – średnia arytmetyczna wyników pomiarów,

s_λ – odchylenie średnie w próbie,

k_1 i k_2 – odpowiednie współczynniki uzależnione od:

- Wymaganej frakcji p ,
- Wymaganego poziomu ufności, $1-\alpha$,
- Liczebności próby, n .

Wartość λ_m stanowi średnią arytmetyczną odczytanych pomiarów i wynosi **0,46001 W/mK**.

Wartość średniego odchylenia w próbie określono na podstawie wzoru:

$$s_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_m - \lambda_i)^2}{n-1}} \quad (5.3)$$

gdzie λ_i stanowi wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla i -tego elementu próby. W Tabeli 5.2, kolumna po kolumnie, przedstawiono cały proces obliczeniowy wartości średniego odchylenia w próbie.

Tabela 5.2 – Kalkulacja wartości średniego odchylenia w próbie

λ_i [W/mK]	λ_m	$\lambda_m - \lambda_i$	$(\lambda_m - \lambda_i)^2$	$\sum_{i=1}^n (\lambda_m - \lambda_i)^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_m - \lambda_i)^2}{17-1}$	s_λ
0,52286	0,46001	0,06285	0,00395	0,07628	0,00477	0,06905
0,51959		0,05958	0,00355			
0,5754		0,11539	0,01331			
0,52582		0,06581	0,00433			
0,52223		0,06222	0,00387			
0,519		0,05899	0,00348			
0,44057		-0,01944	0,00038			
0,45025		-0,00976	0,00010			
0,52887		0,06886	0,00474			
0,4143		-0,04571	0,00209			
0,4372		-0,02281	0,00052			
0,3406		-0,11941	0,01426			
0,42879		-0,03122	0,00097			
0,40012		-0,05989	0,00359			
0,37042		-0,08959	0,00803			
0,36453		-0,09548	0,00912			
0,45967		-0,00034	0,00000			

Na podstawie obliczeń pokazanych w powyższej tabeli, wartość $s_\lambda = 0,06905$ W/mK.

Zgodnie z normą PN-ISO 10456:2009 (Załącznik B) „wartość deklarowana powinna być 90% kwantylem przy 90% ufności.” W tabeli C.1 niniejszej normy podano współczynnik k_2 dla 90% przedziału ufności statystycznej tolerancji o wartości 50% i 90%. Zgodnie z tą tabelą dla 17 wyników, współczynnik dla jednostronnych przedziałów tolerancji **$k_2=1,82$** .

Wartość oczekiwanej przewodności cieplnej wynosi:

$$\lambda_{es} = 0,46001 \pm 0,06905 \times 1,82$$

$$0,33435 \leq \lambda_{es} \leq 0,58568 \text{ W/(mK)}.$$

Aby otrzymać wartość deklarowaną, należy górną granicę przedziału ufności zaokrąglić w górę do najbliższej trzeciej cyfry po przecinku.

Zgodnie z regułą zaokrąglania, jeśli $0,20 < \lambda \leq 2,00$, to zaokrąglenie następuje w górę z dokładnością do 0,01 W/(mK). Zatem wartość λ_{es} po zaokrągleniu wynosi **0,59 W/(mK)**.

Uzyskana wartość jest wartością bardzo korzystną w zakresie izolacyjności termicznej warstw konstrukcyjnych. Producent (firma Betard) w swoich własnych kalkulacjach przyjmuje wartość współczynnika przewodzenia ciepła jak dla żelbetu, tj. $\lambda=1,7$ W/(mK). W dalszych badaniach rozpatrywane będą obie wartości.

5.1.2. Wyznaczenie oporu cieplnego R

Poniżej w Tabeli 5.3 przedstawiono kalkulację oporu cieplnego warstw wraz z wyliczoną wartością sumy oporu cieplnego warstw przegrody.

Tabela 5.3 – kalkulacja oporu cieplnego warstw ściany trójwarstwowej

Rodzaj warstwy	Grubość warstwy [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/mK]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ - otrzymane w badaniach [W/mK]	Obliczony opór cieplny warstw R [m ² K/W]	Obliczony opór cieplny warstw R [m ² K/W]
[1]	[2]	[3]	[3']	[4] = [2] / [3]	[4'] = [2] / [3']
Ściana nośna żelbetowa	0,23	1,7	0,59	0,135	0,390
Warstwa izolacyjna - płyta PIR	0,12	0,022	0,022	5,455	5,455
Warstwa żelbetowa elewacyjna	0,07	1,7	0,59	0,041	0,119
Suma oporu cieplnego warstw				5,631	5,963

Zgodnie z Tabela 5.3, obliczona wartość oporu cieplnego warstw ściany trójwarstwowej firmy Betard wynosi:

- 5,631 m²K/W, uwzględniając katalogową wartość λ betonu,
- 5,963 m²K/W, uwzględniając wartość λ betonu otrzymaną w badaniach z użyciem aparatu płytowego.

Na podstawie powyższych wyników, stwierdza się, że przy uwzględnieniu wartości λ otrzymanej w wyniku badania aparatem płytowym uzyskuje się wyższą wartość oporu cieplnego niż przy uwzględnieniu wartości katalogowej.

5.1.3. Wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła

Współczynnik przenikania ciepła U wyznaczamy z następującego wzoru:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (5.4)$$

gdzie R_{si} i R_{se} to opory przejmowania ciepła na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody. Na podstawie Tabela 3.1 dla ściany zewnętrznej przyjmuje się odpowiednio:

$$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W} \text{ oraz } R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Całkowita wartość współczynnika ciepła U dla ściany trójwarstwowej wynosi:

- $U = \frac{1}{0,13 + 5,631 + 0,04} = 0,172 \frac{W}{m^2K}$, uwzględniając referencyjną wartość λ betonu,

- $U = \frac{1}{0,13+5,963+0,04} = 0,163 \frac{W}{m^2 K}$, uwzględniając wartość λ betonu otrzymaną w badaniach z użyciem aparatu płytowego.

Wartość współczynnika przenikania ciepła ściany trójwarstwowej jest niższa przy uwzględnieniu wartości λ dla ściany konstrukcyjnej i elewacyjnej otrzymanej w wyniku badania aparatem płytowym niż przy uwzględnieniu dla tych wartości $\lambda=1,7 W/(mK)$, tj. wartości katalogowej firmy Betard.

5.1.4. Określenie liniowego współczynnika przenikania ciepła według PN-EN ISO 10211:2017

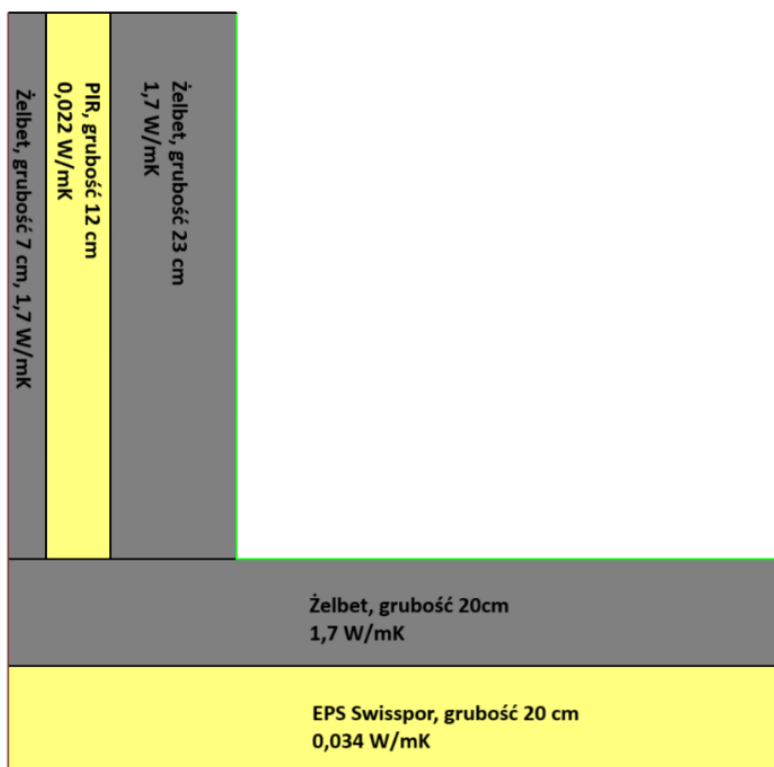
W zrealizowanej przez Betard inwestycji w Bielawie, szczelność powietrzna budynku została przerwana w miejscu połączenia ściany i podłogi, a więc w miejscu newralgicznym, gdzie często dochodzi do występowania mostka termicznego. W takim przypadku należy to połączenie sprawdzić, jednak zgodnie z zasadą projektowania budynku pasywnego, wprowadzono uproszczoną definicję projektowania budynku bez mostków termicznych pod warunkiem, że:

- wartość punktowego mostka termicznego $\psi \leq 0,01 W/(mK)$,
- wartość liniowego mostka termicznego $\sum_j \chi_j / A \leq 0,01 W/m^2K$.

gdzie A [m²] to powierzchnia, na której występują punktowe mostki termiczne. Oznacza to, że pozostaną jedynie niewielkie dodatnie mostki termiczne, które w większości przypadków zostaną zrekompensowane przez ujemne, typowe dla starannego projektu, takiego jak dom pasywny.

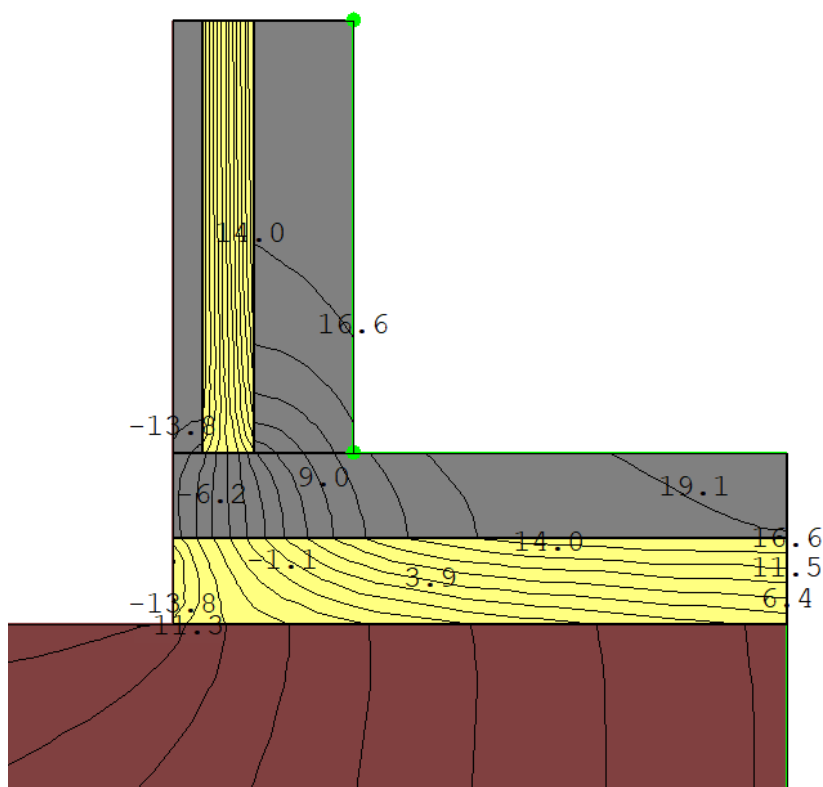
I. Określenie liniowego współczynnika przenikania ciepła ściana – podłoga

Do stworzenia modelu 2D wykorzystano wytyczne określone w normie PN-EN ISO 10211:2017 [139]. By zbadać liniowy współczynnik przenikania ciepła w połączeniu ściany i podłogi, należało także uwzględnić w modelu wycinek gruntu o zadanym współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 2,0 W/(mK)$ [139]. Na Rys. 5.1 przedstawiono wycinek przekroju pokazujący łączenie ściany z podłogą.



Rys. 5.1 - Wycinek przekroju pokazujący łączenie ściany i podłogi

Na podstawie przyjętych założeń dot. współczynników przenikania ciepła warstw przegród (dla tego przykładu przyjęto mniej korzystną wartość katalogową $\lambda=1,7$ W/mK) oraz warunków brzegowych, otrzymano rozkład izoterm wewnątrz przegrody, który został przedstawiony na rysunku poniżej. Z racji, że budynek znajduje się w I strefie to jako temperaturę zewnętrzną przyjęto -16°C . Projektowana temperatura wewnątrz to 20°C . Na Rys. 5.2 przedstawiono rozkład izoterm wewnątrz przegród oraz temperaturę na ich powierzchniach.



Rys. 5.2 - Rozkład izoterm wewnątrz przegród wraz z wycinkiem gruntu

W wyniku analizy tego połączenia program wyliczył poszczególne składowe wymagane do określenia liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ , co zostało przedstawione w Tabeli 5.4 wraz z końcowym określeniem wartości współczynnika ψ .

Tabela 5.4 - Kalkulacja liniowego współczynnika przenikania ciepła podłoga - ściana

Obliczanie współczynnika Ψ przy pomocy Therm 7.8					
strumień ciepła	U wewnętrzny [W/m ² xK]		l - długość całkowita [m]		L(2D) [W/m ² xK]
wewnętrzny	0,4619	*	2,4	=	1,10856
	U1 [W/m ² xK]		l(1) - wym. zewn. [m]		U1 x l1 [W/mK]
powierzchnia 1	0,0296	*	1,2	=	0,03552
	U2 [W/m ² xK]		l(2) - wym. Zewn. [m]		U2 x l2 [W/mK]
powierzchnia 2	0,6762	*	1,2	=	0,81144
			U1x l1+U2x l2=		0,84696
$\Psi=L2D - U x l$	1,10856	-	0,84696	=	0,262

Wartość liniowego mostka termicznego na połączeniu ściany i podłogi wynosi $\Psi = 0,262 \text{ W/m}^2\text{K} \geq 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ i należy go uwzględnić w arkuszu PHPP.

Chcąc sprawdzić newralgiczne miejsce na styku połączenia ściany i podłogi obliczono czynnik temperatury na powierzchni wewnętrznej:

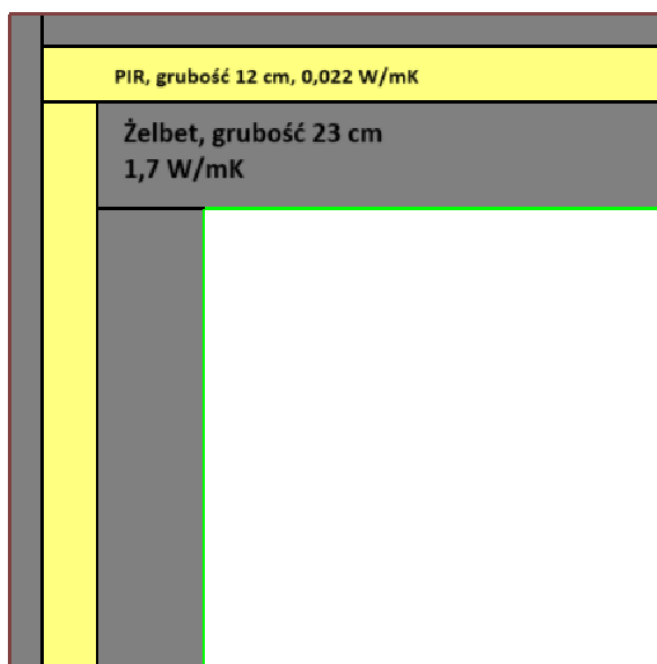
$$f_{Rsi} = \frac{16,6 - (-16)}{20 - (-16)} = 0,905$$

Wartości $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}=0,72$

To sprawdzenie pokazuje, że na styku ściany i podłogi nie zachodzi ryzyko powstania pleśni.

II. Określenie liniowego współczynnika przenikania ciepła – naroże ściany

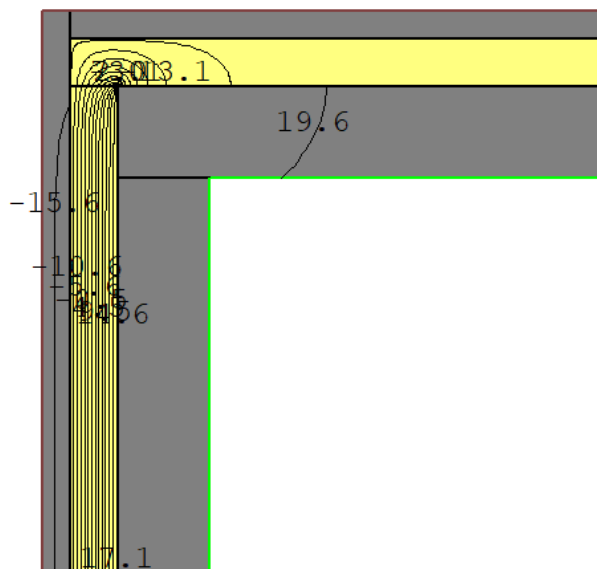
W kolejnym kroku sprawdzono jeden z częściej występujących mostków termicznych w budynkach, a mianowicie połączenie ścian w narożu budynku. Mostek taki występuje w momencie przerwania ciągłości izolacji termicznej. W przypadku technologii łączenia ścian prefabrykowanych przez firmę Betard, ciągłość izolacji termicznej jest zachowana dzięki technologicznej możliwości dostosowania produkcji do danego typu ściany. Na Rys. 5.3 przedstawiono przekrój naroża ścian wraz z opisem materiałowym.



Rys. 5.3 - przekrój naroża ściany

Na podstawie przyjętych założeń dot. współczynników przenikania ciepła warstw przegród oraz warunków brzegowych, otrzymano rozkład izoterm wewnątrz przegrody, który został przedstawiony na rysunku poniżej. Z racji, że budynek

znajduje się w I strefie to jako temperaturę zewnętrzną przyjęto -16°C . Projektowana temperatura wewnątrz to 20°C . Na Rys. 5.4 przedstawiono rozkład izoterm w narożu ściany.



Rys. 5.4 - Rozkład izoterm w narożu ściany

Na podstawie rozkładu temperatury wewnątrz warstw przekroju naroża ścian, można stwierdzić, że ściana zewnętrzna jest bardzo dobrze zaizolowaną przegrodą zewnętrzną. Przy temperaturze zewnętrznej -16°C , temperatura na styku warstw izolacji termicznej (płyta PIR) i warstwy konstrukcyjnej wynosi około 17°C . Tak niewielka amplituda temperatur zapobiega kondensacji wilgoci i powstawaniu pleśni w narożach budynku.

Poniżej w Tabeli 5.5, analogicznie jak dla poprzedniego przypadku, pokazano kalkulację liniowego współczynnika przenikania ciepła.

Tabela 5.5 - Kalkulacja liniowego współczynnika przenikania ciepła - naroże ściany

Obliczanie współczynnika Ψ przy pomocy Therm 7.8				
strumień ciepła	U wewnętrzny [W/m ² xK]		l - długość całkowita [m]	L(2D) [W/m ² xK]
wewnętrzny	0,1501	*	2,84	= 0,426284
	U1 [W/m ² xK]		l(1) - wym. zewn. [m]	U1 x l1 [W/mK]
powierzchnia 1	0,172	*	1,42	= 0,24424
	U2 [W/m ² xK]		l(2) - wym. Zewn. [m]	U2 x l2 [W/mK]
powierzchnia 2	0,172	*	1,42	= 0,24424
			U1x l1+U2x l2=	0,48848
$\Psi=L2D - U \times l$	0,426284	-	0,48848	= -0,062

Wartość liniowego mostka termicznego w narożu ściany wynosi $\Psi = -0,062 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \leq 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ i nie należy go uwzględnić w arkuszu PHPP, ponieważ jest pomijalnie mały. Dowodzi to także, że dzięki zastosowaniu reguły flamastra można zminimalizować mostki termiczne w newralgicznych miejscach budynku.

5.1.5. Punktowe mostki termiczne w ścianie trójwarstwowej

W przypadku izolacji termicznej, to jest ona montowana za pomocą kotew Schöck Isolink (Rys. 5.5) wykonanych z tworzywa kompozytowego wzmocnianego włóknami szklanymi. Kotwy przebijają całą grubość warstwy izolacyjnej, co zatem stwarza ryzyko powstania punktowego mostka termicznego, ponieważ kotwa w tym przypadku stanowi łącznik pomiędzy elementami betonowymi, które wykazują się dużo wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła ($0,59 \text{ W}/(\text{mK})$) niż warstwa izolacyjna z płyty PIR ($0,022 \text{ W}/(\text{mK})$).



Rys. 5.5 – Kotwy Schöck Isolink [24]

Zgodnie z normą PN-EN 6949 końcowy współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej musi uwzględniać wpływ mostków termicznych według zależności:

$$U_{eff} = U_0 + \Delta U_f \quad (5.5)$$

gdzie: U_0 – współczynnik przenikania ciepła ściany nienaruszonej [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],

ΔU_f – wpływ mostków termicznych [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

$$\Delta U_f = n_f * \chi \quad (5.6)$$

gdzie: n_f – liczba mostków termicznych [szt./ m^2],

χ – punktowy współczynnik przenikania ciepła [W/K].

Zgodnie z tabelami producenta, firmy Schöck Isolink, punktowy współczynnik przenikania ciepła dla grubości izolacji termicznej 12 cm wynosi 0,0007 W/K.

Płyty PIR są montowane do warstwy konstrukcyjnej w rozstawie co około 50 cm. Przyjmuje się zatem średnią liczbę kotew 4 szt./m².

Wpływ mostków termicznych wynosi:

$$\Delta U_f = 0,0007 * 4 = 0,0028 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Zgodnie z normą PN-EN 6946 jeżeli wpływ punktowych mostków termicznych jest mniejszy niż 3% wartości współczynnika przenikania ciepła U_0 to nie muszą one być uwzględniane w końcowym współczynniku ciepła U_{eff} .

$$\Delta U_f / U_0 = 0,0028 / 0,59 = \mathbf{0,47\% \leq 3\%}$$

Wpływ punktowych mostków termicznych jest mniejszy niż 3% wartości współczynnika przenikania ciepła U_0 , zatem nie zostaną one uwzględnione w końcowym współczynniku ciepła [133].

5.1.6. Badania ciepłno – wilgotnościowe ściany zewnętrznej

W celu sprawdzenia czy wewnątrz przegrody nie dochodzi do kondensacji pary wodnej, wykonano badania ciepłno – wilgotnościowe ściany zewnętrznej. Za pomocą symulacji numerycznej w programie Termo URSA określono zgodnie z normą EN ISO 13788 parametry ciepłno – wilgotnościowe ściany zewnętrznej prefabrykowanej w postaci temperatury na powierzchniach warstw oraz rozkładu wilgotności wewnątrz przegrody [140].

W pierwszej kolejności wyznaczono w programie wartość minimalnego współczynnika temperaturowego $f_{Rsi,min}$ w poszczególnych miesiącach - Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Minimalny współczynnik temperaturowy

Miesiąc	$f_{Rsi,min}$
Styczeń	0,761
Luty	0,746
Marzec	0,699
Kwiecień	0,606
Maj	0,476
Czerwiec	0,293
Lipiec	0,367
Sierpień	0,250
Wrzesień	0,456
Październik	0,604
Listopad	0,697
Grudzień	0,752

Wartość $f_{Rsi, max}$ odczytano dla stycznia (0,761). Jednak wartość ta jest mniejsza od wartości f_{Rsi} przegrody równej 0,905, co potwierdza, że przegroda została zaprojektowana prawidłowo pod kątem uniknięcia rozwoju pleśni na powierzchni wewnętrznej.

Następnie sprawdzono występowanie strumienia kondensacji i akumulacji wewnątrz przegrody w poszczególnych miesiącach. Wartości strumienia kondensacji i akumulacji dla wszystkich miesięcy zostały przedstawione w Tabeli 5.7.

Tabela 5.7 – Wartości strumienia kondensacji i akumulacji

Miesiąc	g_c [kg/m ²]	M_a [kg/m ²]
grudzień	0,00375	0,00375
styczeń	0,00373	0,00748
luty	0,00186	0,00934
marzec	-0,00275	0,00659
kwiecień	-0,01038	0,0000
maj	0,00000	0,0000
czerwiec	0,00000	0,0000
lipiec	0,00000	0,0000
sierpień	0,00000	0,0000
wrzesień	0,00000	0,0000
październik	0,00000	0,0000
listopad	0,00000	0,0000

Wartości przedstawione w Tabeli 5.7 wskazują na występowanie wewnątrz przegrody kondensacji pary wodnej w miesiącach od grudnia do marca, jednakże nie stanowi to zagrożenia dla konstrukcji, ponieważ przewiduje się wyparowanie całego kondensatu już w kwietniu, zapewniając brak kondensatu w kolejnych miesiącach. Stwierdza się zatem, że przegroda została zaprojektowana prawidłowo pod kątem wymagań Warunków Technicznych dotyczących występowania kondensacji międzywarstwowej. Wewnątrz przegrody może występować kondensacja pary wodnej, ale struktura przegrody umożliwia jej wyparowanie w miesiącach letnich [140].

5.2. Wykonanie symulacji energetycznej przedmiotowego budynku

Dzięki przeanalizowaniu parametrów fizyki budowli przegród zewnętrznych budynku, a w szczególności ściany zewnętrznej, w kolejnym etapie pracy można wykonać model przedmiotowego budynku wraz z określonymi współczynnikami ciepła i występującymi mostkami termicznymi.

5.2.1. Model przedmiotowego budynku w programie SketchUp

Przedmiotowy budynek to część inwestycji „Muflon”, która stanowi kompleks 8 modułowych budynków typu bliźniak z czterema lokalami mieszkalnymi. Osiedle jest ulokowane w sąsiedztwie Gór Sowich oraz w okolicy Jeziora Bielawskiego „Sudety”. Poniżej na Rys. 5.6 przedstawiono widok z lotu ptaka na teren inwestycji, na której ulokowany został przedmiotowy budynek.



Rys. 5.6 - Widok z lotu ptaka na teren inwestycji „Muflon”

Całość inwestycji stanowią 62 lokale z działkami na wyłączność mieszkańców. Pojedynczy lokal piętrowy będzie posiadał całkowitą powierzchnię użytkową równą 91,6 m². Lokale na parterze będą się składały z pokoju dziennego z aneksem kuchennym, wiatrołapu i łazienki. Na piętrze zaaranżowano trzy pokoje, mogące zostać zaadoptowane jako sypialnie. Dodatkowo na piętrze znajdzie się także łazienka i korytarz. Poniżej na Rys. 5.7 przedstawiono wizualizację jednego z budynków inwestycji „Muflon” w Bielawie.

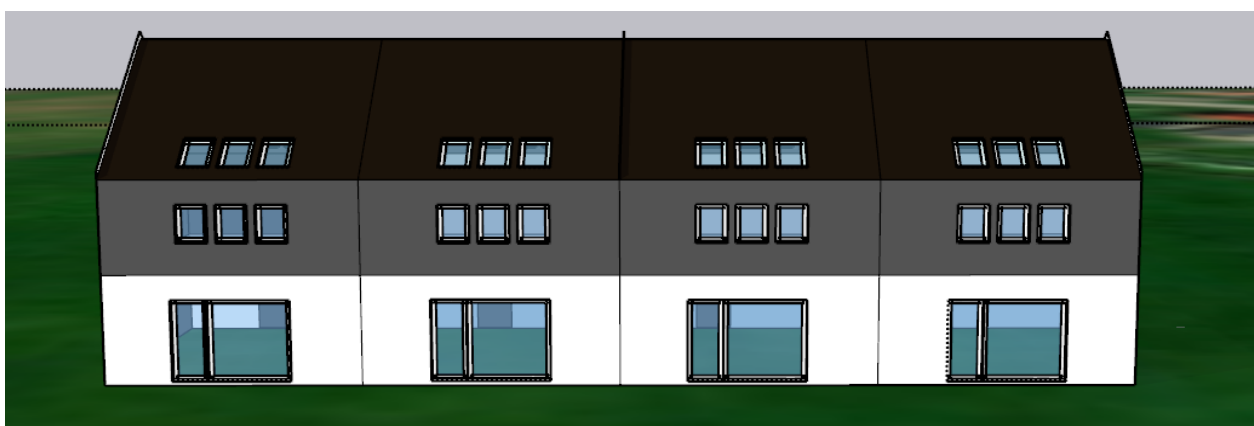


Rys. 5.7 - Wizualizacja jednego z budynków w Bielawie [57]

W celu przeprowadzenia badań i analizy zachowania budynku w zadanych warunkach klimatycznych wykonano model budynku, którego ściany zostały wykonane w zakładzie prefabrykacji firmy Betard. Model został wykonany na podstawie otrzymanych rysunków projektowych. Poniżej na rysunkach została przedstawiona elewacja północna modelu budynku - Rys. 5.8, elewacja południowa modelu budynku - Rys. 5.9, elewacja północna z widoczną elewacją zachodnią - Rys. 5.10 i elewacja południowa z widoczną elewacją wschodnią - Rys. 5.11.



Rys. 5.8 – Elewacja północna modelu budynku



Rys. 5.9 – Elewacja południowa modelu budynku

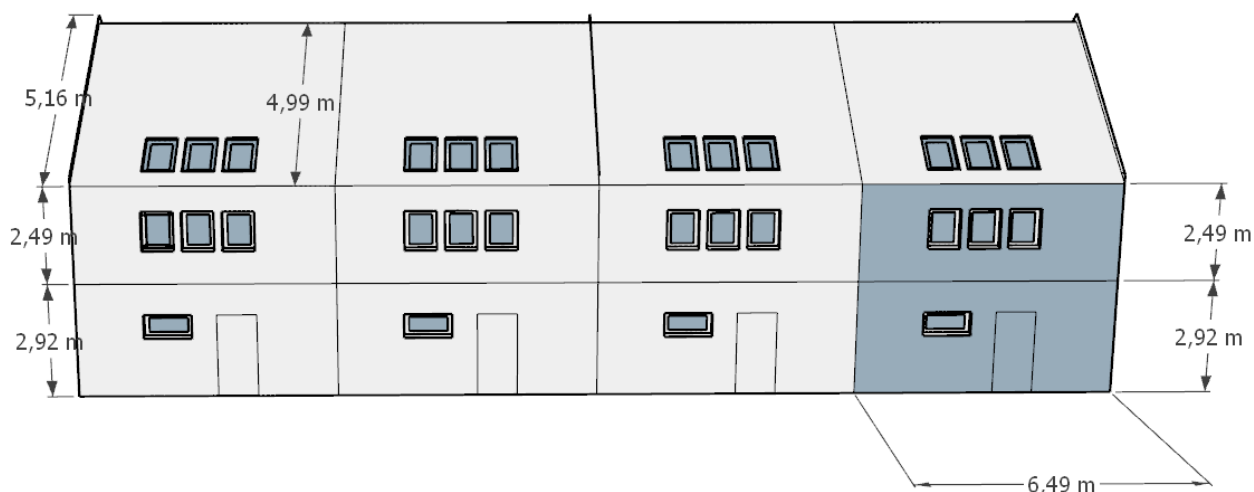


Rys. 5.10 – Elewacja północna z widoczną elewacją zachodnią



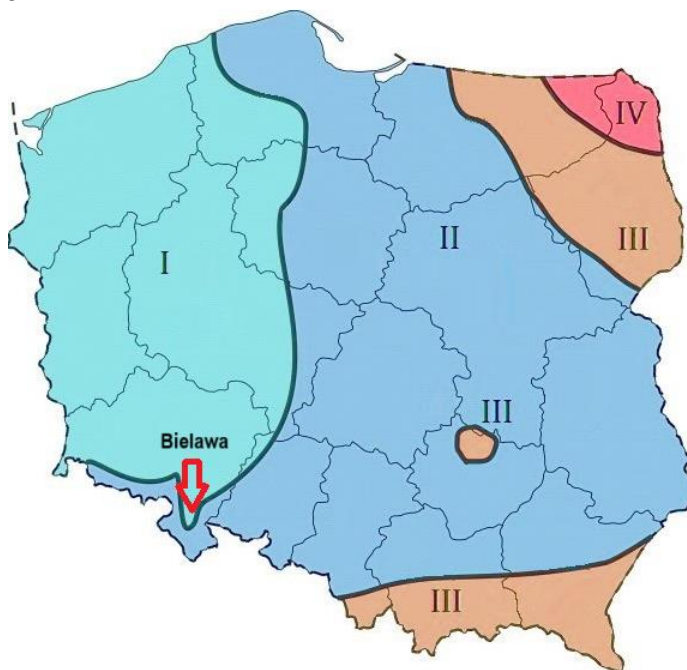
Rys. 5.11 - Elewacja południowa z widoczną elewacją wschodnią

Poniżej na Rys. 5.12 przedstawiono model przedmiotowego budynku wraz z jego wymiarami zewnętrznymi.



Rys. 5.12 - Zwymiarowany budynek w Bielawie

Budynek jest usytuowany w Bielawie w województwie dolnośląskim w I strefie przemarzania - Rys. 5.13.



Rys. 5.13 - Strefy przemarzania na terenie Polski [157]

Modelując budynek w programie SketchUp, należy w nim zdefiniować odpowiadający rzeczywistości klimat. Z dostępnej listy miast w bazie tego programu, miejscem najbliższym położonym Bielawy i znajdującym się też w I strefie przemarzania gruntu (głębokość przemarzania = 80 cm) jest Poznań (oznaczenie w programie PL0002a Poznań/Piła). Bryłę budynku odwzorowano na podstawie udostępnionego projektu budowlanego w postaci pliku dwg.

5.3. Założenia dla przedmiotowego budynku przyjęte do symulacji energetycznej wraz z wynikami tej symulacji

Do przeprowadzenia symulacji energetycznej należało poczynić w programie SketchUp założenia w zakresie zdefiniowania warstw przegród zewnętrznych budynku, określenia systemów w budynku w postaci ogrzewania i wentylacji. Program wymaga także, by zamodelowany budynek przypisać do najbardziej odpowiadającej rzeczywistości lokalizacji z dostępnej w programie bazy.

5.3.1. Założenia dot. klimatu panującego na terenie lokalizacji przedmiotowego budynku

Obiekt jest położony w Bielawie w województwie dolnośląskim u podnóża Gór Sowich. Bielawa położona jest w I strefie klimatycznej. Przypisana stacja klimatyczna dostępna w bibliotece programu, ulokowana jest w Poznaniu na wysokości 97 m n.p.m. Sam budynek natomiast znajduje się na wysokości około 300 m n.p.m. Poniżej w Tabeli 5.8 przedstawiono wybrane dane przyjęte do zdefiniowania klimatu w arkuszu PHPP.

Tabela 5.8 - Założenia przyjęte w kalkulatorze PHPP w zakresie lokalizacji i klimatu

	Wybór danych klimatycznych	
Kraj:	PL	
Region:	Strefa I	
Zestaw danych klimatycznych:	PL0002a	
Strefa klimatyczna:	2: Zimna	
Stacja pogodowa:	97,0	m
Lokalizacja budynku:	300	m

W wyniku przyjętych założeń przedstawionych w Tabeli 5.8 dla przedmiotowego obiektu, program określa wartości czynników klimatotwórczych w podziale miesięcznym. W Tabeli 5.9 przedstawiono następujące parametry otrzymane w wyniku ww. przyjętych założeń, z podziałem na miesiące:

- temperatura zewnętrzna,
- promieniowanie słoneczne północne,
- promieniowanie słoneczne wschodnie,
- promieniowanie słoneczne południowe,
- promieniowanie słoneczne zachodnie,

- promieniowanie poziome,
- temperatura punktu rosy (temperatura, w której może rozpocząć się proces skraplania),
- temperatura nieba,
- temperatura gruntu.

Tabela 5.9 - Określone parametry klimatyczne ze stacji Poznań/Piła

Miesiąc	styczeń	luty	marzec	kwi.	maj	czer.	lip.	sierp.	wrze.	paź.	lis.	gru.
Liczba dni	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
PL0002a-Poznan/Piła	Szerokość geograficzna°	52,4	Długość geograficzna °	16,9	Wysokość stacji [m]	97	Średnie dzienne wahania temperatury - Lato [K]			10,6		
Temperatura zewnętrzna [°C]	-3,2	-2,2	1,5	6,4	12,1	15,5	16,8	16,2	12,2	7,6	2,6	-1,3
Promieniowanie północne [kWh/(m ² miesiąc)]	6	11	19	30	43	48	47	36	23	15	8	5
Promieniowanie wschodnie [kWh/(m ² miesiąc)]	13	24	48	70	97	88	94	81	57	35	16	10
Promieniowanie południowe [kWh/(m ² miesiąc)]	43	55	83	88	100	88	96	100	90	78	41	28
Promieniowanie zachodnie [kWh/(m ² miesiąc)]	15	24	47	68	90	95	96	87	55	38	15	10
Promieniowanie poziome [kWh/(m ² miesiąc)]	19	36	71	109	156	155	160	136	86	52	23	13
Temperatura punktu rosy [°C]	-3,8	-3,2	-0,5	2,6	6,6	10,4	11,7	11,7	9,1	5,8	1,4	-1,8
Temperatura nieba [°C]	-16,1	-14,5	-9,3	-3,1	2,6	7,2	8,6	8,0	3,4	-3,3	-9,0	-12,8
Temperatura gruntu [°C]	6,8	5,8	5,8	6,7	8,4	10,2	11,8	12,7	12,7	11,8	10,2	8,4

Z powyższych wartości wynika, że w badanej lokalizacji występują duże dysproporcje między promieniowaniem słonecznym północnym a południowym. W części okresu grzewczego od listopada do lutego promieniowanie słoneczne północne nie przekracza średniej miesięcznej wartości 11 kWh/(m²rok). Widoczne dysproporcje są szczególnie istotne w zakresie orientacji budynku względem stron świata. Projektując budynek warto mieć na uwadze, by strona północna budynku miała jak najmniej przeszkleń, przez które budynek mógłby się wychładzać [43] [50].

Kolejnymi wartościami uzyskani w arkuszu PHPP dzięki przyjętym założeniom dotyczącymi lokalizacji i klimatu są dane wskazujące na liczbę dni grzewczych w roku, a także średnie roczne wartości promieniowania słonecznego.

W Tabeli 5.10 przedstawiono zestawienie liczbowe dni grzewczych w ciągu roku oraz średnie roczne wartości promieniowania słonecznego.

Tabela 5.10 – Wartości określające liczbę dni grzewczych oraz średnie roczne wartości promieniowania słonecznego

Sezon grzewczy/chłodniczy	225	dni/rok
Stopniogodziny ogrzewania/chłodzenia	97	kKh/rok
Promieniowanie północne	108	kWh/(m ² rok)
Promieniowanie wschodnie	246	kWh/(m ² rok)
Promieniowanie południowe	446	kWh/(m ² rok)
Promieniowanie zachodnie	245	kWh/(m ² rok)
Promieniowanie poziome	372	kWh/(m ² rok)

5.3.2. Określenie współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych

W następnej kolejności dokonano zdefiniowania przegród zewnętrznych poprzez określenie grubości warstw poszczególnych przegród oraz ich współczynnika przewodzenia ciepła λ . Arkusz PHPP dzięki tym wartościom wylicza współczynnik przenikania ciepła U . Metoda liczenia tego współczynnika została pokazana w podrozdziale 5.1.3. niniejszego dokumentu. W arkuszu oraz w poniższych wycinkach zostały także uwzględnione opory przejmowania ciepła na wewnętrznej (R_{si}) i zewnętrznej (R_{se}) powierzchni przegrody.

I. Ściana zewnętrzna

Na Rys. 5.14 przedstawiono warstwy w ścianie zewnętrznej wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła.

Nr przegrody	Opis przegrody					
01ud	Ściana zewnętrzna					
Rodzaj przegrody	2-Wall		Opór przejmowania ciepła [m ² K/W]			
Przylegająca do	1-Outdoor air		na pow. wewnętrznej R_{si}	0,13		
			na pow. zewnętrznej R_{se}	0,04		
Sekcja 1	λ [W/(mK)]	Sekcja 2 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Sekcja 3 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Grubość [mm]
Warstwa nośna żelbet	0,590					230
Warstwa izolacyjna - płyta PIR	0,022					120
Warstwa elewacyjna żelbetowa	0,590					70
	Procent z sekcji 1	Procent z sekcji 2	Procent z sekcji 3	Całkowicie		
	100%			42,0		cm
	Wartość U dodatku			Wartość U:	0,163	W/(m ² K)

Rys. 5.14 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej

Zgodnie z powyższym wycinkiem, współczynnik przenikania ciepła U ściany zewnętrznej wynosi $U = 0,163 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Wartość ta spełnia obecne wymagania dotyczące obowiązujących Warunków Technicznych ($\leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), ale nie spełnia wymagań dotyczących budynku w standardzie pasywnym ($\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

II. Podłoga na gruncie

Na Rys. 5.15 przedstawiono warstwy w podłodze na gruncie wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła.

Nr przegrody	Opis przegrody					Interior insulation?
03ud	Podłoga na gruncie					
	Opór przejmowania ciepła [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]					
Rodzaj przegrody	3-Floor	na pow. wewnętrznej R_{si}	0,17			
Przylegająca do	2-Ground	na pow. zewnętrznej R_{se}	0,00			
Sekcja 1	λ [$\text{W}/(\text{mK})$]	Sekcja 2 (opcjonalna)	λ [$\text{W}/(\text{mK})$]	Sekcja 3 (opcjonalna)	λ [$\text{W}/(\text{mK})$]	Grubość [mm]
Posadzka wykończeniowa	0,200					20
Płyta żelbetowa	1,700					200
EPS Swisspor	0,034					200
Hydroizolacja						
Chudy beton C30	0,076					50
Piasek zagęszczony	0,400					300
	Procent z sekcji 1	Procent z sekcji 2	Procent z sekcji 3	Całkowicie		
	100%			77,0 cm		
Wartość U dodatku		$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$		Wartość U:	0,130	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

Rys. 5.15 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła podłogi na gruncie

Zgodnie z powyższym wycinkiem, współczynnik przenikania ciepła U podłogi na gruncie wynosi $U = 0,130 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Wartość ta spełnia obecne wymagania dotyczące obowiązujących Warunków Technicznych ($\leq 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), a także spełnia wymagań dotyczących budynku w standardzie pasywnym ($\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

III. Dach

Na Rys. 5.16 przedstawiono warstwy w dachu wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła.

Nr przegrody	Opis przegrody				Interior insulation?	
05ud	Dach					
		Opór przejmowania ciepła [m ² K/W]				
Rodzaj przegrody	1-Roof	na pow. wewnętrznej R _{si} :		0,10		
Przylegająca do	1-Outdoor air	na pow. zewnętrznej R _{se} :		0,04		
Sekcja 1	λ [W/(mK)]	Sekcja 2 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Sekcja 3 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Grubość [mm]
Dachówka						15
Krokwie 18x6 cm						60
Wełna skalna TOPROCK PREMIUM						150
SUPERROCK PREMIUM						150
Poszycie wewnętrzne g-k						15
	Procent z sekcji 1	Procent z sekcji 2		Procent z sekcji 3		Całkowicie
	100%					39,0 cm
Wartość U dodatku	λ [W/(m ² K)]					Wartość U:
						0,120 W/(m ² K)

Rys. 5.16 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła dachu

W przypadku dachu wartość współczynnika przenikania ciepła musiała zostać wyliczona poza programem, ponieważ w tym przypadku mamy do czynienia z przegrodą niejednorodną. Dach o konstrukcji z krokwi w rozstawie co 90 cm z wypełnieniem z wełny skalnej marki Rockwool. Poniżej wylistowano pozycje warstw, które biorą udział w kalkulacji współczynnika przenikania ciepła wraz z wyliczonym oporem cieplnym:

- krokwie 15x6 cm, $R_1 = 0,15/0,16 = 0,938 \text{ (m}^2\text{K)/W}$,
- wełna skalna TOPROCK 15 cm, $R_2 = 0,15/0,035 = 4,286 \text{ (m}^2\text{K)/W}$,
- wełna skalna pod krokwiami SUPERROCK 15cm,
 $R_3 = 0,15/0,034 = 4,412 \text{ (m}^2\text{K)/W}$,
- poszycie wewnętrzne w postaci płyty g-k, 1,25 cm,
 $R_4 = 0,0125/0,23 = 0,054 \text{ (m}^2\text{K)/W}$,

Następnie należy wyliczyć względne pole wycinków:

$$f_1/R_{T,1} = 0,06/0,90 = 0,067$$

$$f_2/R_{T,2} = 0,84/0,90 = 0,933$$

W kolejnym kroku dokonuje się kalkulacji oporów cieplnych wycinków, uwzględniając także opory przejmowania ciepła na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody:

$$R_{T1} = 0,10 + 0,054 + 4,286 + 0,938 + 0,04 = 5,418 \text{ (m}^2\text{K)/W, oraz}$$

$$R_{T2} = 0,10 + 0,054 + 4,286 + 4,412 + 0,04 = 8,892 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Następnie oblicza się kres górny całkowitego oporu cieplnego przegrody:

$$1/R_T = 0,067/5,418 + 0,933/8,892 = 0,117 \text{ W/(m}^2\text{K), czyli } R_T = 8,547 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

By obliczyć kresy dolnego całkowitego oporu cieplnego należy wyznaczyć równoważną przewodność cieplną warstwy niejednorodnej:

$$\lambda_2 = 0,067 \cdot 0,16 + 0,933 \cdot 0,035 = 0,043 \text{ W/mK}$$

Kres dolny całkowitego oporu cieplnego wynosi:

$$R' = 0,10 + 0,054 + 4,412 + 0,15/0,043 + 0,04 = 8,09 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

W ostatnim kroku wylicza się całkowity opór cieplny połączenia dachowej:

$$R_T = (8,547 + 8,090)/2 = 8,319 \text{ (m}^2\text{K)/W, czyli } \mathbf{U = 0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

5.3.3. Powierzchnie przegród zewnętrznych

Kolejną zakładką arkusza PHPP jest powierzchnia przegród zewnętrznych obliczona na podstawie zaprojektowanego modelu przedmiotowego budynku w programie SketchUp. W Tabeli 5.11 przedstawiono zestawienie przegród zewnętrznych przedmiotowego budynku wraz z podanymi wartościami powierzchni.

Tabela 5.11 - Powierzchnie przegród zewnętrznych budynku

Przegroda	Powierzchnia	Jednostka
Powierzchnia użytkowa	366,56	m ²
Okna na północ	18,96	m ²
Okna na wschód	0,00	m ²
Okna na południe	48,12	m ²
Okna na zachód	0,00	m ²
Drzwi zewnętrzne	16,80	m ²
Ściana zewnętrzna	329,09	m ²

Przegroda	Powierzchnia	Jednostka
Dach	239,99	m ²
Płyta fundamentowa	183,28	m ²

5.3.4. Założenia dotyczące okien

W modelu budynku zastosowano oszklenie Saint-Gobain Glass CLIMATOP ECLAZ & ECLAZ II o współczynniku przenikania ciepła oszklenia $U_g = 0,64 \text{ W/m}^2\text{K}$, co jest zgodne z zalecenia Polskiego Instytutu Budownictwa Pasywnego, który rekomenduje, by w polskich budynkach pasywnych montować okna o $U_g \leq 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ [38]. Wybrany model jest to moduł trójszybowy o grubości pojedynczej szyby 4 mm. Szybę zespoloną tworzy układ trzech tafli szkła oddzielonych od siebie ciepłą ramką dystansową o szerokości 14 mm. W przestrzeni międzyszybowej znajduje się gaz szlachetny argon. Który ma zapewnić efekt ciepłochronności. W szybie termoizolacyjnej występuje powłoka niskoemisyjna Eclaz, która ma za zadanie ograniczać utratę nagromadzonego w budynku ciepła. Powłoka niskoemisyjna jest to cienka warstwa tlenków metali szlachetnych, która przepuszcza światło i energię słoneczną do wnętrza okna, zapobiegając uciekaniu ciepła ze środowiska wewnętrznego na zewnątrz [36]. Poniżej na Rys. 5.17 przedstawiono przekrój oszklenia zastosowanego oszklenia.



Rys. 5.17 - Grafika przedstawiająca przekrój wybranego oszklenia [154]

Jako ramę okienną zastosowano ramę o współczynniku przenikania ciepła $U_f = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ zdefiniowaną jako PH-FRAMES. Także jest to wartość spełniająca rekomendację Polskiego Instytutu Budownictwa Pasywnego – $U_f \leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

W Tabeli 5.12 zestawiono sumaryczną powierzchnię okien wraz z poszczególnymi parametrami wymienionymi w następującej kolejności:

- Promieniowanie globalne,
- Orientacja,
- Współczynnik promieniowania poziomego,
- Współczynnik g okien, który mierzy przepuszczalność zysków energii słonecznej przez przeszklenia – ile ciepła przenika przez szkło z promieni słonecznych,
- Współczynnik redukcji nasłonecznienia,
- Powierzchnia okien,
- Powierzchnia oszklenia,
- Średnia całkowita wartość promieniowania słonecznego w ciągu roku.

Tabela 5.12 - Zestawienie z danymi dotyczącymi przeszkleń w budynku

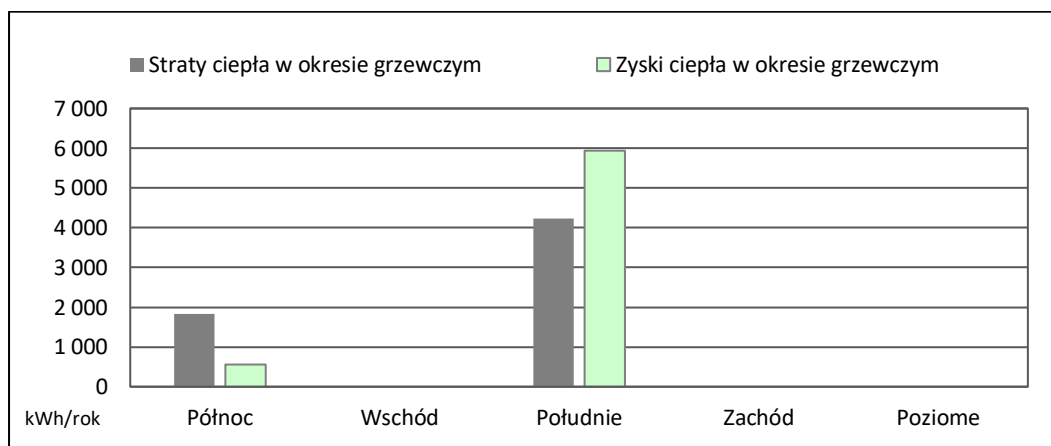
Orientacja okien	Całkowite promieniowanie kWh/(m ² rok)	Współczynnik g	Współczynnik redukcji napromieniowania słonecznego	Powierzchnia okien m ²	Powierzchnia przeszkleń m ²	Śr. całkowita wartość promieniowania kWh/(m ² rok)
Północ	108	0,50	0,43	18,96	10,14	138
Wschód	246	0,00	0,00	0,00	0,00	246
Południe	446	0,50	0,53	48,12	31,87	462
Zachód	245	0,00	0,00	0,00	0,00	245
Poziome	372	0,00	0,00	0,00	0,00	372
Średnie lub całkowite wartości dla wszystkich okien		0,50	0,51	67,08	42,01	

W Tabeli 5.13 zostały także wskazane dane pokazujące wartość strat i zysków w wyniku przenikania ciepła przez przegrody szklone wyrażone w kWh/rok.

Tabela 5.13 - Podsumowanie strat i zysków ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone w kWh/rok

	Straty ciepła w okresie grzewczym kWh/rok	Zyski ciepła w okresie grzewczym kWh/rok
Północ	1839	565
Wschód	0	0
Południe	4234	5942
Zachód	0	0
Poziome	0	0
Łącznie	6072	6507

Poniżej na Rys. 5.18 przedstawiono wykres strat i zysków ciepła w okresie grzewczym.



Rys. 5.18 - Wykres słupkowy pokazujący podsumowanie zysków i strat ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone z podziałem na kierunki świata

Na podstawie Rys. 5.18 można stwierdzić, że przez zastosowanie znacznej powierzchni przeszkleń od strony południowej do budynku przenika dużo promieniowania słonecznego i dzięki temu więcej przypada zysków ciepła niż ich strat. Od strony północnej ta proporcja jest odwrotna i przez tę stronę budynku przez okna ucieka więcej ciepła niż jest uzyskiwane. Jest to z pewnością podpowiedź, by w okresie zimowym od strony północnej budynku zastosować odpowiednie osłony lub okna o lepszych parametrach termicznych. Także ze

względu na dane klimatyczne, program rekomenduje zastosowanie okien o odpowiednim współczynniku przenikania ciepła U_w w zależności od kąta nachylenia:

- 0,65 W/(m²K) – okna pionowe o nachyleniu 60°-150°,
- 0,70 W/(m²K) – okna połaciowe o nachyleniu 30°-60°,
- 0,80 W/(m²K) – okna horyzontalne o nachyleniu 0°-30°,
- 0,45 W/(m²K) – przeszklenie w podłodze o nachyleniu 150°-180°.

Wartości te także sugerują, że wykorzystane w budynku okna, pomimo, że są oknami spełniającymi wymagania budynku pasywnego to jednak ze względu na zimny klimat panujący w badanej lokalizacji, mogą okazać się niewystarczające i „oddawać” zbyt dużą ilość ciepła w okresie grzewczym.

5.3.5. Przyjęte założenia dotyczące wentylacji

Kolejnym etapem w przyjętych założeniach obliczeniowych w arkuszu PHPP są założenia dotyczące systemu wentylacji. W przedmiotowym budynku wykorzystano wentylację mechaniczną wywiewną. W Tabeli 5.14 przedstawiono przyjęte założenia dotyczące klasy ochrony przed wiatrem wraz z wyliczoną na tej podstawie wartością przepuszczalności powietrza q_{50} .

Tabela 5.14 - Kalkulacja współczynnika przepuszczalności powietrza q_{50}

		Współczynnik ochrony przed wiatrem e i f					
		Kilka stron wyeksponowanych	Jedna strona wyeksponowana				
	Współczynnik e dla klasy ochrony przed wiatrem						
	bez ochrony	0,10	0,03				
	umiarkowana ochrona	0,07	0,02				
	Wysoka ochrona	0,04	0,01				
	Współczynnik f	15	20				
		Dla rocznego zapotrzebowania		Dla obciążenia cieplnego			
	Współczynnik ochrony przed wiatrem, e	0,10	0,25				
	Współczynnik ochrony przed wiatrem, f	15	15	Objętość powietrza na potrzeby testu ciśnieniowego	V_{n50}	Przepuszczalność powietrza	q_{50}
	Krotność wymiany powietrza pod n_{50}	0,34	0,34	916	m ³	0,37	m ³ /(hm ²)

Arkusz kalkulacyjny wylicza wartość przepuszczalności powietrznej q_{50} bryły budynku w odniesieniu do objętości całkowitej. Najpierw jednak dobrano współczynniki zależne od ekspozycji budynku i jego osłonięcia od wiatru, tj.

współczynnik e – klasa ochrony przed wiatrem oraz współczynnik f mówiący, czy budynek jest osłonięty przed wiatrem tylko od jednej fasady. W przypadku badanego obiektu dobrano następujące wartości współczynników:

e = 0,10 – wartość dla budynku bez osłonięcia,

f = 15 – wartość dla budynku posiadające więcej niż jedną fasadę wyeksponowaną do wiatru.

Przy założonej objętości powietrza na poziomie 916 m³ (kubatura budynku), końcowa wartość przepuszczalności powietrznej bryły budynku wynosi 0,37 m³/(hm²).

W następnym etapie program wylicza średnią krotność wymiany powietrza i wartość średniego natężenia przepływu powietrza. Do tej kalkulacji musiały zostać poczynione założenia dotyczące:

- średniej liczby użytkowników – założono, że w każdym segmencie zamieszkuje trzy osobowa rodzina,
- liczba kuchni i łazienek – założono po jednej kuchni i łazience na segment – łącznie po 4 tego typu pomieszczenia na cały budynek,
- w budynku zastosowano wentylację mechaniczną wywiewną scentralizowaną z jedną jednostką.

Wielkość powietrza wentylacyjnego przyjęto następująco dla pomieszczeń, gdzie potrzebny jest wywiew:

- kuchnia – 60m³/h,
- łazienka – 40m³/h.

W związku z powyższym maksymalna wartość natężenia przepływu powietrza wynosi:

$4 * 60 + 4 * 40 = 240 + 160 = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ i dla takiej wartość będzie liczone średnie natężenie przepływu powietrza i krotność wymiany powietrza.

Przy założeniu, że wentylacja wywiewna pracuje przez całą dobę, a jak przyjmuje program – jej maksymalna efektywność to 77%, można wyliczyć wskaźnik średniego natężenia przepływu powietrza:

$$77\% * 400 \text{ m}^3/\text{h} = 308 \text{ m}^3/\text{h}$$

W związku z powyższym krotność wymiany powietrza liczy się następująco:

Krotność wymiany = Średnie natężenie przepływu powietrza/objętość powietrza, tj.:

$$308/916 = \mathbf{0,34 \text{ 1/h}} \geq \mathbf{0,3 \text{ 1/h}} \text{ oraz } \mathbf{0,34 \text{ 1/h}} \leq \mathbf{0,6 \text{ 1/h}}$$

Krotność wymiany w badanym obiekcie spełnia wymogi budynku pasywnego ze względu na wymogi higieniczne. W Tabeli 5.15 przedstawiono w formie zestawienia tabelaryczne ww. założenia wraz z końcowym wyliczeniem wartości średniej krotności wymiany powietrza.

Tabela 5.15 - Wyliczenie krotności wymiany powietrza i średniego natężenia przepływu powietrza

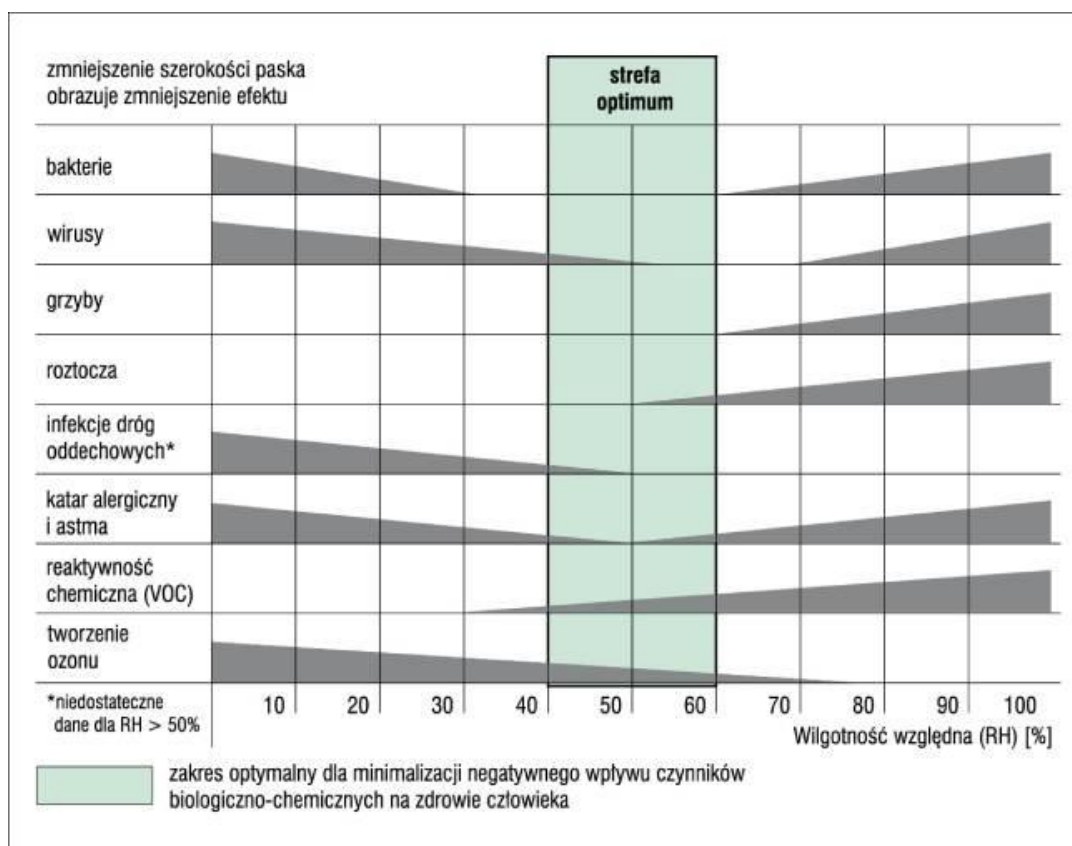
Obłożenie	m ² /P	31			
Liczba mieszkańców	P	12,0			
Dopływ powietrza na osobę	m ³ /(P*h)	30			
Zapotrzebowanie na powietrze nawiewane	m ³ /h	360			
Pomieszczenia wywiewne		Kuchnia	Łazienka	(tylko prysznic)	WC
Liczba		4	4		
Zapotrzebowanie na powietrze wywiewane na pomieszczenie	m ³ /h	60	40	20	20
Całkowite zapotrzebowanie na powietrze wywiewane	m ³ /h	400			
Projektowe natężenie przepływu powietrza (maksymalne)	m ³ /h	400	Zalecane:	400	m ³ /h

Obliczanie średniego współczynnika wymiany powietrza

Czynniki odwołujące się do

Rodzaj operacji	Dzienne godziny pracy godz./dzień	maximum	Natężenie przepływu powietrza m ³ /h	Krotność wymiany powietrza 1/h
maximum		1,00	400	0,44
Standard	24,0	0,77	308	0,34
Podstawowa wentylacja		0,54	215	0,24
Minimum		0,40	160	0,17
Średnia wartość			Średnie natężenie przepływu powietrza (m ³ /h)	Średnia krotność wymiany powietrza (1/h)
0,77			308	0,34

Kolejnym istotnym czynnikiem decydującym czy badany budynek można określić mianem budynku zdrowego, a na który wpływ ma wentylacja, jest wilgotność względna. Jest to stosunek ilości pary wodnej w powietrzu do maksymalnej ilości, jaką może przyjąć powietrze w określonej temperaturze i ciśnieniu. Idealnym zakresem wilgotności względnej wewnątrz budynku, który definiuje komfort użytkownika jest przedział między 40% a 60%. Bardzo dobrze obrazuje to diagram Scofielda-Sterlinga w formie Rys. 5.19, pokazujący skalę wpływu negatywnych czynników biologiczno – chemicznych na człowieka w zależności od wilgotności względnej.



Rys. 5.19 - Diagram Scofielda–Sterlinga obrazujący wpływ wilgotności względnej na czynniki biologiczne i chemiczne w otoczeniu człowieka [158]

Otrzymane w arkuszu PHPP średnie miesięczne wartości wilgotności względnej w przedmiotowym budynku w ciągu całego roku przedstawiono w Tabeli 5.16.

Tabela 5.16 - Średnie miesięczne wartości wilgotności względnej

Styczeń	42%	Lipiec	81%
Luty	43%	Sierpień	81%
Marzec	48%	Wrzesień	72%
Kwiecień	54%	Październik	62%
Maj	64%	Listopad	51%
Czerwiec	76%	Grudzień	45%

Na podstawie powyższych wyników stwierdza się, że w analizowanym budynku problem ze zbyt wysoką wilgotnością względną występuje w okresie letnim, tj. od maja do października, a najwyższe wartości, znacząco przekraczające zakres komfortu występują w najgorętszych miesiącach – lipcu i sierpniu. Stanowi to już

znaczące ryzyko rozwoju grzybów i pleśni i może bezpośrednio wpływać na samopoczucie i zdrowie użytkowników.

5.3.6. Obliczenie obciążenia cieplnego budynku

Kolejnym istotnym parametrem pod kątem standardu pasywnego jest moc grzewcza budynku. W budynku pasywnym maksymalne zapotrzebowanie na moc grzewczą wynosi maksymalnie 10W/m^2 i wartość ta w odniesieniu do polskiego klimatu jest niezwykle niska. Jest to obliczeniowa moc źródła ciepła, która jest potrzebna do utrzymania komfortu cieplnego wewnątrz budynku. Średnia wartość obciążenia cieplnego budynku w polskich warunkach to zakres pomiędzy 15 a 18W/m^2 . Poniżej w Tabeli 5.17 przedstawiono wartości temperatury projektowej i promieniowania słonecznego założone do obliczenia mocy cieplnej budynku w podziale na dwa scenariusze P1 i P2, gdzie P1 dotyczy przedstawia scenariusz dla zimnego dnia z bezchmurnym niebem, a P2 to dzień zimowy o umiarkowanie niskiej temperaturze i zachmurzonym niebem.

Tabela 5.17 – Podstawowe parametry do kalkulacji obciążenia cieplnego budynku

	Temperatura projektowa [°C]	Północ [W/m ²]	Wschód [W/m ²]	Południe [W/m ²]	Zachód [W/m ²]	Poziome [W/m ²]	Temperatura wewnętrzna [°C]:	20
Pogoda 1:	-12,2	10	15	30	15	25	Rodzaj budynku:	mieszkalny
Pogoda 2:	-6,2	5	10	10	10	10	Powierzchnia użytkowa A _{TEA} [m ²):	366,6

Poniżej w formie Rys. 5.20 zostało przedstawione obliczenie obciążenia cieplnego P_T , pojemności cieplnej wentylacji P_V oraz całkowitej pojemności cieplnej P_L w budynku dla systemu wentylacji.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przegroda budynku	Strefa temperatury	Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Wskaźnik zawsze 1 (oprócz "X")	Różnica temp. 1		Różnica temp. 2		PT 1	PT 2			
					K	lub	K	=	W	W			
Ściana zewnętrzna	A	329,1	* 0,163	*	1,00	* 32,2	lub	26,2	=	1729	lub	1407	
Dach	A	240,0	* 0,120	*	1,00	* 32,2	lub	26,2	=	928	lub	755	
Płyta fundamentowa	B	183,3	* 0,130	*	1,00	* 14,4	lub	14,4	=	344	lub	344	
Okna	A	67,1	* 0,934	*	1,00	* 32,2	lub	26,2	=	2019	lub	1643	
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	* 0,500	*	1,00	* 32,2	lub	26,2	=	271	lub	220	
Obwodowy mostek termiczny (mb)	P	54,1	* 0,082	*	1,00	* 14,4	lub	14,4	=	64	lub	64	
Obciążenie cieplne P_T													
									Całkowicie	=	5353	lub	4432
System wentylacji:				A _{TFA} m ²		Wysokość pomieszczenia m		m ³					
Efekt. Objętość powietrza, V _V				366,6		* 2,50		= 916					
Efekt. Odzysku ciepła wymienika ciepła		η _{HR}	0%		Efekt. Odzysku ciepła SHX		0%		Efekt. Odzysku ciepła SHX		η _{SHX 1}	lub	η _{SHX 2}
											0%		0%
Energoozczędna wymiana powietrza n _V				n _{V,Res} (Pojemność cieplna) 1/h		n _{V,system} 1/h		Φ _{HP}		Φ _{HP}		1/h	
				0,001		+ 0,336		*(1- 0,00 or		0,00		)= 0,337 lub 0,337	
Pojemność cieplna wentylacji P_V				V _V m ³		n _V 1/h		C _{Air} Wh/(m ³ K)		Różnica temp. 1 K		Różnica temp. 2 K	
				916,4		* 0,337 or 0,337		* 0,33		* 32,2 or		26,2 = 3285 or 2673	
Całkowita pojemność cieplna P_L													
											PL 1		PL 2
											W		W
									P _T + P _V	=	8639	or	7106

Rys. 5.20 – Wycinek z PHPP z kalkulacją P_T, P_V, P_L

Całkowita pojemność cieplna wyniosła odpowiednio 8639 W dla scenariusza P1 oraz 7142 dla scenariusza P2.

Poniżej w formie Rys. 5.21 zostało przedstawione obliczenie mocy grzewczej energii P_S , wewnętrznej pojemności cieplnej P_I oraz mocy grzewczej P_G . Te parametry stanowią zyski cieplne z promieniowania słonecznego i wewnętrznych zysków ciepła, które zostaną odjęte od całkowitej pojemności cieplnej.

Orientacja	Powierzchnia	wartość g	Współ. Redukcyjny	Promieniowanie 1	Promieniowanie 2	P_T 1	P_T 2		
powierzchni	m ²			W/m ²	W/m ²	W	W		
Polnoc	19,0	*	0,5	*	11	47	22		
Wschód	0,0	*	0,0	*	15	0	0		
Poludnie	48,1	*	0,5	*	31	399	136		
Zachód	0,0	*	0,0	*	15	0	0		
Poziomo	0,0	*	0,0	*	25	0	0		
Moc grzewcza energii słonecznej P_S						Wartość całkowita	446	158	
Wew. Pojemność cieplna P_I						Spec. Moc W/m ²	A_{TFA} m ²	P_I 1 W	P_I 2 W
						1,7	*	367	636
Moc grzewcza (zyski) P_G						$P_T + P_I$	P_G 1 W	P_G 2 W	
								1083	794

Rys. 5.21 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_S , P_I , P_G

Poniżej w formie Rys. 5.22 zostało przedstawione obliczenie pojemności cieplnej P_H oraz pojemności cieplnej specyficznej dla danej powierzchni P_H/A_{TFA} .

							$P_L - P_G$	=	7556	lub	6311	
Pojemność cieplna P_H								=		7556	W	
Pojemność cieplna specyficzna dla danej powierzchni P_H / A_{TFA}								=		20,6	W/m²	
	Maksymalna temp. powietrza nawiewanego	52	°C							°C	°C	
	max. Temperatura powietrza nawiewanego $\vartheta_{Supply,Max}$	52	°C	Supply air temperature without heating			$\vartheta_{Supply,Min}$		-12,2		-6,2	
Dla porównania: obciążenie grzewcze przenoszone przez powietrze nawiewane $P_{Supply Air,Max}$								=	6521	W specific:	17,8	W/m ²
										(Yes/No)		
										Ogrzewanie powietrza nawiewanego: Wystarczające?	No	

Rys. 5.22 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_H i P_H/A_{TFA}

Na podstawie Rys. 5.22 wyznaczono obciążenie cieplne budynku porównując dwa badane scenariusze P1 i P2. Uwzględniona została większa wartość pojemności cieplnej $P_H = 7556$ W, która następnie została podzielona przez powierzchnię użytkową budynku:

$$7556/366,6 = 17,8 \text{ W/m}^2$$

5.3.7. Zapotrzebowanie na ogrzewanie

Kluczowym czynnikiem decydującym o klasie energooszczędności budynku jest jego zapotrzebowanie na ogrzewanie. Zapotrzebowanie określa się wzorem:

$$Q_H = (Q_L - Q_G)/A_{TFA}, \text{ gdzie}$$

$$Q_L = Q_T + Q_V, \text{ gdzie}$$

Q_T – straty przez przenikania ciepła przez przegrody,

Q_V – straty przez wentylację,

Q_G – zyski z promieniowania słonecznego,

Q_I - zyski wewnętrzne.

Poniżej w formie Rys. 5.23 zostało przedstawione obliczenie transmisyjnych strat ciepła Q_T . Wartości przenikania ciepła U przegród zewnętrznych uwzględniają już wyliczone mostki termiczne.

Przegroda budynku	Strefa temperaturowa	Powierzchnia m ²	U W/(m ² K)	Miesięczny czyn. red.	G_t kKh/rok	kWh/rok	Na m ² pow. użytkowej	
Ściana zewnętrzna	A	329,1	0,163	1,00	117	6300	17,19	
Dach	A	240,0	0,120	1,00	117	3381	9,22	
Płyta fundamentowa	B	183,3	0,130	1,00	94	2237	6,10	
Okna	A	67,1	0,934	1,00	117	7356	20,07	
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	0,500	1,00	117	986	2,69	
Obwodowy mostek termiczny (mb)	P	54,1	0,082	1,00	94	416	1,13	
Transmisyjne straty ciepła Q_T						Suma	20675	56,4

Rys. 5.23 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T

Według powyższej kalkulacji, straty ciepła przez przenikanie przez przegrody wynoszą 56,4 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.24 zostało przedstawione obliczenie strat ciepła na skutek wentylacji Q_V .

							A_{TFA} m ²	Wysokość pomieszczenia								
							367	*	2,50	=	m ³ 916					
							$n_{V,system}$ 1/h		η^*_{SHX}		η_{HR}		$n_{V,Res}$ 1/h		$n_{V,equi,fraction}$ 1/h	
							0,336	*	0%		0,00	) +	0,000	=	0,336	
							V_V m ³		$n_{V,equi,fraction}$ 1/h		C_{Air} Wh/(m ³ K)		G_t kWh/a		kWh/a	kWh/(m ² a)
							916	*	0,336	*	0,33	*	117	=	11930	32,5
							Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V									
													Total		11930	32,5

Rys. 5.24 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V

Według standardu PHPP, straty ciepła przez wentylację wynoszą **32,5 kWh/(m²rok)**.

Poniżej w formie Rys. 5.25 zostały przedstawione obliczenia całkowitych strat ciepła Q_L , które stanowią sumę strat ciepła przez wentylację i strat ciepła przez przenikanie przez przegrody.

							Q_T kWh/rok		Q_V kWh/rok		Czynnik redukcyjny noc/weekend oszczędności		kWh/rok		kWh/(m ² rok)
							20675	+	11930	) *	1,0	=	32605		88,9
							Całkowite straty ciepła Q_L								

Rys. 5.25 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L

Całkowite straty ciepła budynku wynoszą $56,4 + 32,5 =$ **88,9 kWh/(m²rok)**.

W następnej kolejności obliczono zyski ciepła z promieniowania słonecznego uwzględniając:

- Czynniki redukcji,
- Współczynnik g okna – określający stopień transmisji ciepła przez szybę okna,
- Powierzchnię okien,
- Wartość promieniowania słonecznego w zależności i orientacji.

Poniżej w formie Rys. 5.26 zostało przedstawione obliczenie dostępnych zysków ciepła od energii słonecznej Q_s .

Orientacja powierzchni	Współczynnik redukcyjny	wartość g	Powierzchnia	Promieniowanie całkowite			
			m ²	kWh/(m ² rok)	=	kWh/rok	
Północ	0,43	* 0,50	* 19,0	* 414	=	1695	
Południe	0,53	* 0,50	* 48,1	* 946	=	12176	
Suma z nieprzeźroczystych przegród						1992	
Dostępne zyski ciepła od energii słonecznej Q_s						Suma	15863
							43,3

Rys. 5.26 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_s

Wyliczona wartość zysków z promieniowania słonecznego wynosi **43,3 kWh/(m²rok)**.

Następnie w formie Rys. 5.27 zostało przedstawione obliczenie wewnętrznych zysków ciepła Q_i .

	Długość okresu grzewczego	Spec. Moc q_i	A_{TFA}		
	kh/d	d/rok	W/m ²	m ²	kWh/rok
Wewnętrzne zyski ciepła Q_i	0,024	* 365	* 2,2	* 366,6	= 7181
					19,6

Rys. 5.27 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_i

Według powyższej kalkulacji wewnętrzne zyski ciepła wynoszą **19,6 kWh/(m²rok)**.

						$Q_L - Q_G =$	kWh/rok	kWh/(m ² rok)
Roczne zapotrzebowanie na ciepła Q_H							15727	42,90
						kWh/(m ² a)	(Tak/Nie)	
Wartość graniczna						15	Wymagania spełnione?	No

Rys. 5.29 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H

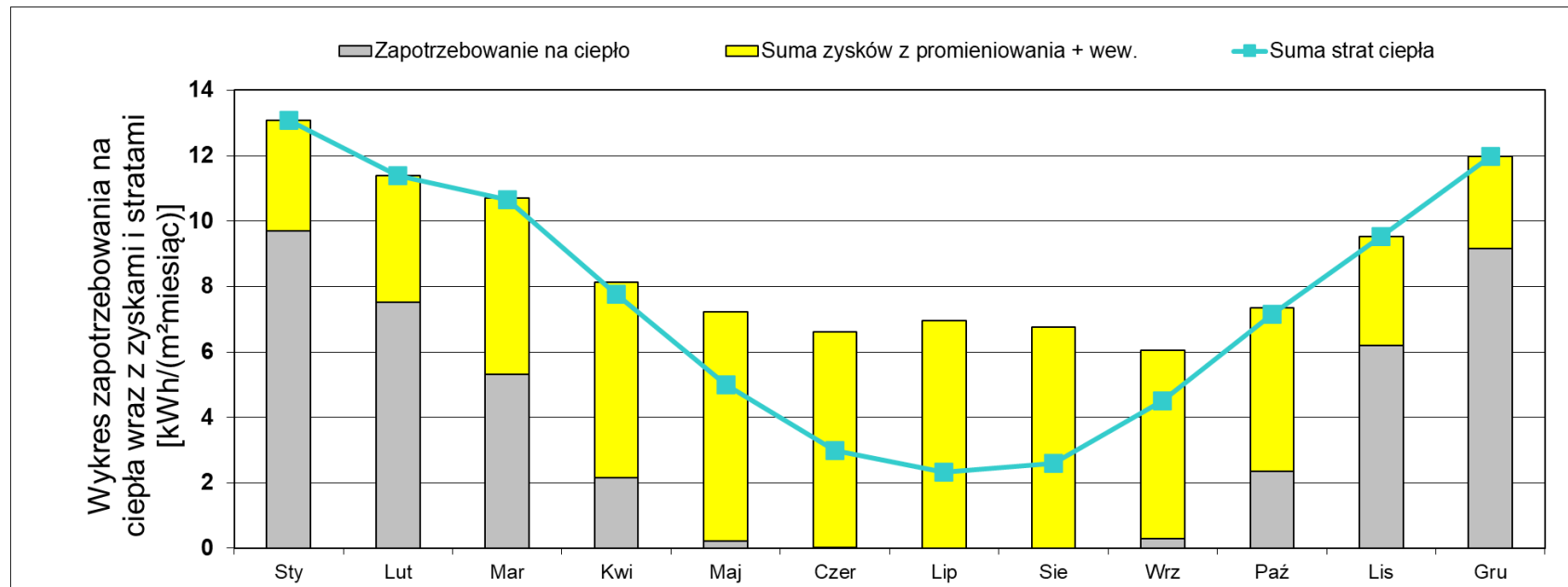
Poniżej w formie Tabela 5.18 przedstawiono szczegółowe rozbiecie w podziale miesięcznym następujących parametrów:

- straty ciepła w podziale miesięcznym,
- zyski z promieniowania słonecznego w zależności od orientacji okien,
- zyski ciepła przez przegrody,
- wewnętrzne zyski ciepła,
- roczne zapotrzebowanie na ogrzewanie,
- zapotrzebowanie na ciepła na m².

Tabela 5.18 – Parametry budynku w podziale miesięcznym potrzebne do wyliczenia zapotrzebowania budynku na ogrzewanie

	Sty.	Lut.	Mar.	Kwi.	Maj	Czer.	Lip.	Sie.	Wrz.	Paź.	Lis.	Gru.	Rok	
Straty przez przenikanie	4515	3902	3605	2579	1584	899	681	794	1508	2449	3293	4143	29953	kWh
Straty przez grunt	279	270	299	270	245	200	173	153	148	172	199	245	2652	kWh
Suma strat ciepła	13,1	11,4	10,7	7,8	5,0	3,0	2,3	2,6	4,5	7,2	9,5	12,0	88,9	kWh/m ²
Zyski ciepła przez promieniowanie - PŁN	30	55	103	174	267	293	289	218	128	76	38	24	1695	kWh
Zyski ciepła przez promieniowanie - PŁD	544	717	1109	1221	1422	1268	1375	1403	1215	1019	527	355	12176	kWh
Zyski ciepła przez przegrody	59	90	156	207	274	267	278	248	180	129	63	40	1992	kWh
Wewnętrzne zyski ciepła	610	551	610	590	610	590	610	610	590	610	590	610	7181	kWh
Suma zysków z promieniowania + wew.	3,4	3,9	5,4	6,0	7,0	6,6	7,0	6,8	5,8	5,0	3,3	2,8	62,9	kWh/m ²
Roczne zapotrzebowanie na ciepło	3551	2760	1944	786	78	6	1	2	105	860	2275	3359	15727	kWh
Zapotrzebowanie na ciepło	9,7	7,5	5,3	2,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	2,3	6,2	9,2	42,9	kWh/m ²

Powyższe dane w postaci zapotrzebowania na ciepło, sumy zysków z promieniowania i zysków wewnętrznych oraz sumy strat ciepła zostały przedstawione na wykresie w postaci Rys. 5.30.



Rys. 5.30 - Wykres słupkowy pokazujący zapotrzebowanie na ciepło wraz z zyskami i stratami ciepła

Na podstawie wartości z powyższego wykresu stwierdza się, że w badanym budynku od listopada do lutego występują zdecydowanie większe straty niż zyski ciepła. Ta różnica musi być bilansowana przez zapotrzebowanie na energię do ciepła, co powoduje, że budynek musi być dodatkowo ogrzewany przez dosyć długi okres w ciągu roku. Ciepłe miesiące od kwietnia do października pokazują natomiast, że budynek może ulec przegrzaniu, ponieważ zyski ciepła zdecydowanie przekraczają straty ciepła, co skłania do refleksji, że w budynku może być potrzebne źródło chłodu.

5.3.8. Roczne zapotrzebowanie na ciepło

Program PHPP liczy także zapotrzebowanie na energię do ogrzewania w ujęciu rocznym, biorąc pod uwagę wskaźniki dla całego roku grzewczego, inaczej niż w poprzednim rozdziale, gdzie rozpatrywane były wartości w każdym miesiącu. Poniżej na Rys. 5.31 wyliczono transmisyjne straty ciepła w wyniku przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne. Wartości przenikania ciepła U przegród zewnętrznych uwzględniają już wyliczone przez arkusz mostki termiczne.

Przegrody budynku		Strefa temp.	Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Czynnik temp. f_t	G_t kKh/rok	=	kWh/rok	na m ² powierzchni użytkowej
Ściana zewnętrzna		A	329,1	0,163	1,00	96,9	=	5200	14,19
Dach		A	240,0	0,120	1,00	96,9	=	2791	7,61
Płyta fundamentowa		B	183,3	0,130	0,68	96,9	=	1574	4,29
Okna		A	67,1	0,934	1,00	96,9	=	6072	16,57
Drzwi zewnętrzne		A	16,8	0,500	1,00	96,9	=	814	2,22
Obwodowy mostek termiczny (mb)		P	54,1	0,082	0,68	96,9	=	292	0,80
Całkowita suma powierzchni			836,2						kWh/(m ² rok)
Transmisyjne straty ciepła Q_T							Suma	16744	45,7

Rys. 5.31 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T

Roczne straty ciepła w wyniku przenikania ciepła przez przegrody wynoszą **45,7 kWh/(m²rok)**.

W następnej kolejności na Rys. 5.32 przedstawiono wyliczenie rocznych strat ciepła budynku przez wentylację Q_v i całkowitych strat ciepła Q_L .

				A_{TFA} m ²	Wysokość pomieszczenia			
					m	=	m ³	
System wentylacji:	Efekt. Objętość powietrza, V_V			366,6	*	2,50	=	916,4
Efekt. Odzysku ciepła	η_{eff}	0%						
Sprawność gruntowego wymiennika ciepła								
Efekt. Odzysku ciepła SHX	η_{SHX}	0%						
	Energooszczędna wymiana powietrza n_V		$n_{V,system}$ 1/h	η_{HR}		$n_{V,Res}$ 1/h		1/h
			0,336	* (1 - 0,00)	+	0,000	=	0,336
		V_V m ³	n_V 1/h	c_{Air} Wh/(m ³ K)		G_t kKh/rok		kWh/rok
Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V		916,4	* 0,336	* 0,33	*	96,9	=	9848
						Czynnik redukcyjny noc/weekend oszczędności		kWh/rok
			Q_T kWh/rok	Q_V kWh/rok				kWh/(m ² rok)
Całkowite straty ciepła Q_L			(16744	+ 9848	)	1,0	=	26592
								72,5

Rys. 5.32 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V i Q_L

Roczne straty ciepła przez wentylację wynoszą 26,9 kWh/(m²rok).

Całkowite straty ciepła budynku będące sumą strat ciepła na skutek wentylacji i transmisyjnych strat ciepła wynoszą **72,5 kWh/(m²rok)**.

W następnej kolejności na Rys. 5.33 pokazano wyliczenie rocznych zysków ciepła z promieniowania słonecznego.

Orientacja powierzchni	Współ. Redukcyjny	wartość g	Powierzchnia	Promieniowanie HP			
			m ²	kWh/(m ² rok)	=	kWh/rok	
Północ	0,43	0,50	18,96	138	=	565	
Południe	0,53	0,50	48,12	462	=	5942	
Dostępne zyski ciepła od energii słonecznej Q_S					Suma	6507	17,8

Rys. 5.33 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S

Roczne zyski ciepła z promieniowania słonecznego wynoszą **17,8 kWh/(m²rok)**.

Następnie na Rys. 5.34 pokazano wyliczenie wewnętrznych zysków ciepła Q_I.

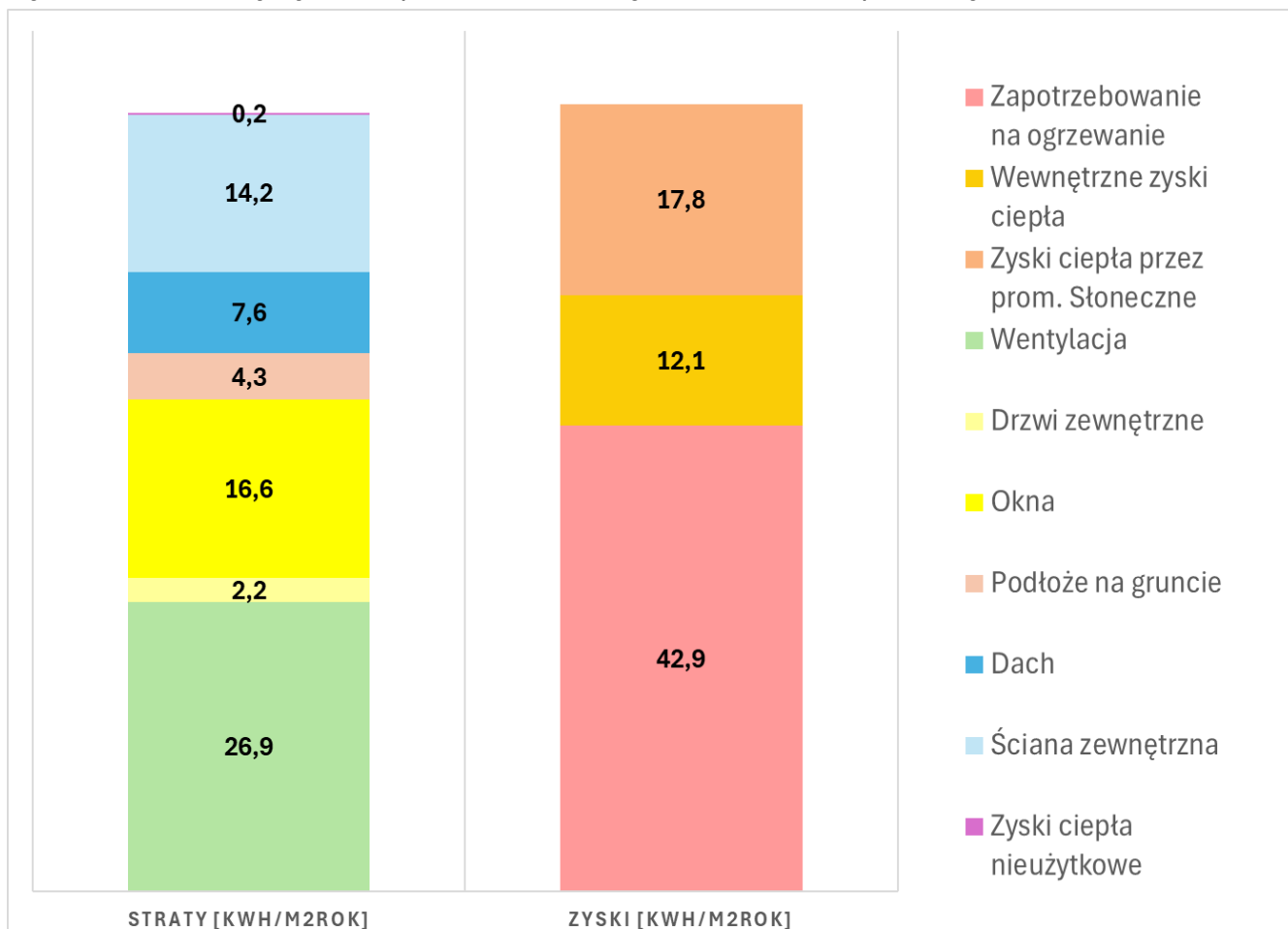
	Długość okresu grzewczego		Spec. Moc	A _{TFA}			
	kh/d	d/rok					W/m ²	m^{2}	kWh/rok	kWh/(m^{2}rok)
Wewnętrzne zyski ciepła	0,024	225	2,24	366,6	=	4423	12,1

Rys. 5.34 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I

Roczne wewnętrzne zyski ciepła budynku wynoszą **12,1 kWh/(m²rok)**.

Następnie na Rys. 5.35 pokazano wyliczenie całkowitych zysków ciepła Q_G.

Poniżej na Rys. 5.37 przedstawiono bilans energetyczny budynku przedstawiający wyliczone w niniejszym akapicie składowe zysków i strat ciepła budynku.



Rys. 5.37 - Bilans energetyczny przedmiotowego budynku

Na podstawie powyższego bilansu energetycznego wnioskuje się, że badany budynek notuje duże straty przez wentylację (26,9 kWh/(m² rok)), przez okna (16,6 kWh/(m² rok)) oraz przez ścianę zewnętrzną (14,2 kWh/(m² rok)), co jest kluczowe w kontekście potrzeby modyfikacji produktu firmy Betard w postaci ściany trójwarstwowej. Wymagane będzie zastosowanie dodatkowej warstwy izolacyjnej, by nie tylko spełnić wymogi budynku pasywnego ($U \leq 0,15$ W/m²K), ale też zniwelować straty ciepła przez przenikanie przez przegrodę. W przedmiotowym budynku należy także zastosować okna o lepszych parametrach termoizolacyjnych oraz zastosować wentylację z odzyskiem ciepła.

5.3.9. Podsumowanie i wnioski

Poniżej dokonano podsumowania wyników symulacji energetycznej dla przedmiotowego budynku w dwóch scenariuszach uwzględniających różną wartość współczynnika przewodzenia ciepła warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej ściany zewnętrznej.

- 1) Dla przedmiotowego budynku ze ścianą zewnętrzną trójwarstwową o wartości współczynnika przewodzenia ciepła warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej $\lambda=0,59$ W/mK

Poniżej w Tabeli 5.19 przedstawiono otrzymane wartości symulacji energetycznej przedmiotowego budynku wraz oceną spełnienia przez nie wymagań budownictwa pasywnego.

Tabela 5.19 - Podsumowanie pokazujące czy spełnione zostały kryteria budownictwa pasywnego

		Powierzchnia użytkowa m ²		Kryterium	Kryterium alternatywne	War. spełniony?
Ogrzewanie przestrzeni	Zapotrzebowanie na ciepło kWh/(m ² rok)	366,6	≤	15	-	nie
	Pojemność cieplna W/m ²	20,61	≤	-	10	nie
Chłodzenie przestrzeni	Zapotrzebowanie na chłód kWh/(m ² rok)	-	≤	-	-	-
	Pojemność chłodu W/m ²	-	≤	-	-	-
Szczelność	Częstotliwość przegrzewania (> 25 °C) %	25,57	≤	10	-	nie
	Częstotliwość zbyt wysokiej wilgotności (> 12 g/kg) %	6,30	≤	20	-	tak
Nieodnawialna energia pierwotna	Wynik testu ciśnieniowego n ₅₀ 1/h	0,34	≤	0,6	-	tak
Odnawialna energia pierwotna	Zapotrzebowanie na energię pierwotną kWh/(m ² rok)	57,55	≤	120	-	tak
	Zapotrzebowanie na energię pierwotną z OZE kWh/(m ² rok)	27,22	≤	-	-	-
	Wytwarzanie energii odnawialnej (w odniesieniu do przewidywanej powierzchni budynku) kWh/(m ² rok)	-	≥	-	-	-

Przedmiotowy budynek składający się ze ścian trójwarstwowych prefabrykowanych produkcji firmy Betard, przy uwzględnieniu współczynnika przewodzenia ciepła λ dla warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej, otrzymanego przy pomocy badania w aparacie płytowym, spełnia aktualne wymagania Warunków Technicznych, jednak nie spełnia wymogów budynku pasywnego. Na podstawie

tabeli podsumowującej, przedstawionej powyżej wynika, że przedmiotowy budynek nie spełnia kryterium budownictwa pasywnego w zakresie:

- maksymalnego zapotrzebowania na ciepło: **42,9 kWh/m²rok** \geq **15 kWh/m²rok** lub obciążenia cieplnego **20,6 W/m²** \geq **10W/m²**;
- częstotliwości przegrzewania się budynku: **25,57%** \geq **10%**;
- współczynnika przenikania ciepła przegrody budynku w postaci ściany zewnętrznej **0,163 W/m²K** \geq **0,15 W/m²K**.

2) Dla wartości współczynnika przewodzenia ciepła warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej $\lambda=1,7$ W/mK

Poniżej w Tabeli 5.20 przedstawiono otrzymane wartości symulacji energetycznej przedmiotowego budynku wraz oceną spełnienia przez nie wymagań budownictwa pasywnego.

Tabela 5.20 – Podsumowanie pokazujące czy spełnione zostały kryteria budownictwa pasywnego

		366,6		Kryterium alternatywne		War. spełniony?
Powierzchnia użytkowa m ²				Kryterium		
Ogrzewanie przestrzeni	Zapotrzebowanie na ciepło kWh/(m ² rok)	43,71	≤	15	-	nie
	Pojemność cieplna W/m ²	20,88	≤	-	10	
Chłodzenie przestrzeni	Zapotrzebowanie na chłód kWh/(m ² rok)	-	≤	-	-	-
	Pojemność chłodu W/m ²	-	≤	-	-	-
	Częstotliwość przegrzewania (> 25 °C) %	25,03	≤	10		nie
	Częstotliwość zbyt wysokiej wilgotności (> 12 g/kg) %	6,30	≤	20		tak
Szczelność	Wynik testu ciśnieniowego n ₅₀ 1/h	0,34	≤	0,6		tak
Nieodnawialna energia pierwotna	Zapotrzebowanie na energię pierwotną kWh/(m ² rok)	57,55	≤	120		tak
	Zapotrzebowanie na energię pierwotną z OZE kWh/(m ² rok)	27,22	≤	-	-	-
Odnawialna energia pierwotna	Wytwarzanie energii odnawialnej (w odniesieniu do przewidywanej powierzchni budynku) kWh/(m ² rok)	-	≥	-	-	

Przedmiotowy budynek składający się ze ścian trójwarstwowych prefabrykowanych produkcji firmy Betard, przy uwzględnieniu współczynnika

przewodzenia ciepła λ dla warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej, wskazanego przez producenta, spełnia aktualne wymogi Warunków Technicznych, jednak nie spełnia wymogów budynku pasywnego. Na podstawie tabeli podsumowującej, przedstawionej powyżej wynika, że przedmiotowy budynek nie spełnia kryterium budownictwa pasywnego w zakresie:

- powierzchni ogrzewanej w zakresie maksymalnej zapotrzebowania na ciepło: **43,71 kWh/m²rok** \geq **15 kWh/m²rok** lub obciążenia cieplnego **20,88 W/m²** \geq **10W/m²**;
- powierzchni chłodzonej w zakresie częstotliwości przegrzewania się budynku: **25,03%** \geq **10%**;
- współczynnika przenikania ciepła przegrody budynku w postaci ściany zewnętrznej **0,172 W/m²K** \geq **0,15 W/m²K**.

5.4. Budynek pasywny – modyfikacja założeń i symulacja energetyczna proponowanego budynku

Na podstawie wykonanej analizy wyników symulacji energetycznej przedmiotowego budynku w akapicie 5.3, należy skupić uwagę na kluczowych parametrach, które nie osiągnęły wymaganych wartości określonych przez standardy budownictwa pasywnego. W pierwszej kolejności należy zmodyfikować grubości warstw w ścianie zewnętrznej, ponieważ dotychczas stosowana izolacja termiczna

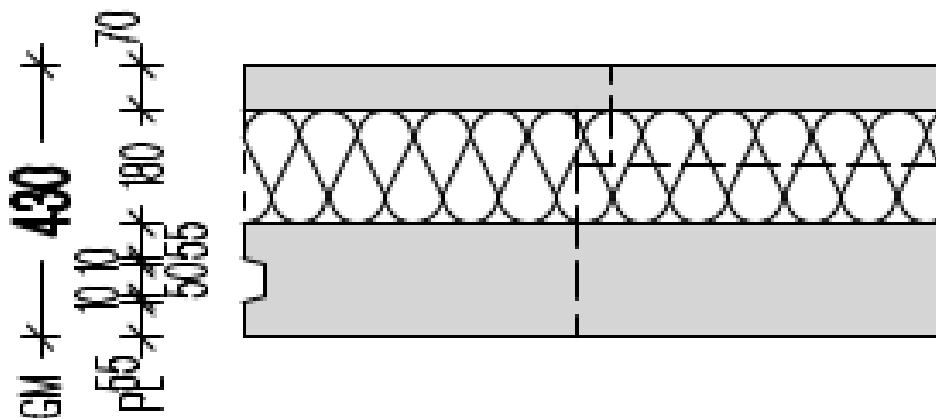
w postaci płyty PIR o grubości 12 cm okazała się niewystarczająca do spełnienia wymaganej wartości współczynnika przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej w budynkach pasywnych. Ponadto szczególną uwagę zwraca częstotliwość przegrzewania się budynku (25% powyżej temperatury 25°C). W tym przypadku należy rozpatrzyć możliwość zastosowania wentylacji nawiewno – wywiewnej z odzyskiem ciepła, która w okresie letnim będzie także mogła chłodzić budynek. Będzie się to niestety wiązało ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną, więc w proponowanym budynku należy także uwzględnić dodatkowe odnawialne źródło ciepła. Wysoka częstotliwość przegrzewania się budynku może być także powiązana ze zbyt wysokim współczynnikiem przenikania ciepła powierzchni szklonej, więc na etapie modyfikacji zostanie także sprawdzona możliwość zmiany okien na te o niższym współczynniku U_g .

5.4.1. Ściana zewnętrzna proponowanego budynku – wdrożenie produktu

Ważny produkt w budynkach kubaturowych firmy Betard stanowi ściana trójwarstwowa złożona z dwóch elementów betonowych – wewnętrznej konstrukcyjnej i zewnętrznej elewacyjnej. Na przestrzeni ostatnich lat, a w szczególności miesięcy, w wyniku zwiększonych restrykcji w zakresie warunków technicznych (WT 2021), a także coraz większej liczby inwestycji na rynku w budynki efektywne energetycznie, firma Betard podjęła kroki w celu modyfikacji i adaptacji swojego produktu do potrzeb rynku. Efektem tych działań jest nowa ściana trójwarstwowa z grubszą niż dotychczas warstwą izolacji termicznej składająca się z następujących części:

- Warstwa nośna żelbetowa – grubość 18 cm,
- Warstwa izolacja z płyty PIR – grubość 18 cm,
- Warstwa elewacyjna żelbetowa – grubość 7 cm.

Na Rys. 5.38 przedstawiono wycinek rzutu ściany trójwarstwowej ze zwiększoną grubością izolacji termicznej.



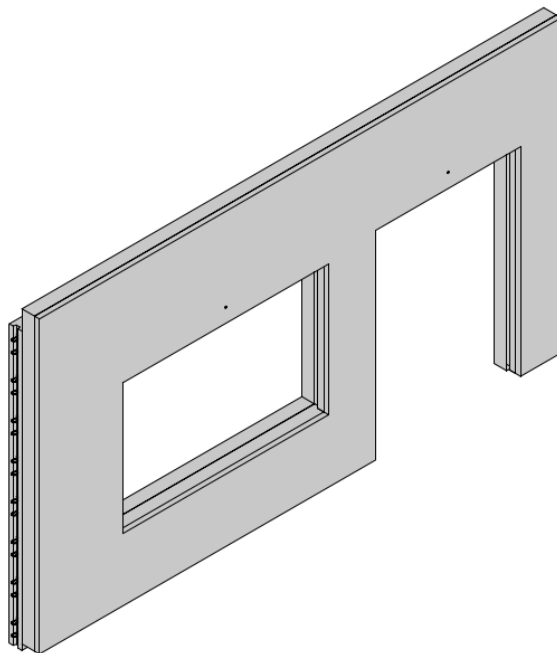
Rys. 5.38 – Wycinek rzutu ściany zewnętrznej

Poniżej na Rys. 5.39 pokazano zdjęcia ściany trójwarstwowej z powiększoną warstwą izolacji termicznej.



Rys. 5.39 – Zdjęcia ściany trójwarstwowej z powiększoną warstwą izolacyjną

Poniżej na Rys. 5.40 pokazano widok ściany trójwarstwowej z otworami okiennymi.



Rys. 5.40 - Widok ściany z otworami okiennymi z widocznymi trzema warstwami

Zmianie uległy grubości poszczególnych warstw w przegrodzie:

- w warstwie konstrukcyjnej z 23 cm na 18 cm,
- w warstwie izolacyjnej z 12 cm na 18 cm,

Na podstawie ww. modyfikacji ściana zwiększyła swoją grubość o 1 cm oraz zmianie uległa także końcowa wartość współczynnika przenikania ciepła tej przegrody. Poniżej pokazano zestawienie warstw w przegrodzie w arkuszu kalkulacyjnym PHPP wraz z wyliczoną grubością przegrody (43 cm) oraz wartością współczynnika przenikania ciepła po uwzględnieniu przejścia oporów cieplnych środowiska wewnętrznej i zewnętrznej.

- 1) Dla wartości współczynnika przewodzenia ciepła warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej $\lambda = 0,59 \text{ W/mK}$

Na Rys. 5.41 przedstawiono warstwy w ścianie zewnętrznej wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła.

Nr przegrody	Opis przegrody					
01ud	Ściana zewnętrzna					
Rodzaj przegrody	2-Wall		Opór przyjmowania ciepła [m ² K/W]			
Przylegająca do	1-Outdoor air		na pow. wewnętrznej R _{si}	0,13		
			na pow. zewnętrznej R _{se}	0,04		
Sekcja 1	λ [W/(mK)]	Sekcja 2 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Sekcja 3 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Grubość [mm]
Warstwa nośna żelbet	0,590					180
Warstwa izolacyjna - płyta PIR	0,022					180
Warstwa elewacyjna żelbetowa	0,590					70
Procent z sekcji 1		Procent z sekcji 2		Procent z sekcji 3		Całkowicie
100%						43,0 cm
Wartość U dodatku			Wartość U: 0,114 W/(m ² K)			

Rys. 5.41 – Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej

Wyliczony współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej o zwiększonej grubości izolacji termicznej wynosi **0,114 W/m²K**.

W wyniku zwiększenia izolacji termicznej w ścianie zewnętrznej zredukowano straty ciepła przez przenikanie z 5200 kWh/rok do 3635 kWh/rok, co zostało przedstawione na Rys. 5.42.

Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Czynnik temp. f _t	G _t kKh/rok	kWh/rok	na m ² pow. użytkowej
329,1	0,114	1,00	96,9	3635	9,92

Rys. 5.42 – Kalkulacja strat ciepła przez ścianę zewnętrzną

W wyniku zwiększenia warstwy izolacji termicznej w ścianie zewnętrznej obniżono straty ciepła z poziomu 14,2 kWh/(m²rok) do wartości 9,9 kWh/(m²rok).

- 2) Dla wartości współczynnika przewodzenia ciepła warstwy konstrukcyjnej i elewacyjnej $\lambda=1,7$ W/mK, tj. wartości katalogowej producenta

Na Rys. 5.43 przedstawiono warstwy w ścianie zewnętrznej wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła.

Nr przegrody	Opis przegrody		Opór przyjmowania ciepła [m ² K/W]		Grubość [mm]	
01ud	Ściana zewnętrzna		na pow. wewnętrznej R _{si} :	0,13		
Rodzaj przegrody	2-Wall		na pow. zewnętrznej R _{se} :	0,04		
Przylegająca do	1-Outdoor air					
Sekcja 1	λ [W/(mK)]	Sekcja 2 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Sekcja 3 (opcjonalna)	λ [W/(mK)]	Grubość [mm]
Warstwa nośna żelbet	1,700					180
Warstwa izolacyjna - płyta PIR	0,022					180
Warstwa elewacyjna żelbetowa	1,700					70
Procent z sekcji 1		Procent z sekcji 2		Procent z sekcji 3		Całkowicie
100%						43,0 cm
Wartość U dodatku		W/(m ² K)		Wartość U:		0,118 W/(m ² K)

Rys. 5.43 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej

Wyliczony współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej o zwiększonej grubości izolacji termicznej wynosi 0,118 W/m²K.

W wyniku zwiększenia izolacji termicznej w ścianie zewnętrznej zredukowano straty ciepła przez przenikanie z 5200 kWh/rok do 3635 kWh/rok, co zostało przedstawione na **Rys. 5.44**.

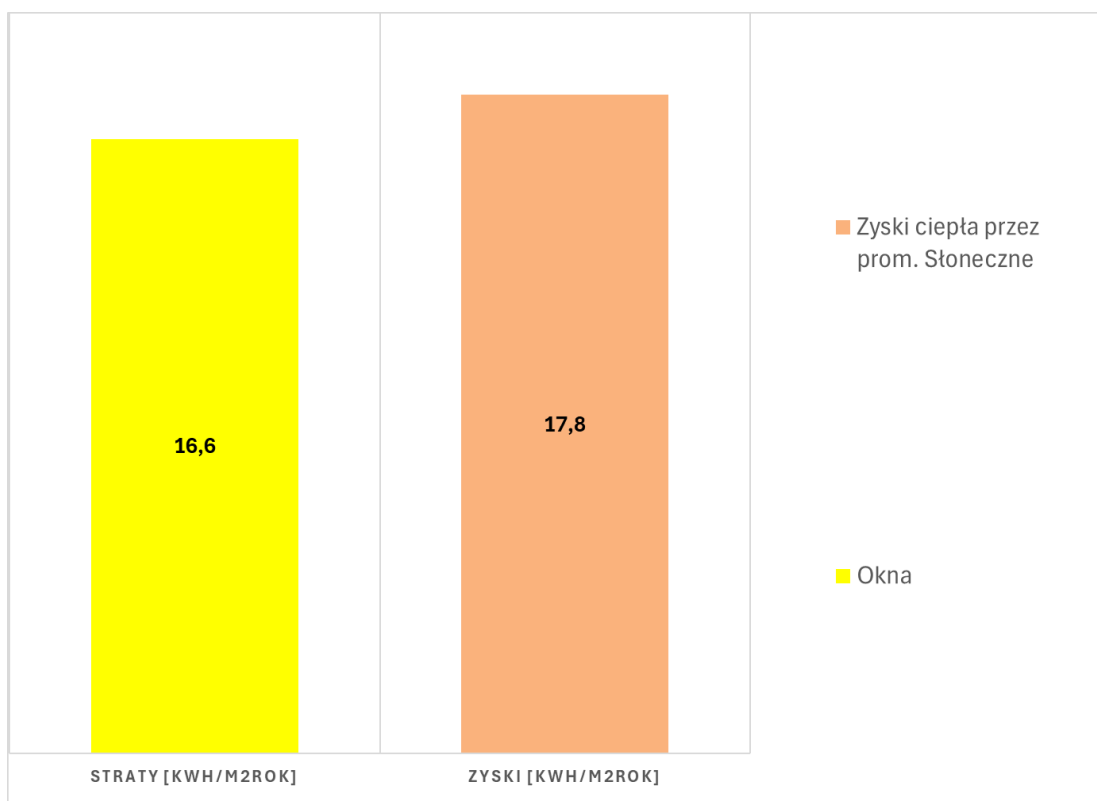
Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Czynnik temp. f _t	G _t kWh/rok	=	kWh/rok	na m ² pow. użytkowej
329,1	0,118	1,00	96,9	=	3755	10,24

Rys. 5.44 – Kalkulacja strat ciepła przez ścianę zewnętrzną

W wyniku zwiększenia warstwy izolacji w ścianie zewnętrznej obniżono straty ciepła z poziomu **15,0 kWh/(m²rok)** do wartości **10,2 kWh/(m²rok)**.

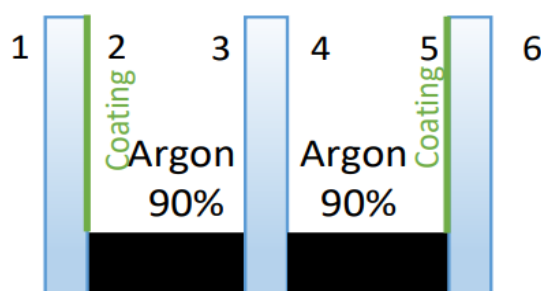
5.4.2. Modyfikacja okien

Największe straty ciepła odnotowane w przedmiotowym budynku następowały poprzez wentylację, a w następnej kolejności poprzez okna. Pomimo zastosowania okien spełniających kryteria standardu pasywnego, przedmiotowy budynek odnotował duże straty ciepła w okresie zimowym, przy jednoczesnych wysokich zyskach ciepła w okresie letnim. Wpłynęło to nie tylko na zbyt wysokie zapotrzebowanie budynku na ciepło, ale także miało znaczenie w zakresie jego przegrzewania się w okresie letnim. Na Rys. 5.45 przytoczono straty i zyski ciepła przez powierzchnie szklone, wyliczone w arkuszu PHPP i pokazane w postaci bilansu energetycznej (Rys. 5.37).



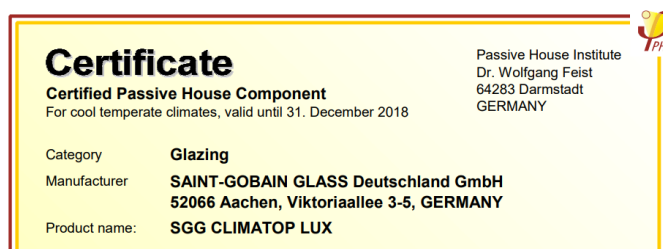
Rys. 5.45 – Wykres strat i zysków ciepła w [kWh/m²rok] przez powierzchnie szklone

W celu ograniczenia strat ciepła, a także jego zysków podjęto próbę znalezienia okien o wyższym współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego g (%), a jednocześnie o niższym współczynniku przenikania ciepła powierzchni szklonej, ale też i samej ramy okiennej. Jako okna dobrano produkt firmy Saint-Gobain model SGG CLIMATOP LUX (4:/18/4/18/:4 Ar 90%), którego przekrój pokazano na Rys. 5.46.



Rys. 5.46 - Przekrój przez oszklenie okna SGG CLIMATOP LUX

Produkt ten jest komponentem posiadającym certyfikat Instytutu Budownictwa Pasywnego w Darmstadt. Poniżej na Rys. 5.47 pokazano wycinek certyfikatu szkła.



Rys. 5.47 - Wycinek certyfikatu okna SGG CLIMATOP LUX

Zgodnie z tabelą zamieszczoną w certyfikacie (Rys. 5.48), współczynnik przenikania ciepła U_g dla tego modelu wynosi $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$, a współczynnik przepuszczalności promieniowanie słonecznego $g = 0,62$.

Thermal quality and solar throughput:

Glazing Profile	U_g (EN 673) [W/(m ² K)]	g (EN 410) [-]
4:/14/4/14/:4 Ar 90%	0,73	0,62
4:/16/4/16/:4 Ar 90%	0,67	0,62
4:/18/4/18/:4 Ar 90%	0,62	0,62

Rys. 5.48 - Wycinek z certyfikatu szyby z wartościami U_g i g

Jako ramę okienną dobrano produkt Aluprof S.A. model MB-104 Passive Aero. Certyfikat tego komponentu został przedstawiony na Rys. 5.49.



Rys. 5.49 - Wycinek certyfikatu ramy okiennej

Zgodnie z tabelą zamieszczoną w certyfikacie (Rys. 5.50), współczynnik przenikania ciepła ramy U_f dla tego modelu wynosi $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Folgende Kennwerte wurden ermittelt:

	U _f -Wert [W/(m ² K)]	Breite [mm]	Ψ _g [W/(mK)]	f _{Rsi=0,25} [-]
Abstandhalter			ULTIMATE Swisspacer*	
Unten	0,71	150	0,024	0,78
Seitlich/oben	0,71	150	0,024	

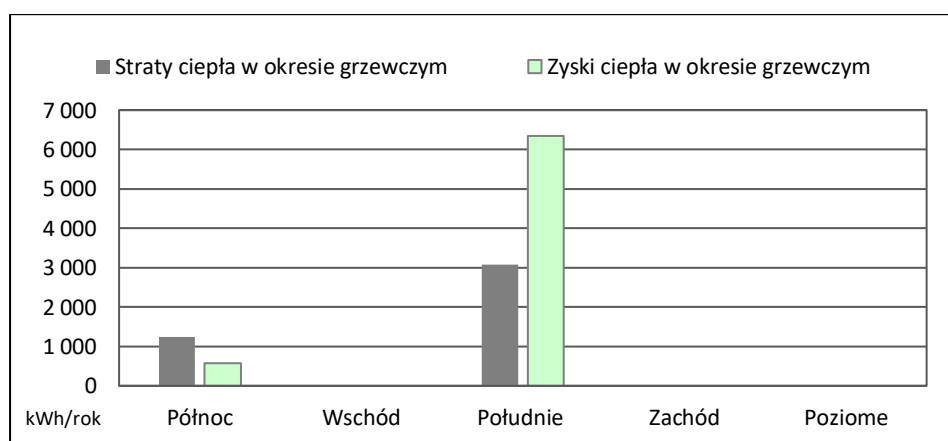
Rys. 5.50 - Wycinek certyfikatu komponentu wraz ze współczynnikiem przenikania ciepła

W Tabeli 5.21 zestawiono współczynnik g okien, współczynnik redukcji nasłonecznienia, sumaryczną powierzchnię okien, powierzchnię oszklenia oraz średnią całkowitą wartość promieniowania słonecznego w ciągu roku.

Tabela 5.21 - Zestawienie z danymi dotyczącymi przeszkleń w budynku z ulepszonymi oknami i ramą okienną

Orientacja okien	współczynnik g	Współczynnik redukcji napromieniowania słonecznego	Powierzchnia okien m ²	Powierzchnia przeszkleń m ²	Śr. całkowita wartość promieniowania kWh/(m ² rok)
Północ	0,62	0,29	18,96	10,14	140
Południe	0,62	0,45	48,12	31,87	462

W arkuszu zostały także wskazane dane pokazujące wartość strat i zysków w wyniku przenikania ciepła przez przegrody szklone w okresie grzewczym wyrażone w kWh/rok. Wartości te zostały przedstawione w formie wykresu na Rys. 5.51.



Rys. 5.51 - Podsumowanie strat i zysków ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone w kWh/rok

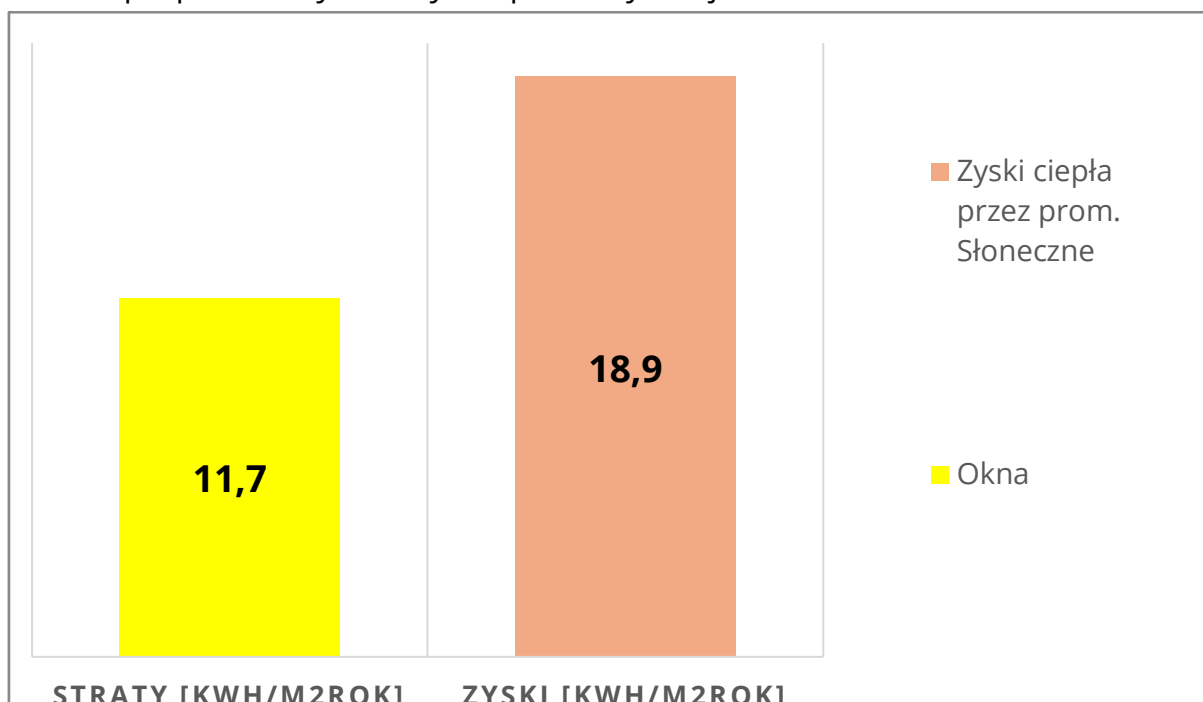
W porównaniu do wykresu przedstawionego na Rys. 5.18, dzięki zastosowaniu oknom o wyższym współczynniku g, zyski ciepła z promieniowania słonecznego nieznacznie wzrosły, natomiast znacząco (o około 30%) zredukowano straty ciepła w okresie zimowym i letnim.

W wyniku zwiększenia izolacji termicznej w ścianie zewnętrznej zredukowano straty ciepła przez przenikanie z 6072 kWh/rok do 4305 kWh/rok, co zostało przedstawione na Rys. 5.52.

Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Czynnik temp. f _t	G _t kKh/rok	G _t kWh/rok	na m ² pow. użytkowej
67,1	0,662	1,00	96,9	4305	11,74

Rys. 5.52 – Kalkulacja strat ciepła przez okna

Na Rys. 5.53 przedstawiono bilans energetyczny w zakresie zysków strat przez okna w proponowanym budynku po modyfikacji doboru okien.



Rys. 5.53 - Wykresy słupkowe zysków i strat ciepła przez okna w proponowanym budynku [kWh/m²rok]

W wyniku doboru innego oszklenia i ramy okiennej o lepszych parametrach izolacyjnych i wyższym współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego, udało się obniżyć straty ciepła z poziomu 16,6 kWh/(m²rok) do wartości 11,7 kWh/(m²rok), a także zwiększono zyski ciepła z poziomu 17,8 kWh/(m²rok) do wartości 18,9 kWh/(m²rok).

5.4.3. Dobór wentylacji nawiewno – wywiewnej z odzyskiem ciepła

Zgodnie z analizą i badaniami poczynionymi w rozdziale 5.3.5, a także z wysnutymi na tej podstawie wnioskami, w proponowanym budynku rekomenduje się zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła. Wybrany model jednostki odzyskującej ciepło to Duplex-S 1100 Flex. Jest to produkt posiadający certyfikat komponentu rekomendowanego przez Passive House Institute w Darmstadt (**Rys. 5.54**), o sprawności 89%, przeznaczony dla przepływu powietrza 250-700 m³/h (projektowana wartość w budynku to 400 m³/h).



Rys. 5.54 - Wycinek certyfikatu komponentu

Poniżej na Rys. 5.55 przedstawiono kalkulację strat ciepła w ujęciu rocznym przez wentylację z odzyskiem ciepła.

			A_{TFA}	\times	wysokość pomieszczenia				
			m ²		m				m ³
System wentylacji:	Efekt. Objętość powietrza, V_V		366,6	*	2,50	=			916,4
Efekt. Odzysku ciepła	η_{eff}	89%							
Sprawność gruntowego wymiennika ciepła	η_{SHX}	31%							
Efekt. Odzysku ciepła SHX									
	Energooszczędna wymiana powietrza n_V	$n_{V,system}$		η_{HR}	$n_{V,Res}$				
		1/h	0,336	*	(1 - 0,92)	+	0,010	=	0,035
	V_V	n_V		C_{Air}	G_V				
	m ³	1/h		Wh/(m ³ K)	kKh/rok				
Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V	916,4	*	0,035	*	0,33	*	96,9	=	1040
									kWh/(m ² rok)
									2,8

Rys. 5.55 – Wycinek z kalkulacją strat ciepła przez wentylację w proponowanym budynku

Dzięki zastosowaniu wentylacji z odzyskiem ciepła, będącej komponentem certyfikowanym o sprawności 89%, znacząco obniżono straty ciepła przez wentylację o niemal 85% z poziomu **26,9 kWh/m²rok** do wartości **2,8 kWh/m²rok**.

5.4.4. Obciążenie cieplne budynku

W wyniku zastosowanych zmian postanowiono ponownie obliczyć obciążenie cieplne budynku. Poniżej pokazano sposób kalkulacji mocy cieplnej budynku w podziale na dwa scenariusze P1 i P2 gdzie P1 dotyczy przedstawia scenariusz dla zimnego dnia z bezchmurnym niebem, a P2 to dzień zimowy o umiarkowanie niskiej temperaturze i zachmurzonym niebem. Poniżej w formie **Rys. 5.56** zostało przedstawione obliczenie obciążenia cieplnego P_T , pojemności cieplnej wentylacji P_V oraz całkowitej pojemności cieplnej P_L w budynku dla systemu wentylacji.

Przeграда budynku	Strefa temperatury	Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Wskaźnik zawsze 1 (oprócz "X")	Różnica temp. 1 K	Różnica temp. 2 K	PT 1 W	PT 2 W		
Ściana zewnętrzna	A	329,1	0,114	1,00	32,2	26,2	1208	983		
Dach	A	240,0	0,120	1,00	32,2	26,2	928	755		
Płyta fundamentowa	B	183,3	0,130	1,00	14,4	14,4	344	344		
Okna	A	67,1	0,662	1,00	32,2	26,2	1431	1165		
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	0,500	1,00	32,2	26,2	271	220		
Obciążenie cieplne P_T							Całkowicie =	4267	lub	3552
System wentylacji:		Efekt. Objętość powietrza, V _V		A _{TFA} m ²	Wysokość pomieszczenia m	m ³				
				366,6	2,50	= 916				
Efekt. Odzysku ciepła wymiennika ciepła		η _{HR}	Efekt. Odzysku ciepła SHX		η _{SHX 1}	Efekt. Odzysku ciepła SHX		η _{SHX 2}		
		89%			100%			63%	lub	54%
Energoszczędna wymiana powietrza n _V		n _{V,RES} (Pojemność cieplna) 1/h	n _{V,SYSTEM} 1/h	Φ _{IP}	Φ _{IP}			1/h		
		0,025	+ 0,336	*(1- 0,96	or 0,95	)=		0,039	lub	0,042
Pojemność cieplna wentylacji P_V		V _V m ³	n _V 1/h	n _V 1/h	c _{Air} Wh/(m ³ K)	Różnica temp. 1 K	Różnica temp. 2 K	P _V 1 W	P _V 2 W	
		916,4	* 0,039	or 0,042	* 0,33	* 32,2	or 26,2	= 382	lub	336
Całkowita pojemność cieplna P_L							P _T + P _V =	4649	or	3888
							PL 1 W		PL 2 W	

Rys. 5.56 – Wycinek z PHPP z kalkulacją P_T, P_V, P_L

Całkowita pojemność cieplna wyniosła odpowiednio 4649 W dla scenariusza P1 oraz 3888 dla scenariusza P2.

Poniżej w formie **Rys. 5.57** zostało przedstawione obliczenie mocy grzewczej energii P_s , wewnętrznej pojemności cieplnej P_i oraz mocy grzewczej P_G . Te parametry stanowią zyski cieplne z promieniowania słonecznego i wewnętrznych zysków ciepła, które zostaną odjęte od całkowitej pojemności cieplnej.

Orientacja powierzchni	Powierzchnia m^2	wartość g	Współ. Redukcyjny	Promieniowanie 1 W/m^2	Promieniowanie 2 W/m^2	P_T 1 W	P_T 2 W
Połnoc	19,0	0,6	0,35	12	5	47	22
Południe	48,1	0,6	0,46	31	11	427	145
Moc grzewcza energii słonecznej P_s						Total =	474 or 167
Wew. Pojemność cieplna P_i				Spec. Moc W/m^2	A_{TFA} m^2	P_i 1 W	P_i 2 W
				1,7	367	636	636
Moc grzewcza (zyski) P_G						P_G 1 W	P_G 2 W
						$P_T + P_i$ =	1110 or 804

Rys. 5.57 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_s , P_i , P_G

Poniżej w formie Rys. 5.58 zostało przedstawione obliczenie pojemności cieplnej P_H oraz pojemności cieplnej specyficznej dla danej powierzchni P_H/A_{TFA} .

	$P_L - P_G$	=	3539	or	3084	
Pojemność cieplna P_H		=	3539			W
Pojemność cieplna specyficzna dla danej powierzchni P_H / A_{TFA}		=	9,7			W/m ²
Maksymalna temp. powietrza nawiewanego	52	°C				
max. Temperatura powietrza nawiewanego $\vartheta_{Supply,Max}$	52	°C	Temperatura powietrza nawiewanego bez ogrzew	$\vartheta_{Supply,Min}$	18,7	°C
					18,7	°C
Dla porównania: obciążenie grzewcze przenoszone przez powietrze nawiewane P_{Su}		=	3383	W specific:	9,2	W/m ²
				Ogrzewanie powietrza nawiewanego: Wystarczające?	Tak/Nie	No

Rys. 5.58 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_H i P_H/A_{TFA}

Na podstawie Rys. 5.58 wyznaczono obciążenie cieplne budynku porównując dwa badane scenariusze P1 i P2. Uwzględniona została większa wartość $P_H = 3539$ W, która następnie została podzielona przez powierzchnię użytkową budynku:

$$3539/366,6 = 9,7 \text{ W/m}^2$$

Wartość ta minimalnie spełnia warunek alternatywny dotyczący maksymalnej pojemności cieplnej budynku $\geq 10 \text{ W/m}^2$.

5.4.5. Zapotrzebowanie na ogrzewanie w proponowanym budynku

Kluczowym czynnikiem decydującym o klasie energooszczędności budynku jest jego zapotrzebowanie na ogrzewanie. Zapotrzebowanie określa się wzorem:

$$Q_H = (Q_L - Q_G)/A_{TFA}, \text{ gdzie}$$

$Q_L = Q_T + Q_v$, gdzie

Q_T – straty przez przenikania ciepła przez przegrody,

Q_v – straty przez wentylację,

Q_G – zyski z promieniowania słonecznego,

Q_i – zyski wewnętrzne.

Poniżej w formie **Rys. 5.59** zostało przedstawione obliczenie transmisyjnych strat ciepła Q_T .

Przegroda budynku	Strefa temperaturowa	Powierzchnia m ²	U W/(m ² K)	Miesięczny czyn. red.	G_t kKh/rok	=	kKh/rok	Na m ² pow. użytkowej	
Ściana zewnętrzna	A	329,1	0,114	1,00	111	=	4149	11,32	
Dach	A	240,0	0,120	1,00	111	=	3186	8,69	
Płyta fundamentowa	B	183,3	0,130	1,00	75	=	1794	4,89	
Okna	A	67,1	0,662	1,00	111	=	4914	13,41	
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	0,500	1,00	111	=	929	2,54	
Obwodowy mostek termiczny (mb)	P	54,1	0,082	1,00	75	=	333	0,91	
Transmisyjne straty ciepła Q_T							Suma	15306	41,8

Rys. 5.59 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T

Według powyższej kalkulacji, straty ciepła przez przenikanie przez przegrody wynoszą 41,8 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.60 zostało przedstawione obliczenie strat ciepła na skutek wentylacji Q_v .

			A_{TFA} m ²	*	vysokość pomieszczenia m	=	m ³	
	Efekt. Objętość powietrza, V_V		367		2,50		916	
		$n_{V,system}$ 1/h		*	η^{*SHX}			
	Efektywna krotność wymiany powietrza otoczenia $n_{V,e}$	0,336		*	(1 - 100%)			
	Efektywna krotność wymiany powietrza gruntowego $n_{V,g}$	0,336		*	(1 - 100%)			
				*	η_{HR}			
				*	(1 - 0,89)			
				+	$n_{V,Res}$ 1/h		0,010	
				=			0,010	
								$n_{V,equi,fraction}$ 1/h
								0,037
		V_V m ³		*	$n_{V,equi,fraction}$ 1/h			
	Straty wentylacyjne otoczenia Q_V	916		*	0,010			
	Straty wentylacyjne przez grunt $Q_{V,e}$	916		*	0,037			
				*	C_{Air} Wh/(m ³ K)			
				*	0,33			
				*	G_t kKh/rok			
				*	111			
				=			341	
								kWh/rok
								0,9
								kWh/(m ² rok)
								2,4
	Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V						Suma	
							1219	
								3,3

Rys. 5.60 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V

Na podstawie powyższych wyliczeń, straty ciepła przez wentylację wynoszą 3,3 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.61 zostało przedstawione obliczenie całkowitych strat ciepła Q_L .

		Q_T kWh/rok		Q_V kWh/rok		Czynnik redukcyjny noc/weekend oszczędności		kWh/rok		kWh/(m ² rok)
	Całkowite straty ciepła Q_L	(15306	+	1219	)	1,0	=	16525		45,1

Rys. 5.61 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L

Całkowite straty ciepła budynku wynoszą 41,8 + 3,3 = 45,1 kWh/(m²rok).

W następnej kolejności program wylicza zyski ciepła z promieniowania słonecznego uwzględniając:

- Czynniki redukcji,
- Współczynnik g okna – określający stopień transmisji ciepła przez szybę okna,
- Powierzchnię okien,
- Wartość promieniowania słonecznego w zależności i orientacji.

Poniżej w formie Rys. 5.62 zostało przedstawione obliczenie dostępnych zysków ciepła od energii słonecznej Q_s .

Orientacja powierzchni	Współczynnik redukcyjny	wartość g	Powierzchnia promieniowanie całkowita				
			m^2	$kWh/(m^2rok)$	=	kWh/rok	
Północ	0,35	0,62	19,0	222	=	906	
Południe	0,46	0,62	48,1	631	=	8686	
Suma z nieprzeźroczystych przegród						1071	
Dostępne zyski ciepła od energii słonecznej Q_s						Suma	10663
							29,1

Rys. 5.62 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_s

Wyliczona wartość zysków z promieniowania słonecznego wynosi 29,1 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.63 zostało przedstawione obliczenie wewnętrznych zysków ciepła Q_i .

	kh/d	Długość okresu grzewczego	Spec. Moc q_i	A_{TFA}		
		d/rok	W/m^2	m^2	=	kWh/rok
Wewnętrzne zyski ciepła Q_i	0,024	273	2,2	366,6	=	5371
						14,7

Rys. 5.63 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_i

Według powyższej kalkulacji wewnętrzne zyski ciepła wynoszą 14,7 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.64 zostało przedstawione obliczenie zysków ciepła Q_G .

	Darmowe ciepła Q_F	$Q_S + Q_I =$	kWh/rok 16034	kWh/(m ² rok) 43,7
	Współczynnik zysków ciepła do strat	$Q_F / Q_L =$	0,97	
	Współczynnik wykorzystania zysków ciepła η_G	$=$	75,40%	
Zyski ciepła Q_G		$\eta_G * Q_F =$	kWh/rok 12090	kWh/(m ² rok) 33,0

Rys. 5.64 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G

Sumę zysków ciepła w postaci 43,7 kWh/(m²rok) pomnożono przez współczynnik wykorzystania zysków ciepła, który według wyliczeń programu dla badanego budynku wynosi 75%. W związku z powyższym, ostateczna wartość zysków ciepła wynosi:

$$75,40\% * 16034 \text{ kWh/(rok)} = 12090 \text{ kWh/(rok)} \rightarrow 33,0 \text{ kWh/(m}^2\text{rok)}$$

Następnie wyliczono różnicę pomiędzy stratą a zyskiem ciepła:

$$16525 - 12090 = 4435 \text{ kWh/(rok)} \rightarrow 12,10 \text{ kWh/(m}^2\text{rok)}$$

12,10 kWh/(m² * rok) ≤ 15,0 kWh/(m² * rok)

Uzyskana wartość spełnia wymogi dla budynku standardu pasywnego.

Na Rys. 5.65 przedstawiono wycinek z arkusza PHPP z wyliczeniem rocznego zapotrzebowania na ciepła Q_H .

Roczne zapotrzebowanie na ciepła Q_H	$Q_L - Q_G =$	kWh/rok 4435	kWh/(m ² rok) 12,10
Wartość graniczna		kWh/(m ² rok) 15	Requirement met? Yes (Yes/No)

Rys. 5.65 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H

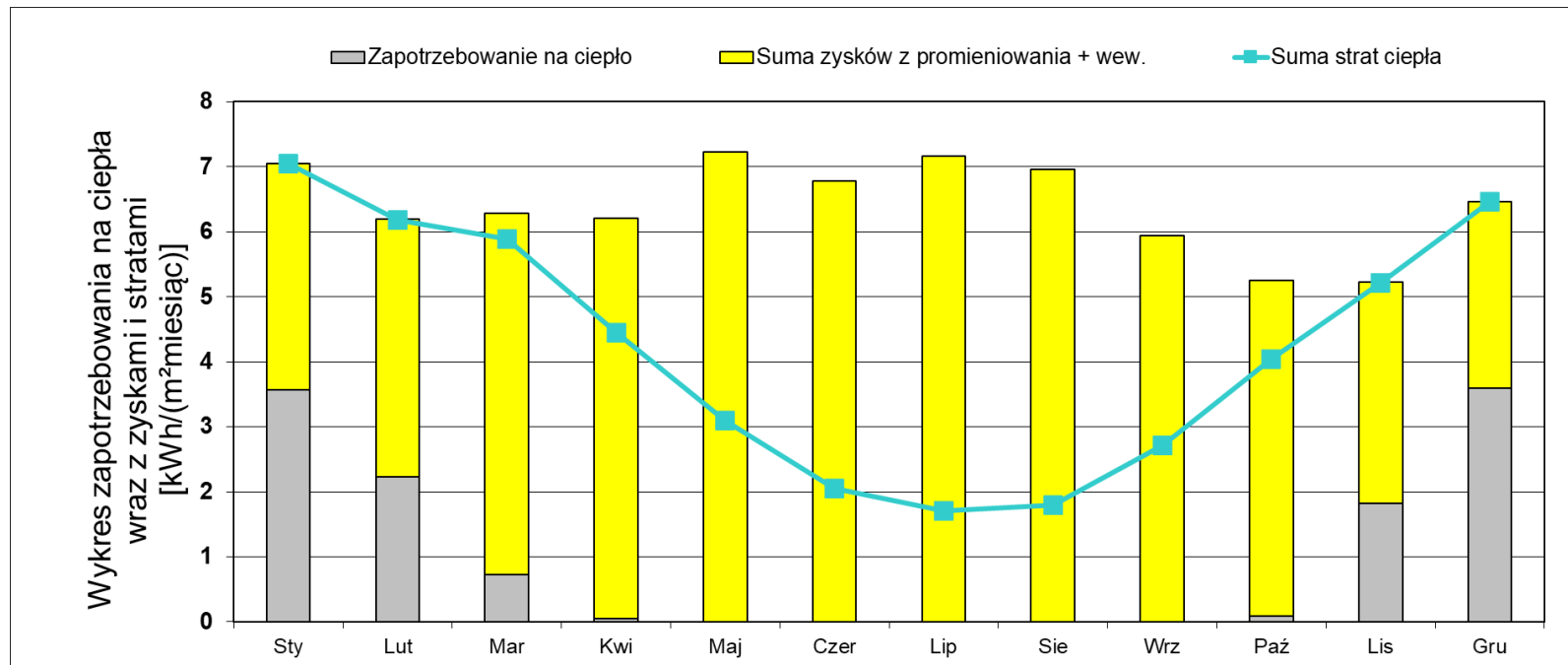
Poniżej w formie Tabela 5.22 przedstawiono szczegółowe rozbiecie w podziale miesięcznym następujących parametrów:

- straty ciepła w podziale miesięcznym,
- zyski z promieniowania słonecznego w zależności od orientacji okien,
- wewnętrzne zyski ciepła,
- roczne zapotrzebowanie na ogrzewanie

Tabela 5.22 – Parametry budynku w podziale miesięcznym potrzebne do wyliczenia zapotrzebowania budynku na ogrzewanie

	Sty.	Lut.	Mar.	Kwi.	Maj	Czer.	Lip.	Sie.	Wrz.	Paź.	Lis.	Gru.	Rok	
Straty przez przenikanie	2204	1905	1762	1265	790	457	353	407	750	1208	1614	2022	14736	kWh
Straty przez grunt	379	360	398	367	345	296	272	253	244	272	296	345	3827	kWh
Suma strat ciepła	7,0	6,2	5,9	4,5	3,1	2,1	1,7	1,8	2,7	4,0	5,2	6,5	50,6	kWh/m ²
Zyski ciepła przez promieniowanie - PŁN	30	55	104	177	271	297	293	222	129	77	38	24	1719	kWh
Zyski ciepła przez promieniowanie - PŁD	582	767	1185	1304	1518	1353	1468	1498	1298	1090	564	380	13005	kWh
Zyski ciepła przez przegrody	52	80	139	186	249	242	252	224	161	114	56	35	1789	kWh
Wewnętrzne zyski ciepła	610	551	610	590	610	590	610	610	590	610	590	610	7181	kWh
Suma zysków z promieniowania + wew.	3,5	4,0	5,6	6,2	7,2	6,8	7,2	7,0	5,9	5,2	3,4	2,9	64,6	kWh/m ²
Roczne zapotrzebowanie na ciepło	1310	819	265	20	0	0	0	0	0	33	669	1318	4435	kWh
Zapotrzebowanie na ciepło	3,6	2,2	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,8	3,6	12,1	kWh/m ²

Powyższe dane w postaci zapotrzebowania na ciepło, sumy zysków z promieniowania i zysków wewnętrznych oraz sumy strat ciepła zostały przedstawione na wykresie w postaci Rys. 5.66.



Rys. 5.66 - Wykres słupkowy pokazujący zapotrzebowanie na ciepło wraz z zyskami i stratami ciepła

Powyższy wykres słupkowy przedstawia, że w badanym budynku od listopada do marca występują większe straty niż zyski ciepła. Ta różnica musi być bilansowana przez zapotrzebowanie na energię do wytworzenia ciepła, co powoduje, że budynek musi być dodatkowo

ogrzewany przez ten okres w ciągu roku. Ciepłe miesiące od kwietnia do października pokazują natomiast, że budynek może ulec przegrzaniu, ponieważ zyski ciepła zdecydowanie przekraczają straty ciepła.

5.4.6. Roczne zapotrzebowanie na ciepło w proponowanym budynku

Poniżej na Rys. 5.67 wyliczono transmisyjne straty ciepła w wyniku przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne.

Przegrody budynku	Strefa temp.	Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Czynnik temp. f _t	G _t kKh/rok	kWh/rok	Na m ² na m ² pow. użytkowej	
Ściana zewnętrzna	A	329,1	0,114	1,00	96,9	3635	9,92	
Dach	A	240,0	0,120	1,00	96,9	2791	7,61	
Płyta fundamentowa	B	183,3	0,130	0,68	96,9	1574	4,29	
Okna	A	67,1	0,662	1,00	96,9	4305	11,74	
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	0,500	1,00	96,9	814	2,22	
Obwodowy mostek termiczny (mb)	P	54,1	0,082	0,68	96,9	292	0,80	
Total of all building envelope areas		836,2					kWh/(m ² rok)	
Transmisyjne straty ciepła QT						Suma	13869	37,8

Rys. 5.67 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T

Roczne straty ciepła w wyniku przenikania ciepła przez przegrody wynoszą 37,8 kWh/(m²rok).

W następnej kolejności na Rys. 5.68 pokazano wyliczenie rocznych strat ciepła budynku przez wentylację Q_v i całkowitych strat ciepła Q_L.

System wentylacji: Efekt. Odzysku ciepła Sprawność gruntowego wymiennika ciepła Efekt. Odzysku ciepła SHX	Efekt. Objętość powietrza, V_V	A_{TFA} m ²	h m	m^3		
	η_{eff}	366,6	2,50	916,4		
	η_{SHX}	89%				
Energooszczędna wymiana powietrza n_V	$n_{V,system}$ 1/h	η_{HR}	$n_{V,Res}$ 1/h			
	0,336	0,92	0,010	0,035		
Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V	V_V m ³	n_V 1/h	c_{Air} Wh/(m ³ K)	G_t kKh/rok	kWh/rok	kWh/(m ² rok)
	916,4	0,035	0,33	96,9	1040	2,8
Całkowite straty ciepła Q_L	Q_T kWh/rok	Q_V kWh/rok	Czynnik redukcyjny noc/weekend oszczędności		kWh/rok	kWh/(m ² rok)
	(13869	+ 1040)	1,0		= 14909	40,7

Rys. 5.68 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V i Q_L

Roczne straty ciepła przez wentylację wynoszą 2,8 kWh/(m²rok).

Całkowite straty ciepła budynku wynoszą: 37,8 + 2,8 = **40,7 kWh/(m²rok)**.

W następnej kolejności na Rys. 5.69 pokazano wyliczenie rocznych zysków ciepła z promieniowania słonecznego.

Orientacja powierzchni	Współ. Redukcyjny	g-Value (perp. radiation)	Powierzchnia m ²	Promieniowanie HP kWh/(m ² rok)	kWh/rok	kWh/(m ² a)	
Połnoc	0,35	0,62	18,96	140	571		
Południe	0,46	0,62	48,12	462	6349		
Dostępne zyski ciepła od energii słonecznej Q_S					Total	6920	18,9

Rys. 5.69 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S

Roczne zyski ciepła z promieniowania słonecznego wynoszą 18,9 kWh/(m²rok).

Następnie na Rys. 5.70 pokazano wyliczenie wewnętrznych zysków ciepła Q_i.

	kh/d	Długość okresu grzewczego d/rok	Spec. Moc W/m ²	A _{TFA} m ²	kWh/rok	kWh/(m ² rok)
Wewnętrzne zyski ciepła Q_i	0,024	225	2,24	366,6	4423	12,1

Rys. 5.70 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_i

Roczne wewnętrzne zyski ciepła budynku wynoszą 12,1 kWh/(m²rok).

Następnie na Rys. 5.71 pokazano wyliczenie zysków ciepła Q_G.

	Free heat Q_F	$Q_S + Q_I =$	<input type="text" value="11343"/>	<input type="text" value="30,9"/>
	Ratio of free heat to losses	$Q_F / Q_V =$	<input type="text" value="0,76"/>	
Utilisation factor heat gains h_G		$(1 - (Q_F / Q_L)^5) / (1 - (Q_F / Q_L)^6) =$	<input type="text" value="92,44%"/>	
Zyski ciepła Q_G		$\eta_G * Q_F =$	<input type="text" value="10485"/>	<input type="text" value="28,6"/>

Rys. 5.71 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G

Całkowite zyski ciepła budynku, uwzględniając współczynnik wykorzystania zysków ciepła wynoszą:

92,44% * 11343 = 10485 kWh/(rok) → **28,6 kWh/(m²rok)**

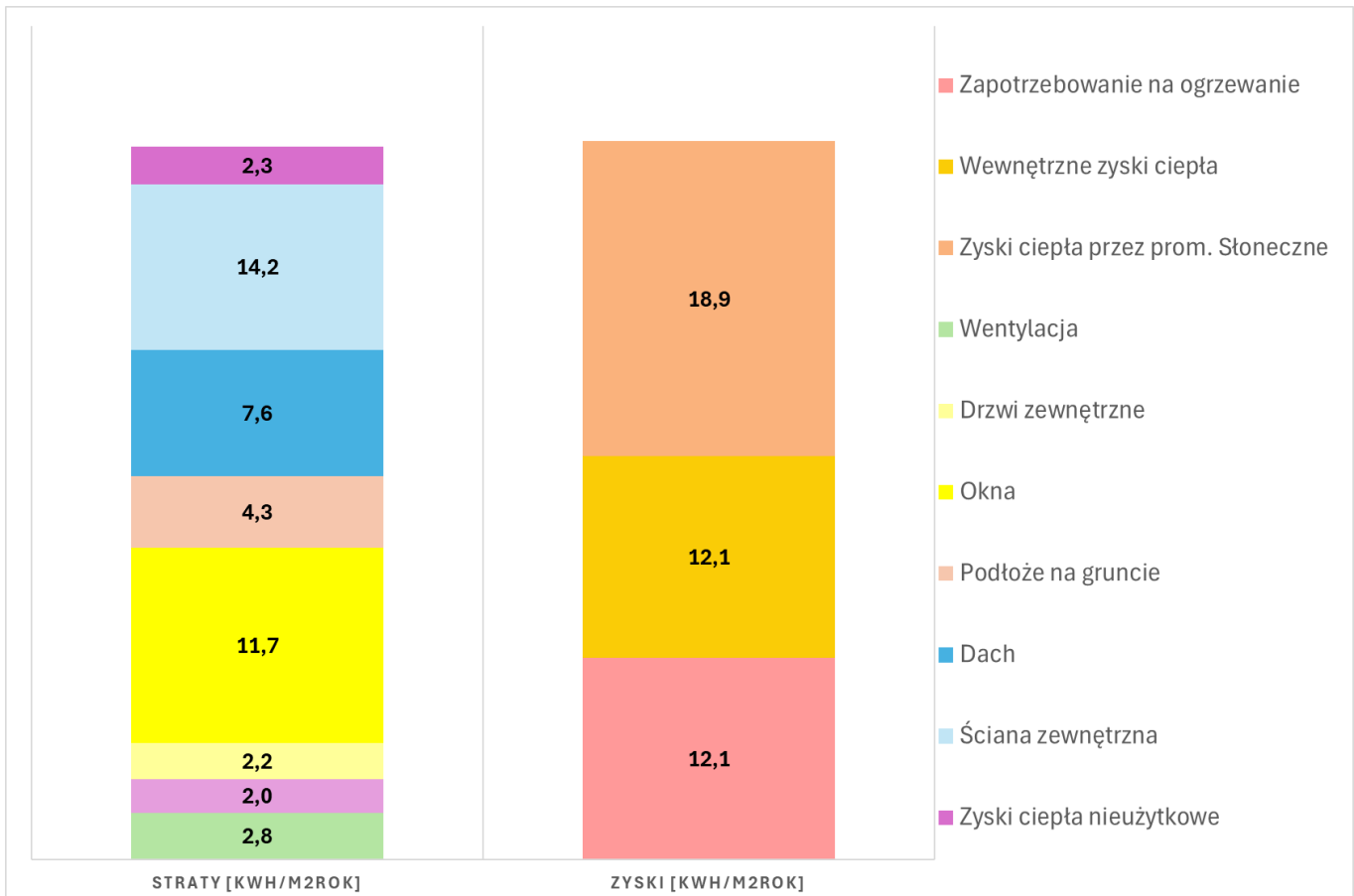
Poniżej na Rys. 5.72 przedstawiono końcową kalkulację rocznego zapotrzebowania na ogrzewanie Q_H .

Roczne zapotrzebowanie na ogrzewanie Q_H		$Q_L - Q_G =$	<input type="text" value="4424"/>	<input type="text" value="12,07"/>
	Graniczna wartość		<input type="text" value="15"/>	
		Kryterium spełnione?	<input type="text" value="Yes"/>	

Rys. 5.72 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H

Roczne zapotrzebowanie na ciepło wynosi 4424 kWh/(rok) → **12,07 kWh/(m²rok) ≤ 15 kWh/(m²rok)**

Poniżej na Rys.5.73 przedstawiono bilans energetyczny zapotrzebowania na ogrzewanie metodą roczną.



Rys. 5.73 - Wykres bilansu energetycznego

Na podstawie powyższego bilansu można stwierdzić, że w zakresie ogrzewania budynek jest efektywny energetycznie i najbardziej newralgiczne przegrody (okna i ściana zewnętrzna) oraz instalacje (wentylacja) zostały dostosowane do wymogów budynku pasywnego, przez co sam budynek spełnia normy kryterium.

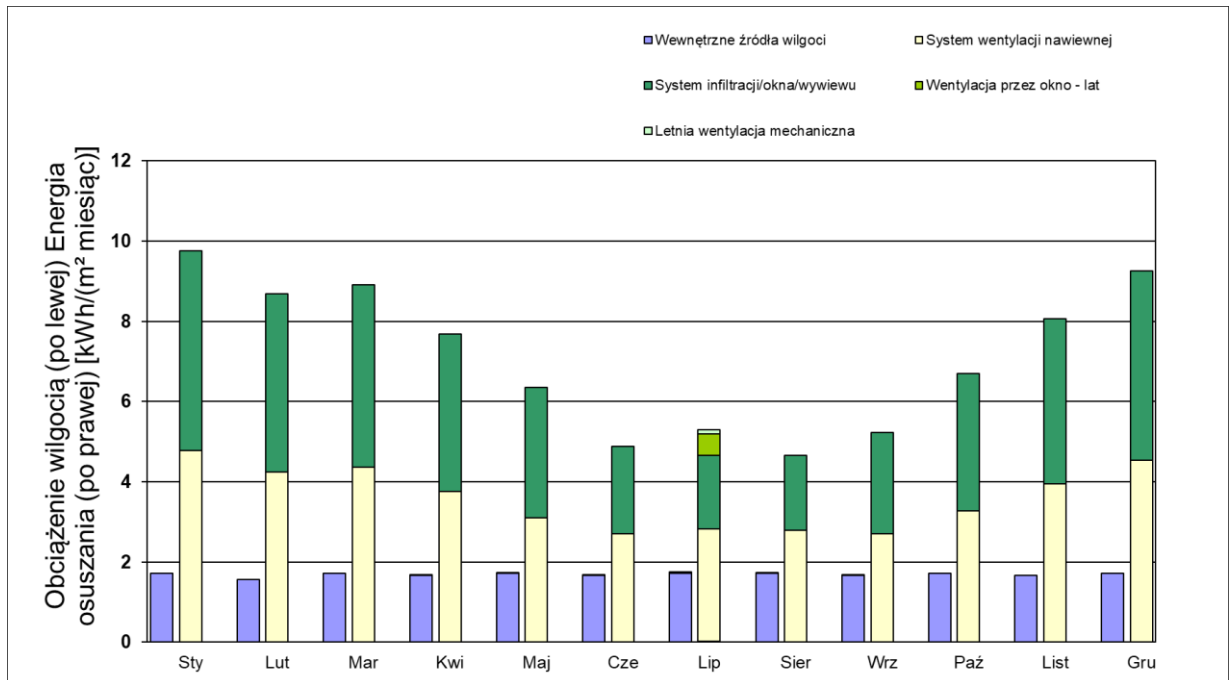
5.4.7. Weryfikacja potrzeby dodatkowego systemu chłodzenia

W pierwotnie badanym budynku dostrzeżono potrzebę zastosowania chłodzenia w budynku, ponieważ w budynku zbyt często dochodziło do jego przegrzewania się (25%). Analogicznie jak dla obciążenia cieplnego w arkuszu obliczono obciążenie chłodem budynku i wartość ta w odniesieniu do powierzchni budynku wyniosła $6,3 \text{ W/m}^2$. Fragment tego wyliczenia został pokazany na Rys. 5.74.

		$P_T + P_V + P_S + P_I$	=	2284	or	2316	
Obciążenie chłodem P_C			=	2316			W
Obciążenie chłodem w odniesieniu do powierzchni P_C / A_{TFA}			=	6,3			W/m ²
Min. Temperatura pracy		25 °C	Temperatura powietrza nawiewanego bez chłodz		$\vartheta_{Supply,Min}$	8,0 °C	8,0 °C
Dla porównania: obciążenie chłodnicze, przenoszone przez powietrze nawiewane $P_{Supply:Max}$			=	-1726			W
				-4,7			W/m ²
							-4,7
							(yes/no)
							No
Dzienny skok temperatury wewnętrznej							
Transmisja	Wentylacja	Obciążenie słoneczne	Czas	Pojemność	A_{TFA}		
W	W	W	h/d	Wh/(m ² K)	m ²		
(-560,5	+ (-2550,9	+ 4804,0	) * 24	/(60	* 367	) =	1,8 K

Rys. 5.74 – Wycinek z PHPP z wyliczonym obciążeniem chłodem

Także w wyniku zastosowanej wentylacji rozwiązano problem ze zbyt wysoką wilgotnością w budynku. Na Rys. 5.75 poniżej pokazano balans energii w zestawieniu miesięcznym pomiędzy wewnętrznymi źródłami wilgotności (słupek po lewej stronie) a źródłami osuszającymi środowisko wewnętrzne.



Rys. 5.75 - Wykres słupkowy dotyczący energią zwiększającą wilgotność a energią osuszającą

W następnej kolejności obliczono zapotrzebowanie na chłodzenie w budynku.

Zapotrzebowanie określa się wzorem:

$$Q_H = (Q_L - Q_G)/A_{TFA}, \text{ gdzie}$$

$$Q_L = Q_T + Q_V, \text{ gdzie}$$

Q_T – straty przez przenikania ciepła przez przegrody,

Q_V – straty przez wentylację,

Q_G – zyski z promieniowania słonecznego,

Q_I - zyski wewnętrzne.

Poniżej w formie Rys. 5.76 zostało przedstawione obliczenie transmisyjnych strat ciepła Q_T .

Przegroda budynku	Strefa temperatury	Powierzchnia m ²	Wartość U W/(m ² K)	Wskaźnik zawsze 1 (oprócz 'X')	G_i kKh/rok	kWh/rok	na m ² pow. użytkowej	
Ściana zewnętrzna	A	329,1	0,114	1,00	87	3245	8,85	
Dach	A	240,0	0,120	1,00	87	2492	6,80	
Płyta fundamentowa	B	183,3	0,130	1,00	88	2101	5,73	
Okna	A	67,1	0,662	1,00	87	3844	10,49	
Drzwi zewnętrzne	A	16,8	0,500	1,00	87	727	1,98	
Obwodowy mostek termiczny (mb)	P	54,1	0,082	1,00	87	384	1,05	
Transmisyjne straty ciepła Q_T (straty ujemne)						Suma	12793	34,9

Rys. 5.76 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T

Według powyższej kalkulacji, straty ciepła przez przenikanie przez przegrody wynoszą 34,9 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.77 zostało przedstawione obliczenie strat ciepła na skutek wentylacji Q_V .

	V_V m ³	$n_{V,eq}$ fraction 1/h	C_{air} Wh/(m ³ K)	G_i kKh/rok	kWh/rok	kWh/(m ² rok)	
Straty wentylacyjne otoczenia $Q_{V,ot}$	916	0,350	0,33	82	8708	23,8	
Straty wentylacyjne naziemne $Q_{V,e}$	916	0,336	0,33	100	10151	27,7	
Straty ciepła Wentylacja letnia	916	0,921	0,33	98	27234	74,3	
Straty ciepła na skutek wentylacji Q_V					Suma	46092	125,7

Rys. 5.77 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V

Według wyliczeń w arkuszu PHPP, straty ciepła przez wentylację wynoszą 125,7 kWh/(m²rok).

Poniżej w formie Rys. 5.78 zostało przedstawione obliczenie całkowitych strat ciepła Q_L .

	Q_T	Q_V		
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok	kWh/(m ² rok)
Całkowite straty ciepła Q_L	12793	+	46092	=
			58886	=
				160,6

Rys. 5.78 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L

Całkowite straty ciepła budynku wynoszą $34,9 + 125,7 = 160,6$ kWh/(m²rok).

W następnej kolejności program wylicza zyski ciepła z promieniowania słonecznego uwzględniając:

- Czynniki redukcji,
- Współczynnik g okna – określający stopień transmisji ciepła przez szybę okna,
- Powierzchnię okien,
- Wartość promieniowania słonecznego w zależności i orientacji.

Poniżej w formie Rys. 5.79 zostało przedstawione obliczenie dostępnych zysków ciepła od energii słonecznej Q_S .

Orientacja powierzchni	Współczynnik redukcyjny	wartość g	Powierzchnia	promieniowanie całkowita			
			m ²	kWh/(m ² a)	=	kWh/a	
Połnoc	0,37	0,62	19,0	385	=	1664	
Południe	0,49	0,62	48,1	779	=	11343	
Suma z nieprzeźroczystych przegród						1566	
Dostępne zyski z promieniowania słonecznego Q_S						Total	14573
							39,8

Rys. 5.79 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S

Wyliczona wartość zysków z promieniowania słonecznego wynosi 39,8 kWh/(m²rok).

Następnie w formie Rys. 5.80 zostało przedstawione obliczenie wewnętrznych zysków ciepła Q_I i sumy obciążeń cieplnych Q_F .

	kh/d	Długość okresu grzewczego	Spec. Moc q_i	A_{TFA}		
		d/rok	W/m ²	m ²	kWh/rok	kWh/(m ² rok)
Wewnętrzne zyski ciepła Q_I	0,024	245	1,7	366,6	=	3665
						10,0
Suma obciążeń cieplnych Q_F					$Q_S + Q_I =$	18238
						49,8

Rys. 5.80 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I i Q_F

Według powyższej kalkulacji wewnętrzne zyski ciepła wynoszą 10,0 kWh/(m²rok), natomiast suma obciążeń cieplnych stanowiąca sumę zysków z promieniowania słonecznego i wewnętrznych zysków ciepła wynosi 18238 kWh/rok → 49,8 kWh/m²rok.

Sumę strat ciepła (Q_L) w postaci 58886 kWh/(rok) pomnożono przez współczynnik wykorzystania strat ciepła, który według wyliczeń programu dla badanego budynku wynosi 30,53%. W związku z powyższym, ostateczna wartość użytecznych strat ciepła wynosi:

$$30,53\% * 58886 \text{ kWh}/(\text{rok}) = 17979 \text{ kWh}/(\text{rok}) \rightarrow 49,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{rok})$$

Następnie wyliczono różnicę pomiędzy sumą obciążeń cieplnych (Q_F) a użytecznymi stratami ciepła ($Q_{V,n}$):

$$18238 - 17979 = 259 \text{ kWh}/(\text{rok}) \rightarrow 0,71 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{rok})$$

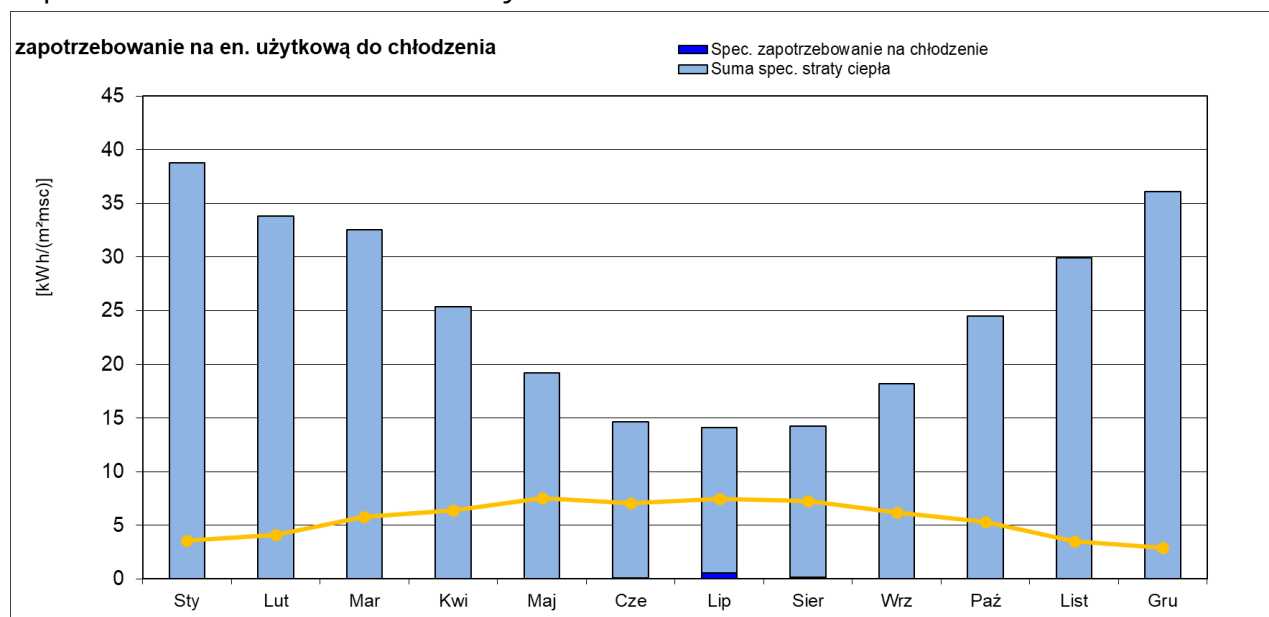
0,71 kWh/(m²rok) ≤ 15,0 kWh/(m²rok)

Uzyskana wartość **spełnia wymogi budynku pasywnego**. Wycinek z końcowym obliczeniem użytecznego zapotrzebowania na chłodzenie przedstawiono poniżej na Rys. 5.81.

Stosunek strat do wolnych zysków ciepła		$Q_L / Q_F =$	3,03
Współczynnik wykorzystania strat ciepła η_G		=	32,44%
Użyteczne straty ciepła $Q_{V,n}$		$\eta_G * Q_L =$	19093 kWh/rok
			52,1 kWh/(m ² rok)
Użyteczne zapotrzebowanie na chłodzenie Q_K		$Q_F - Q_{V,n} =$	321 kWh/rok
			0,87 kWh/(m ² rok)
Zalecana wartość maksymalna	kWh/(m ² rok)		15
		Wymagania spełnione?	Yes

Rys. 5.81 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_K

Na potwierdzenie powyższych wyników poniżej na Rys. 5.82 pokazano wykres zapotrzebowania na chłód w budynku.



Rys. 5.82 - Wykres zapotrzebowania na chłód w ciągu roku

Na podstawie powyższego wykresu stwierdza się, że dodatkowe chłodzenie jest wymagane jedynie w lipcu, gdzie zapotrzebowanie miesięczne na chłód wynosi 0,5 kWh/(m²rok). Aby spełnić wymagania budynku wystarczy w okresie letnim do chłodzenia wykorzystać wentylację z odzyskiem ciepła i chłodu oraz wietrzyć pomieszczenia za pomocą okien. Nie jest jednak wymagane stosowanie dodatkowego źródła chłodu.

5.4.8. Fotowoltaika

By zmniejszyć zapotrzebowanie budynku na energię pierwotną (wymóg budynku pasywnego to 120 kWh/(m²rok), a według aktualnych warunków technicznych 70 kWh/(m²rok)) postanowiono na dachu budynku od strony południowej zamontować panele fotowoltaiczne. Dla każdego z czterech mieszkań wykorzystano 16,8 m² powierzchni dachu do zamontowania paneli fotowoltaicznych. Na Rys. 5.83 przedstawiono przyjęty system instalacji fotowoltaicznej.

Nazwa systemu	System 1	System 2	System 3	System 4
Lokalizacja	37-Roof_037_S	38-Roof_038_S	39-Roof_039_S	40-Roof_040_S
Rozmiar powierzchni	30,0	30,0	30,0	30,0
Odchylenie od północy	181,2	181,2	181,2	181,2
Kąt nachylenia od poziomu	45	45	45	45

Rys. 5.83 – Wycinek z PHPP z przyjętym systemem instalacji fotowoltaicznej

Poniżej na Rys. 5.84 przedstawiono podstawowe informacje z karty katalogowej modułu fotowoltaicznego. Jeden moduł na wymiary 1,658 m x 0,994 m.

Informacje z karty katalogowej modułu		4-Mono-Si	4-Mono-Si	4-Mono-Si	4-Mono-Si
Technologia		4-Mono-Si	4-Mono-Si	4-Mono-Si	4-Mono-Si
Prąd nominalny	I_{MPP0}	7,71	7,71	7,71	7,71
Nominalne napięcie	U_{MPP0}	30,50	30,50	30,50	30,50
Nominalna moc	P_n	235	235	235	235
Współczynnik temperaturowy prądu zwarciovego	α	0,040	0,040	0,040	0,040
Współczynnik temperaturowy napięcie w obwodzie otwarty	β	-0,340	-0,340	-0,340	-0,340
Wymiary modułu: Wysokość		1,658	1,658	1,658	1,658
Wymiary modułu: Szerokość		0,994	0,994	0,994	0,994

Rys. 5.84 – Wycinek z PHPP z informacjami z karty katalogowej modułów paneli PV

Na dachu każdego z mieszkań zamontowano po 8 modułów, co sumarycznie daje 32 moduły na dachu całego budynku. Poniżej na Rys. 5.85 przedstawiono dalszą specyfikację paneli PV.

Dalsza specyfikacja					
Liczba modułów	η_M	8	8	8	8
Efektywność inwertera	η_{HRV}	95%	95%	95%	95%

Rys. 5.85 – Wycinek z PHPP z dalszą specyfikacją dotyczącą paneli PV

Poniżej na Rys. 5.86 zestawiono powierzchnię pola modułów dla każdego z czterech mieszkań oraz pozostałą powierzchnię dachu.

Wyniki				
Powierzchnia pola modułów	13,2	13,2	13,2	13,2
Pozostała powierzchnia	16,8	16,8	16,8	16,8
Przypisanie do elementu budynku	44%	44%	44%	44%

Rys. 5.86 – Wycinek z PHPP z informacją dotyczącą powierzchni modułów i zajmowanej powierzchni dachu

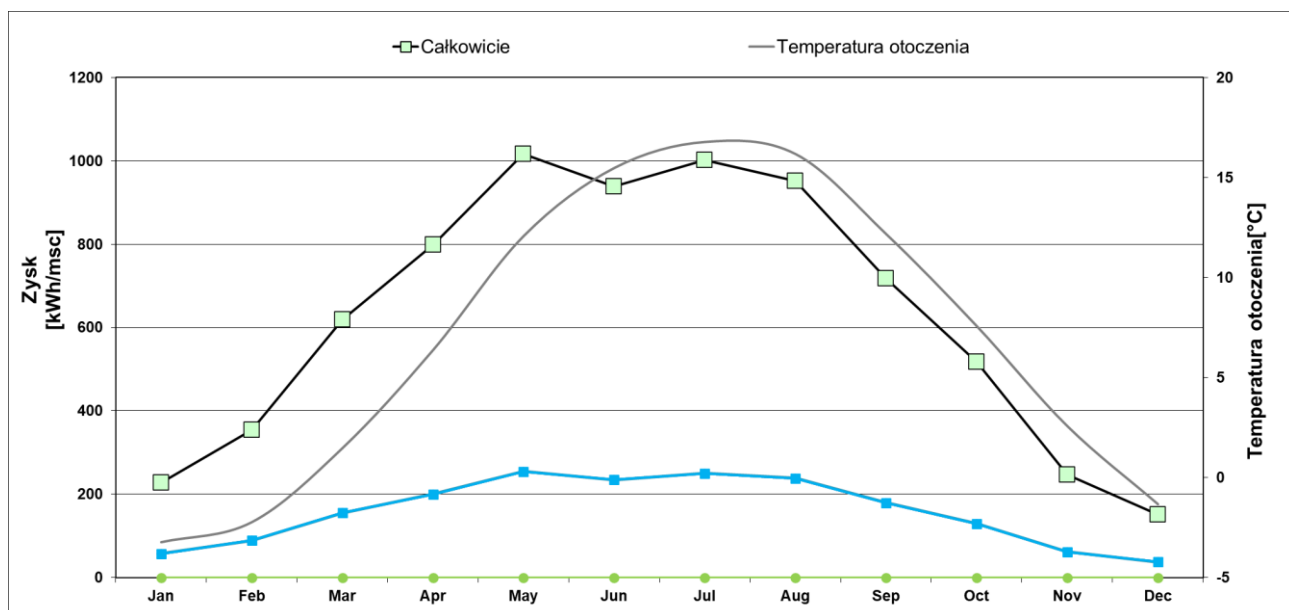
Poniżej na Rys. 5.87 przedstawiono roczny uzysk energii elektrycznej w podziale na mieszkania, a także wartość dla całego budynku.

	Całkowicie					
roczny uzysk energii elektrycznej za falownikiem, bezwzględny	1886	1886	1886	1886	7544	kWh/a
Dotyczy przewidywanej powierzchni zabudowy	10,3	10,3	10,3	10,3	41	kWh/m ² A _{proj}
CO ₂ ekwiwalent	245,2	245,2	245,2	245,2	980,7	kg/a

Rys. 5.87 – Wycinek z PHPP z wynikiem pokazującym roczny uzysk energii elektrycznej dla każdej instalacji

Całkowita wartość rocznego uzysku energii w przeliczeniu na powierzchnię wynosi **41 kWh/m²rok**.

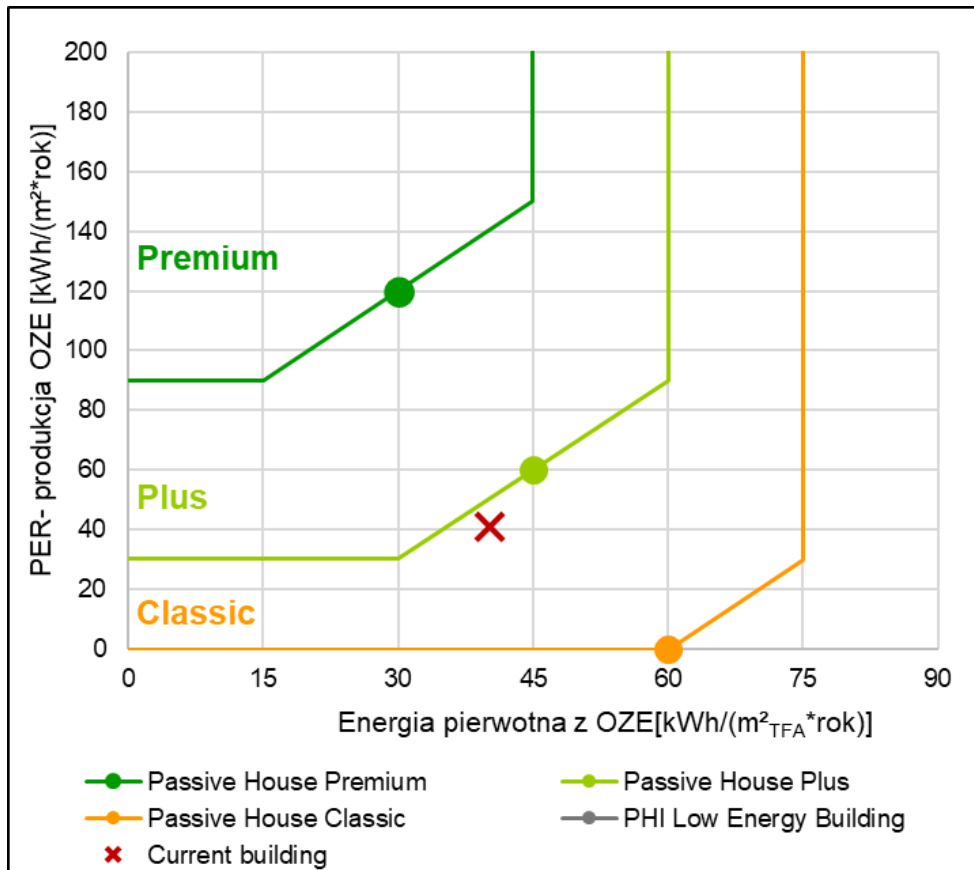
Na Rys. 5.88 pokazano roczną produkcję energii elektrycznej, zarówno dla pojedynczego systemu (kolor niebieski), a także dla całego systemu (kolor zielony) będącego sumą wyprodukowanej energii przez wszystkie cztery systemy. Na wykresie została naniesiona także temperatura zewnętrzna powietrza.



Rys. 5.88 - Wykres produkcji energii elektrycznej przez panele PV

5.4.9. Zużycie energii pierwotnej

W wyniku zastosowanych rozwiązań wartość zapotrzebowania budynku na energię pierwotną z OZE wyniosła 41,00 kWh/(m²rok), co jest wartością bardzo korzystną, klasyfikującą budynek jako klasyczny budynek pasywny, blisko budynku pasywnego „PLUS” - Rys. 5.89.



Rys. 5.89 - Klasyfikacja budynku po zmianach względem standardu certyfikacji

5.4.10. Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań i zastosowanych rozwiązań w postaci:

- zwiększenia izolacji w ścianie zewnętrznej z 12 do 18 cm,
- zmianie okien na okna lepszym współczynnikiem przenikania ciepła U_g i U_f , a także korzystniejszym współczynnikiem g ,
- zastosowaniu wentylacji z odzyskiem ciepła o sprawności 89%,
- zamontowaniu paneli fotowoltaicznych w celu obniżenia zapotrzebowania na energię pierwotną.

Budynek spełnia wszystkie kryteria postawione przez Passive House Institute w Darmstadt, by otrzymać certyfikat budynku pasywnego w klasie Standard. Poniżej w formie wycinka (Rys. 5.90 i Rys. 5.91), pokazano, że wszystkie wymagane kryteria zostały spełnione.

W tym miejscu udowodniono pierwszą tezę rozprawy doktorskiej mówiącej, że ściana trójwarstwowa produkowana przez Betard sp. z o.o. może stanowić przegrodę w budynku o standardzie pasywnym.

		366,6		Kryterium	Kryterium alternatywne	War. spełniony?
Ogrzewanie przestrzeni	Powierzchnia użytkowa m ²	366,6				
	Zapotrzebowanie na ciepło kWh/(m ² rok)	12,10	≤	15	-	tak
	Pojemność cieplna W/m ²	9,65	≤	-	10	tak
Chłodzenie przestrzeni	Zapotrzebowanie na chłód kWh/(m ² rok)	-	≤	-	-	-
	Pojemność chłodu W/m ²	-	≤	-	-	-
	Częstotliwość przegrzewania (> 25 °C) %	0,66	≤	10		tak
	Częstotliwość zbyt wysokiej wilgotności (> 12 g/kg) %	0,00	≤	20		tak
Szczelność	Wynik testu ciśnieniowego n ₅₀ 1/h	0,34	≤	0,6		tak
Nieodnawialna energia pierwotna	Zapotrzebowanie na energię pierwotną kWh/(m ² rok)	63,24	≤	120		tak
	Zapotrzebowanie na energię pierwotną z OZE kWh/(m ² rok)	40,18	≤	-	-	-
Odnawialna energia pierwotna	Wytwarzanie energii odnawialnej (w odniesieniu do przewidywanej powierzchni budynku) kWh/(m ² rok)	41,00	≥	-	-	

Rys. 5.90 – Wycinek podsumowania sprawdzenia kryterium ($\lambda = 0,59$ W/(mK))

		366,6		Kryterium	Kryterium alternatywne	War. spełniony?
Ogrzewanie przestrzeni	Powierzchnia użytkowa m ²	366,6				
	Zapotrzebowanie na ciepło kWh/(m ² rok)	12,35	≤	15	-	tak
	Pojemność cieplna W/m ²	9,76	≤	-	10	tak
Chłodzenie przestrzeni	Zapotrzebowanie na chłód kWh/(m ² rok)	-	≤	-	-	-
	Pojemność chłodu W/m ²	-	≤	-	-	-
	Częstotliwość przegrzewania (> 25 °C) %	0,66	≤	10		tak
	Częstotliwość zbyt wysokiej wilgotności (> 12 g/kg) %	0,00	≤	20		tak
Szczelność	Wynik testu ciśnieniowego n ₅₀ 1/h	0,34	≤	0,6		tak
Nieodnawialna energia pierwotna	Zapotrzebowanie na energię pierwotną kWh/(m ² rok)	63,25	≤	120		tak
	Zapotrzebowanie na energię pierwotną z OZE kWh/(m ² rok)	40,19	≤	-	-	-
Odnawialna energia pierwotna	Wytwarzanie energii odnawialnej (w odniesieniu do przewidywanej powierzchni budynku) kWh/(m ² rok)	41,00	≥	-	-	

Rys. 5.91 – Wycinek podsumowania sprawdzenia kryterium ($\lambda = 1,7$ W/(mK))

5.5. Wpływ zmian klimatu na budynek – analiza obecnego i prognozowanego klimatu

5.5.1. Aktualny klimat

Do badania aktualnego klimatu wykorzystano program Meteororm, który posiada bazę danych klimatycznych, pochodzących ze stacji meteorologicznych. Otrzymane w programie parametry to:

- Globalne promieniowanie poziome [kWh/m²];
- Promieniowanie rozproszone [kWh/m²];
- Promieniowanie bezpośrednie [kWh/m²];
- Temperatura otoczenia [°C];
- Temperatury punktu rosy [°C];
- Prędkość wiatru [m/s].

W Tabeli 5.23 zestawiono wartości dla powyżej wymienionych parametrów dla stacji klimatycznej zlokalizowanej najbliżej inwestycji w Bielawie, tj. stacji Wrocław – Strachowice.

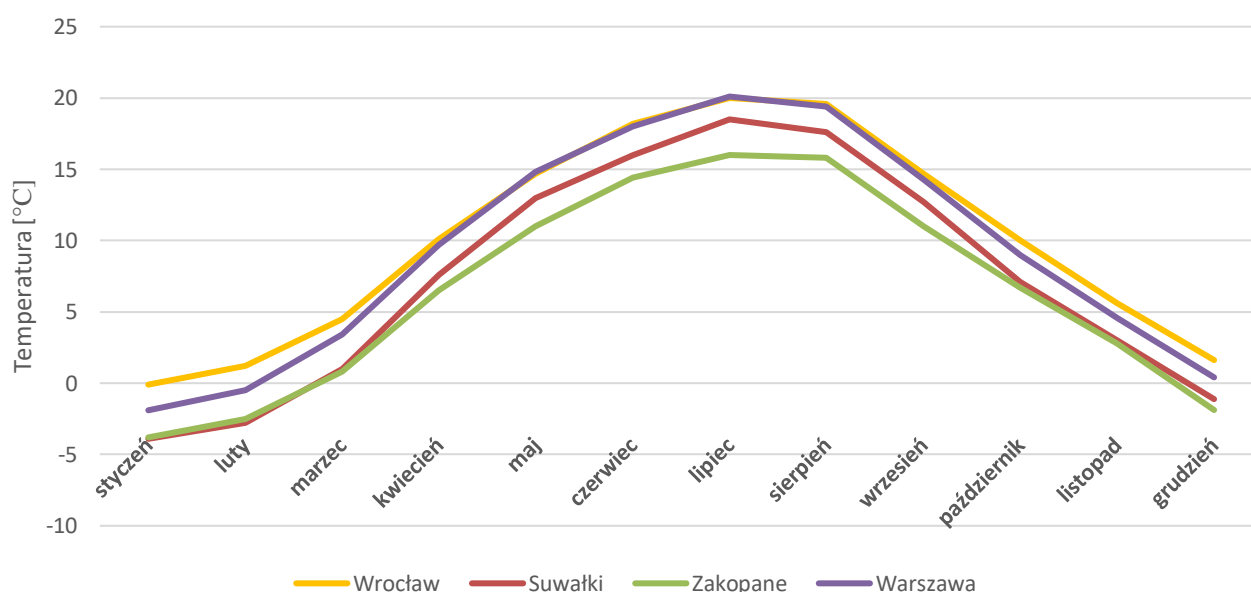
Tabela 5.23 – Aktualne dane klimatyczne dla stacji Wrocław - Strachowice

Miesiące	Globalne promieniowanie poziome [kWh/m ²]	Promieniowanie rozproszone [kWh/m ²]	Bezpośrednie normalne promieniowanie [kWh/m ²]	Temperatura otoczenia [°C]	Temperatura punktu rosy [°C]	Prędkość wiatru [m/s]
styczeń	22	13	39	-0,1	-3,2	3,7
luty	42	25	50	1,2	-2,5	3,6
marzec	82	46	80	4,5	-0,3	3,7
kwiecień	125	62	116	10,1	3,5	3,4
maj	160	80	135	14,7	8,2	3,1
czerwiec	166	91	125	18,2	11,4	3,1
lipiec	167	78	146	20	13,2	2,9
sierpień	143	72	123	19,6	13,3	2,7
wrzesień	99	50	99	14,7	9,8	2,9
październik	58	33	67	10	6,1	3
listopad	27	16	42	5,6	2,5	3,3
grudzień	17	13	20	1,6	-1,4	3,5
Cały rok	1104	579	1042	10	5,1	3,2

Następnie sprawdzono różnice w wartościach danych klimatycznych w postaci średnich miesięcznych temperatur, promieniowania rozproszonego oraz prędkości wiatru dla następujących lokalizacji:

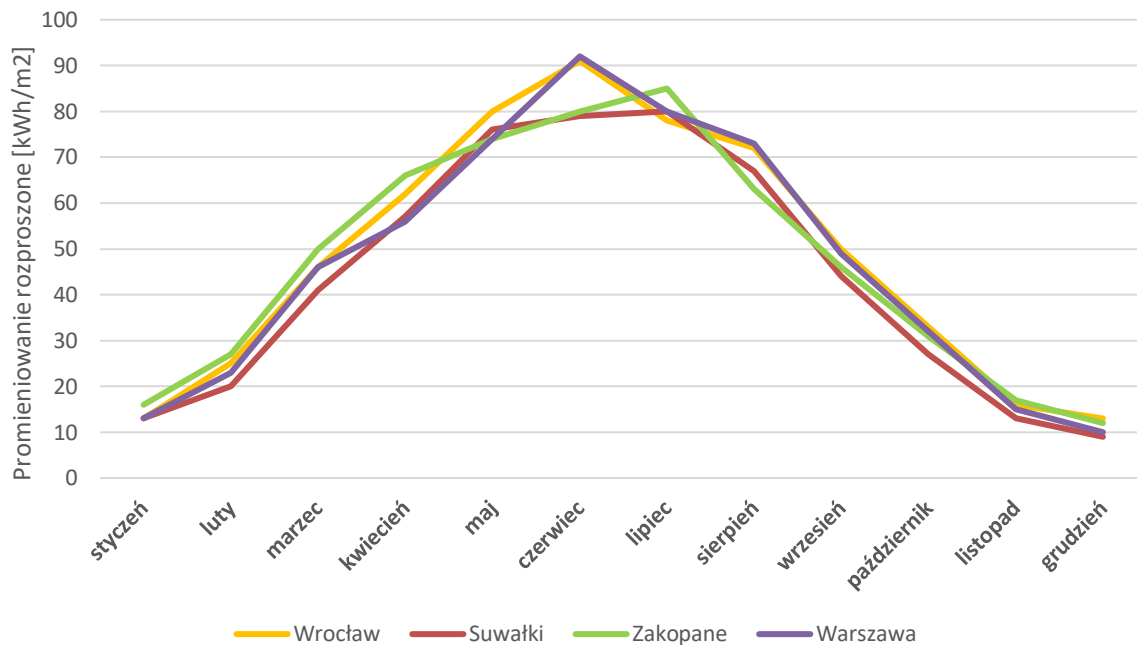
- Wrocław,
- Suwałki,
- Zakopane,
- Warszawa.

Poniżej na Rys. 5.92 przedstawiono wykresy średniej miesięcznej temperatury w ww. lokalizacjach.



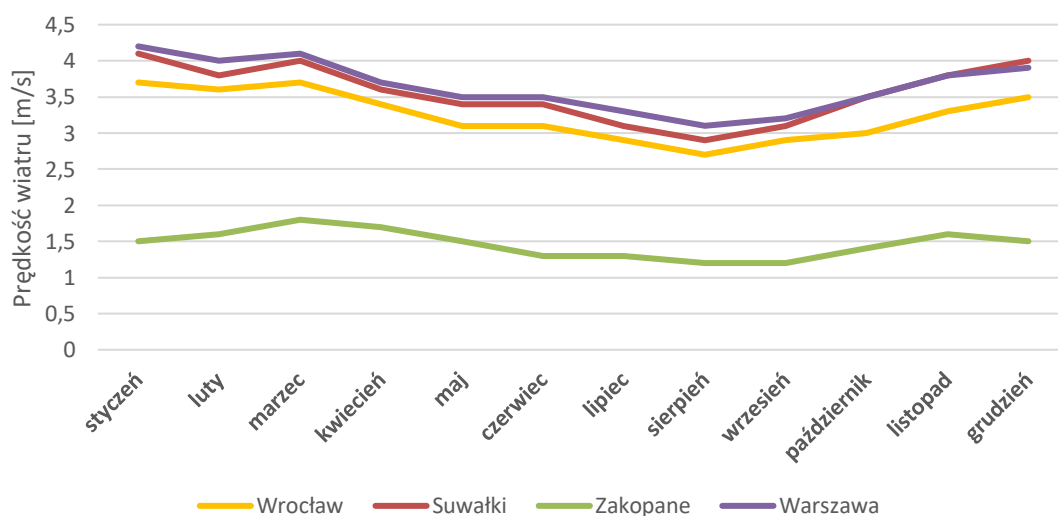
Rys. 5.92 – Wykres średniej miesięcznej temperatury w czterech miastach

Na podstawie powyższego wykresu stwierdza się, że najwyższe średnie miesięczne temperatury występują we Wrocławiu, natomiast najniższe w Zakopanem i w Suwałkach. W związku z powyższym, wykonana zostanie symulacja energetyczna dla wszystkich czterech lokalizacji celem sprawdzenia czy analizowany budynek również będzie spełniał wymogi budownictwa pasywnego w innych warunkach klimatycznych. Poniżej na Rys. 5.93 przedstawiono wykresy średniego miesięcznego promieniowania rozproszonego w czterech wskazanych lokalizacjach.



Rys. 5.93 – Wykres średniego miesięcznego promieniowania rozproszonego w czterech miastach

Na podstawie powyższego wykresu stwierdza się, że zauważalne różnice w promieniowaniu rozproszonym występują w okresie letnim od maja do sierpnia i najwyższe wartości zostały odnotowane dla Wrocławia i Warszawy. Wskazana obserwacja będzie miała znaczenie w badaniu wpływu zmian klimatu na przegrzewanie się proponowanego budynku w okresie letnim. Poniżej na Rys. 5.94 przedstawiono wykresy średniej miesięcznej prędkości wiatru w czterech wskazanych lokalizacjach.



Rys. 5.94 – Wykres średniej prędkości wiatru w czterech miastach

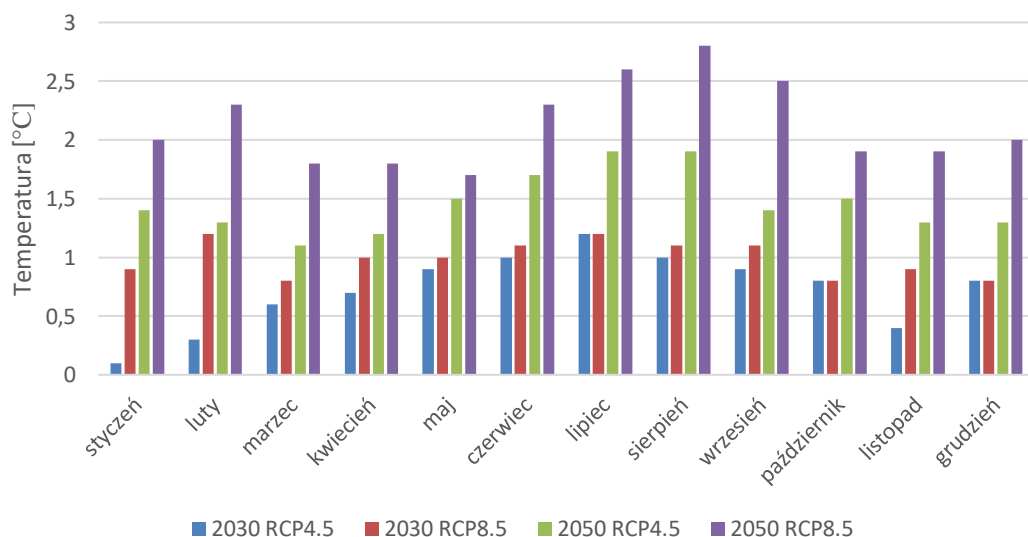
Na podstawie powyższego wykresu stwierdza się, że średnia miesięczna prędkość wiatru dla Wrocławia, Warszawy i Suwałk osiąga porównywalne wartości w ciągu całego roku. Największa różnica jest zauważalna w Zakopanem, gdzie średnie miesięczna wartość prędkości wiatru jest około dwukrotnie niższa niż w pozostałych trzech lokalizacjach.

5.5.2. Klimat prognozowany – temperatura otoczenia

W oparciu o opisane już ścieżki koncentracji węgla (RCP) wyznaczone przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC), przygotowano prognozowane parametry klimatyczne dla następujących scenariuszy:

- RCP 4.5 dla roku 2030,
- RCP 8.5 dla roku 2030,
- RCP 4.5 dla roku 2050,
- RCP 8.5 dla roku 2050.

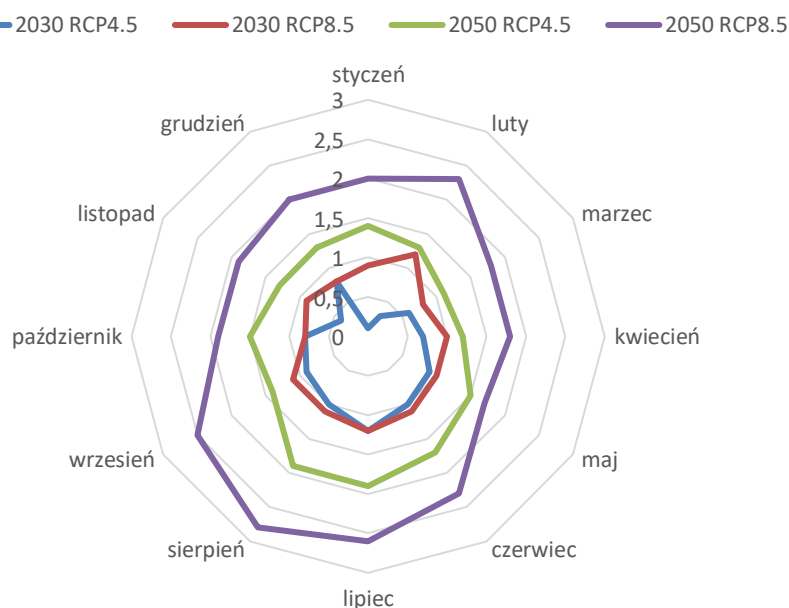
Powyższe scenariusze zmian klimatu zostały zaadoptowane przez program Meteonorm, a następnie na podstawie tych scenariuszy program wygenerował prognozowane wartości czynników klimatotwórczych dla roku 2030 i 2050 na podstawie danych ze stacji meteorologicznej Wrocław - Strachowice. Na Rys. 5.95 przedstawiono wykres zmiany średniej miesięcznej temperatury otoczenia dla czterech scenariuszy zmian klimatu w odniesieniu do aktualnych wartości.



Rys. 5.95 – Wykres zmiany średniej miesięcznej temperatury otoczenia dla wskazanych scenariuszy zmian klimatu

Poniżej w formie wykresu radarowego (Rys. 5.96) pokazano prognozowane wartości wzrostu temperatury względem wartości aktualnych. Wartości te wskazują na dość duże odchylenie od wartości aktualnych dla scenariusza RCP 8.5 dla roku 2050 (między 2°C a 3°C) oraz dla scenariusza RCP 4.5 dla roku 2050 (między 1 a 2°C). Dla roku 2030 odchylenie od wartości aktualnych prezentuje się następująco:

- Między 0,8°C (marzec) a 1,2°C (lipiec),
- Między 0,1°C (styczeń) a 1,2°C (lipiec).



Rys. 5.96 – Wykres radarowy pokazujący odchylenia temperatury otoczenia w zależności od przyjętego scenariusza koncentracji węgla

Miesiącami, w których odnotowano najniższy wzrost temperatury w porównaniu z aktualnym klimatem, w podziale na poszczególne scenariusze, są:

- Dla scenariusza RCP 4.5 w 2030 r. – styczeń – wzrost o 0,1°C,
- Dla scenariusza RCP 8.5 w 2030 r. – marzec, październik i grudzień – wzrost o 0,8°C,
- Dla scenariusza RCP 4.5 w 2050 r. – marzec – wzrost o 1,1°C,
- Dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 r. – maj – wzrost o 1,7°C.

Miesiącami, w których odnotowano najwyższy wzrost temperatury w porównaniu z aktualnym klimatem, w podziale na poszczególne scenariusze, są:

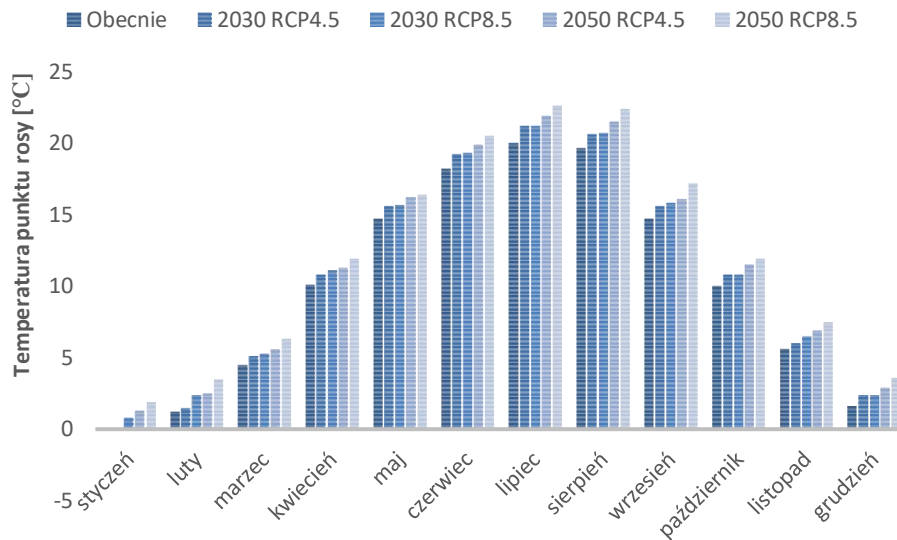
- Dla scenariusza RCP 4.5 w 2030 r. – lipiec – wzrost o 1,2°C,
- Dla scenariusza RCP 8.5 w 2030 r. – luty i lipiec – wzrost o 1,2°C,

- Dla scenariusza RCP 4.5 w 2050 r. – lipiec i sierpień – wzrost o 1,9°C,
- Dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 r. – sierpień – wzrost o 2,8°C.

Analizując powyższe wykresy oraz maksymalne oraz minimalne odchylenia względem obecnie panującego klimatu, można stwierdzić, że najmniejsze amplitudy temperatur nastąpią przeważnie w miesiącach grzewczych (wyjątkiem jest scenariusz RCP 8.5 dla roku 2050), natomiast największe amplitudy dostrzeżono w okresie letnim. Dla wszystkich miesięcy we wszystkich czterech przeanalizowanych scenariuszach odnotowano choćby minimalny wzrost średniej miesięcznej temperatury otoczenia. Otrzymane wyniki jasno wskazują na ocieplenie klimatu i podnoszenie się wartości średnich miesięcznych temperatur. Pytaniem otwartym pozostaje skala tego zjawiska oraz jak duży wpływ wywrze on na charakterystykę energetyczną budynku, a co za tym idzie, jakie rozwiązania dodatkowo trzeba zastosować w celu adaptacji budynku do przyszłych zmian klimatycznych.

5.5.3. Klimat prognozowany – temperatura punktu rosy

Analogicznie jak dla temperatury, prezentują się wyniki prognozowanych wartości temperatury punktu rosy. Nie jest to jednak zaskoczenie, ponieważ temperatura punktu rosy jest ściśle związana z temperaturą otoczenia. Jest to temperatura graniczna, przy której maksymalne nasycenie jest osiągnięte przez gaz. W przypadku mieszaniny pary wodnej i powietrza, temperatura punktu rosy to temperatura, poniżej której para wodna zgromadzona w powietrzu nie ma możliwości być dłużej w postaci gazu i dochodzi do jej skraplania. Jest to parametr zależny od wilgotności względnej powietrza, temperatury otoczenia i ciśnienia atmosferycznego. Otrzymane wyniki prognozowanych wartości temperatury punktu rosy zostały przedstawione na Rys. 5.97 w formie wykresu.

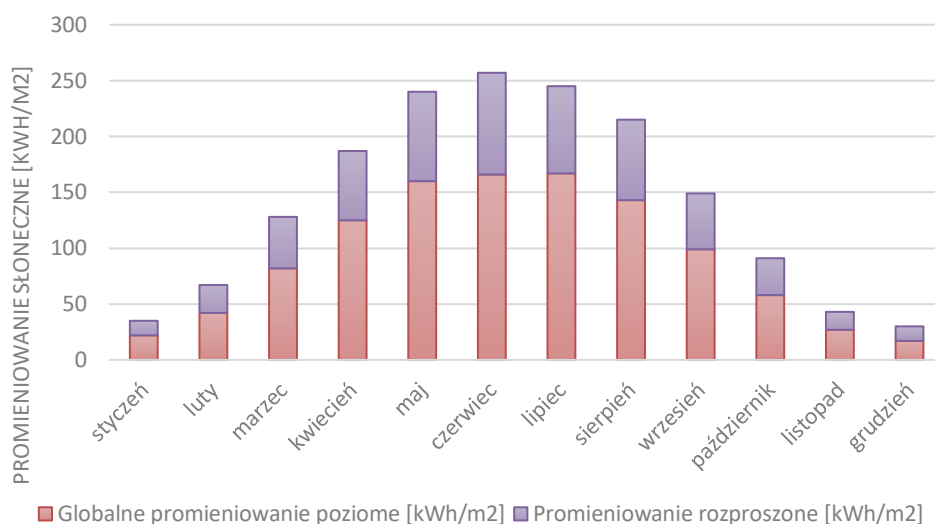


Rys. 5.97 – Aktualne i prognozowane temperatury punktu rosy w zależności od scenariusza RCP w podziale na miesiące

Analogicznie jak dla wartości średniej miesięcznej temperatury, w prognozowanych klimatach wartości średniej miesięcznej temperatury punktu rosy będą rosły w kolejnych latach. Wzrost średniej temperatury punktu rosy prowadzi do zwiększenia ilości pary wodnej w atmosferze, co przyczynia się do intensyfikacji opadów deszczu i śniegu. Większa wilgotność powietrza sprzyja także zanieczyszczeniu powietrza i utrzymywaniu się dłużej smogu.

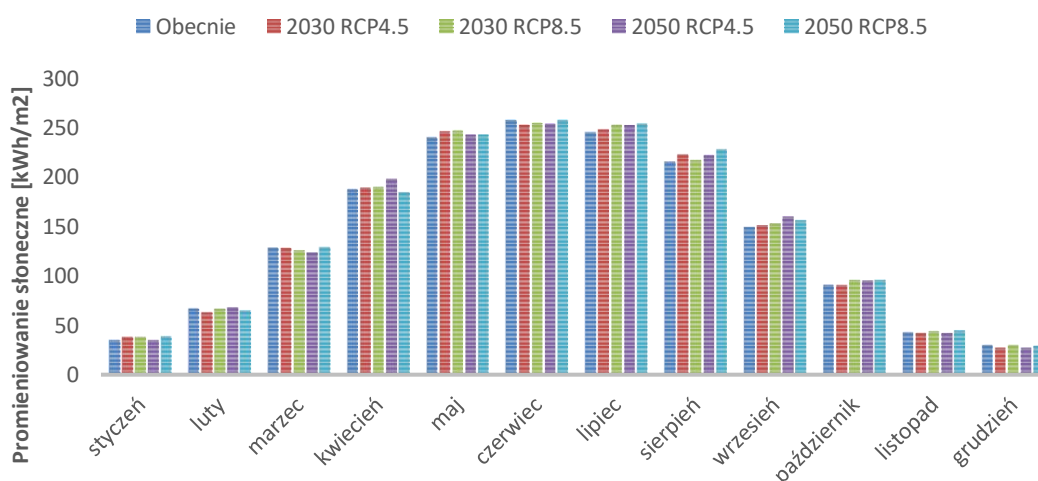
5.5.4. Klimat prognozowany – promieniowanie

Kolejnym przeanalizowanym czynnikiem klimatotwórczym jest promieniowanie słoneczne wyrażone w kWh/m². Na Rys. 5.98 poniżej przedstawiono średnie miesięczne wartości całkowitego promieniowania słonecznego, na które składa się promieniowanie rozproszone i globalne promieniowanie poziome, będące promieniowaniem bezpośrednim.



Rys. 5.98 - Wykres średnich miesięcznych wartości promieniowania całkowitego

Miesiącem, w którym odnotowano najintensywniejsze promieniowanie całkowite jest czerwiec. Najniższe wartości zostały odnotowane w styczniu i grudniu.



Rys. 5.99 - Wykres prognozowanych wartości całkowitego promieniowania słonecznego

Wyniki symulacji zmiany całkowitego promieniowania na przestrzeni kolejnych lat i prognozowanych zmian klimatu nie pokazują znaczących wzrostów ani spadków.

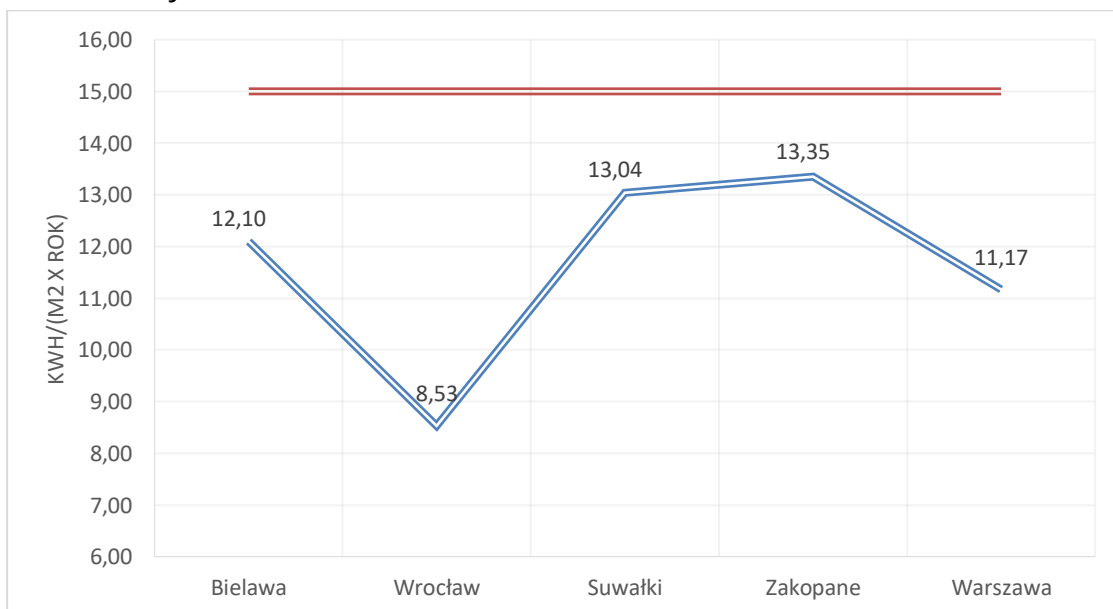
5.6. Symulacja budynku w różnych klimatach Polski

Wykonano symulację energetyczną proponowanego budynku w różnych lokalizacjach celem sprawdzenia czy osiągnięte parametry budownictwa pasywnego pozostaną spełnione także w innych lokalizacjach, także tych powszechnie uważanych za chłodniejsze jak Suwałki czy Zakopane. Zostały sprawdzone i porównane z wynikami osiągniętymi dla Bielawy następujące lokalizacje:

- Wrocław,
- Suwałki,
- Zakopane,
- Warszawa.

5.6.1. Sprawdzenie spełnienia przez proponowany budynek kluczowych parametrów budownictwa pasywnego w różnych lokalizacjach Polski

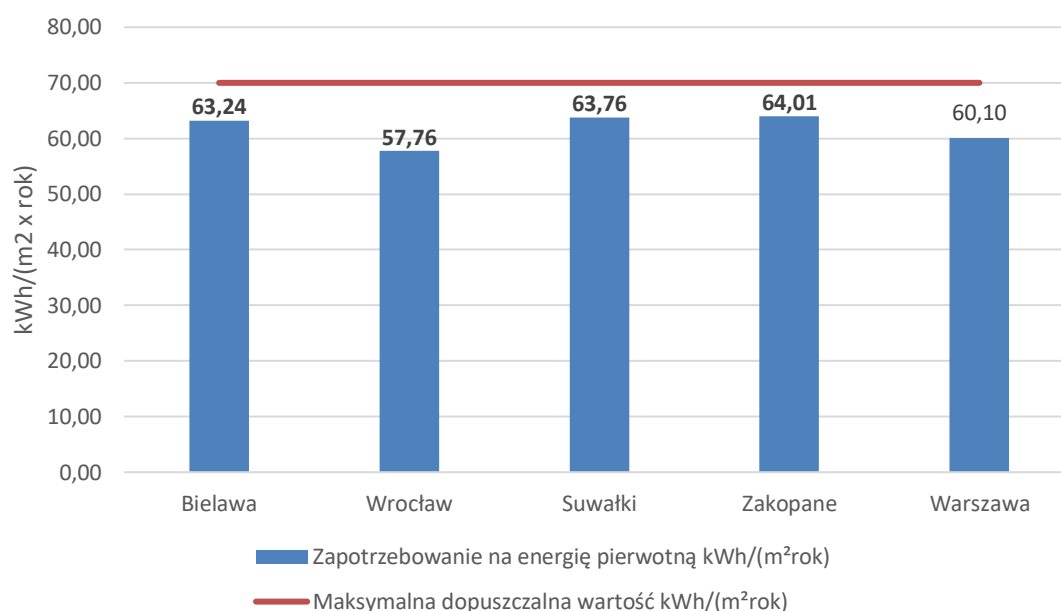
W wyniku przeprowadzonych symulacji na Rys. 5.100 przedstawiono wyniki dla pięciu wskazanych lokalizacji w zakresie zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku.



Rys. 5.100 – Zapotrzebowanie do ogrzewania budynku dla różnych lokalizacji

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdza się, że dla wszystkich pięciu lokalizacji został spełniony warunek maksymalnego zapotrzebowania budynku na ogrzewanie ($\leq 15 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$). Najniższą wartość osiągnięto dla Wrocławia ($8,53 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$), a najwyższe zapotrzebowanie odnotowano dla Zakopanego ($13,35 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$).

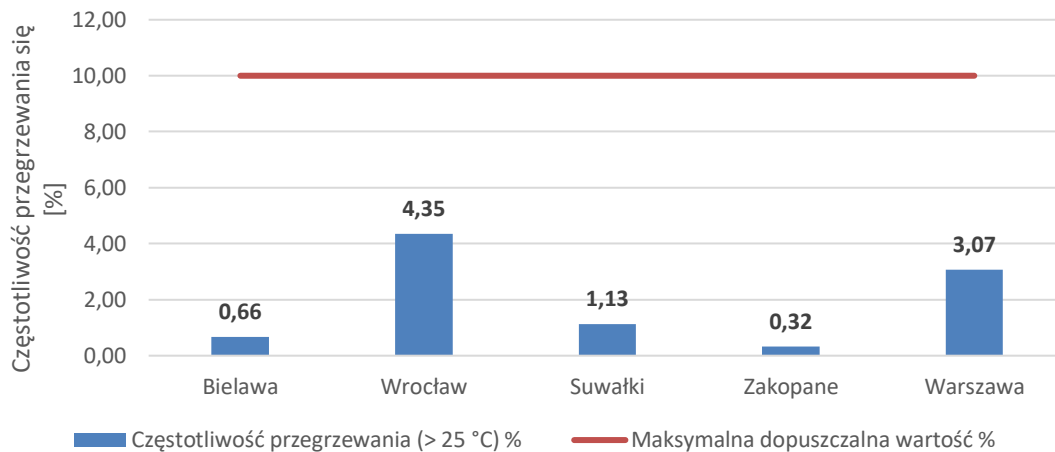
Następnie sprawdzono zapotrzebowanie proponowanego budynku na energię pierwotną budynku. Według wytycznych budownictwa pasywnego wartość ta nie może przekroczyć $120 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$, jednakże odnosząc się do aktualnych Warunków Technicznych, od 2021 roku dla budynków mieszkalnych wartość ta nie może przekraczać $70 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$. Poniżej na Rys. 5.101 w formie wykresu przedstawiono wyniki symulacji energetycznej dla pięciu lokalizacji.



Rys. 5.101 – Zapotrzebowanie budynku na nieodnawialną energię pierwotną

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdza się, że w analizowanych lokalizacjach zostanie spełniony wymóg aktualnych Warunków Technicznych i budownictwa pasywnego dotyczący zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną budynku. Najniższą wartość spośród wskazanych lokalizacji wystąpi we Wrocławiu – $57,76 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$, najwyższa – w Zakopanem.

Kolejnym parametrem jest częstotliwość przegrzewania się budynku. Zgodnie z wymogami budownictwa pasywnego wartość ta w ciągu całego roku nie może przekroczyć 10%. Poniżej na Rys. 5.102 przedstawiono wyniki symulacji w tym zakresie.



Rys. 5.102 – Częstotliwość przegrzewania się budynku

Na podstawie wartości przedstawionych na wykresie powyżej, proponowany budynek we wszystkich badanych pięciu lokalizacjach spełni wymaganie dotyczące częstotliwości przegrzewania się ($\leq 10\%$). Jednakże zdecydowanie najwyższą wartość odnotowano dla Wrocławia (4,35%) i to właśnie dla tej lokalizacji zostanie wykonana symulacja w zakresie wpływu zmian klimatu na charakterystykę energetyczną budynku, ponieważ na podstawie powyższych wyników istnieje największe prawdopodobieństwo, że wraz z ociepleniem klimatu w następnych latach to we Wrocławiu może dojść do przegrzewania się proponowanego budynku.

5.7. Symulacja energetyczna proponowanego budynku w prognozowanych klimatach

Przedmiotowy budynek, będący przedmiotem analizy niniejszej rozprawy, dzięki otrzymanym prognozowanym wartościom czynników klimatotwórczych, mógł zostać sprawdzony w prognozowanych klimatach. W arkuszu PHPP narzucono dane klimatyczne w postaci:

- temperatury otoczenia,
- temperatury punktu rosy,
- całkowitego promieniowania słonecznego.

otrzymane w wyniku symulacji w narzędziu meteonorm dla następujących scenariuszy:

- RCP 4.5 dla roku 2030,
- RCP 8.5 dla roku 2030,
- RCP 4.5 dla roku 2050,

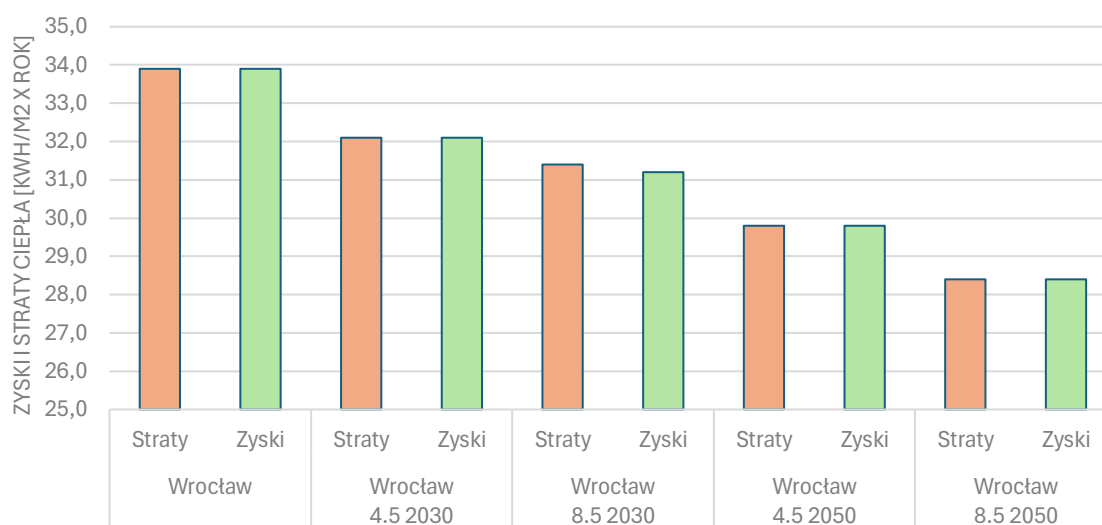
- RCP 8.5 dla roku 2050.

5.7.1. Weryfikacja spełnienia wybranych wymagań budownictwa pasywnego

W poniższym rozdziale sprawdzono wybrane parametry definiujące budynek pod kątem standardu pasywnego w zależności od klimatu i jego zmiany w czasie.

1. Zyski i straty ciepła wyrażone w kWh/m²rok

W pierwszej kolejności zaprezentowano całkowitą sumę zysków i strat ciepła w proponowanym budynku, co zostało przedstawione na Rys. 5.103.

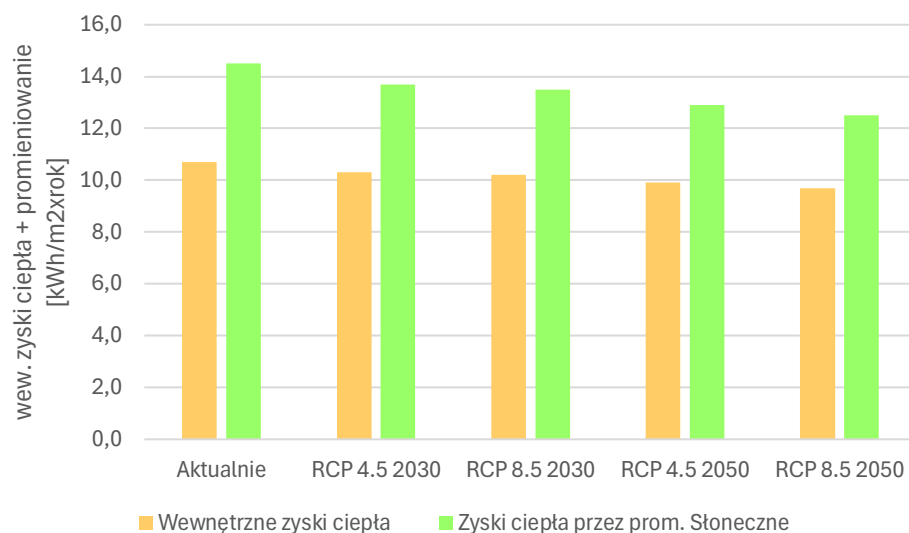


Rys. 5.103 – Wykres zysków i strat ciepła

Na podstawie powyższego wykresu stwierdza się, że w prognozowanych klimatach proponowany budynek będzie osiągał mniejsze straty, ale też i zyski ciepła w porównaniu do obecnie panującego klimatu. Najmniejsze straty i zyski ciepła odnotowano dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

2. Zyski ciepła z wewnętrznych zysków ciepła i zysków z promieniowania słonecznego wyrażone w kWh/m²rok

Na Rys. 5.104 przedstawiono wykres pokazujący wewnętrzne zyski ciepła i zyski ciepła z promieniowania słonecznego w zależności dla obecnego i prognozowanych klimatów.



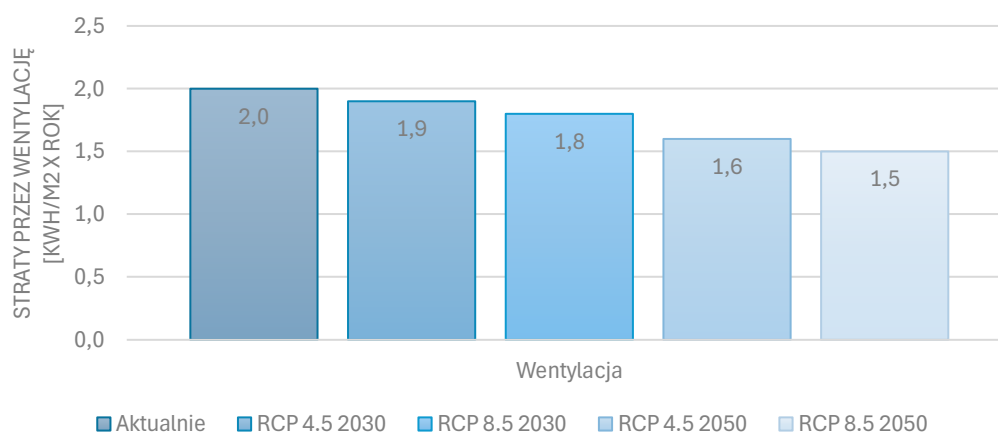
Rys. 5.104 – Wykres pokazujący wewnętrzne zyski ciepła i zyski ciepła z promieniowania słonecznego

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu wewnętrzne zyski ciepła oraz zyski z promieniowania słonecznego w proponowanym budynku będą nieznacznie malały.

3. Straty ciepła

Następnie zestawiono wszystkie składowe całkowitej straty ciepła, na które składają się:

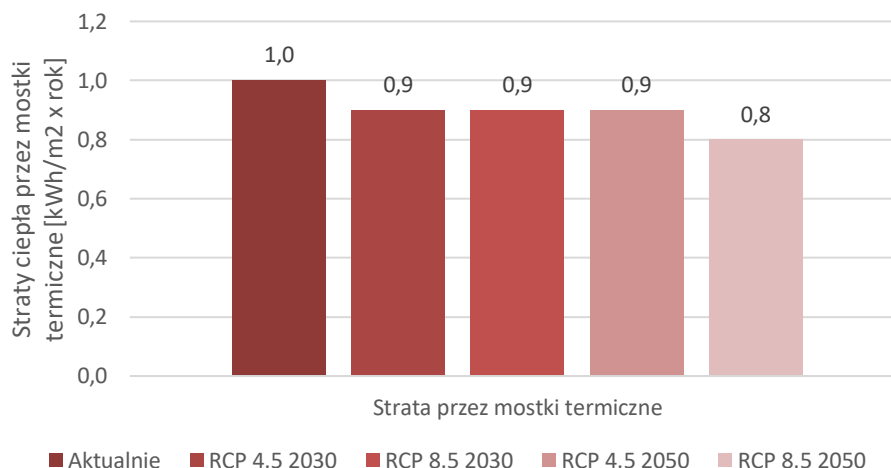
- Straty ciepła przez wentylację wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.105.



Rys. 5.105 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez wentylację

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez wentylację będą malały, aż do wartości 1,5 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

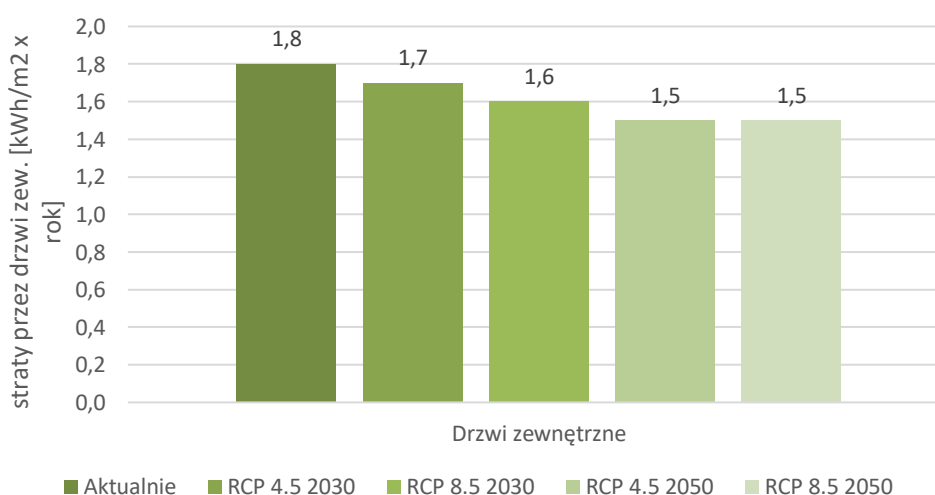
- Straty ciepła przez mostki termiczne wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.106.



Rys. 5.106 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez mostki termiczne

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez mostki termiczne będą nieznacznie malały, aż do wartości 0,8 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

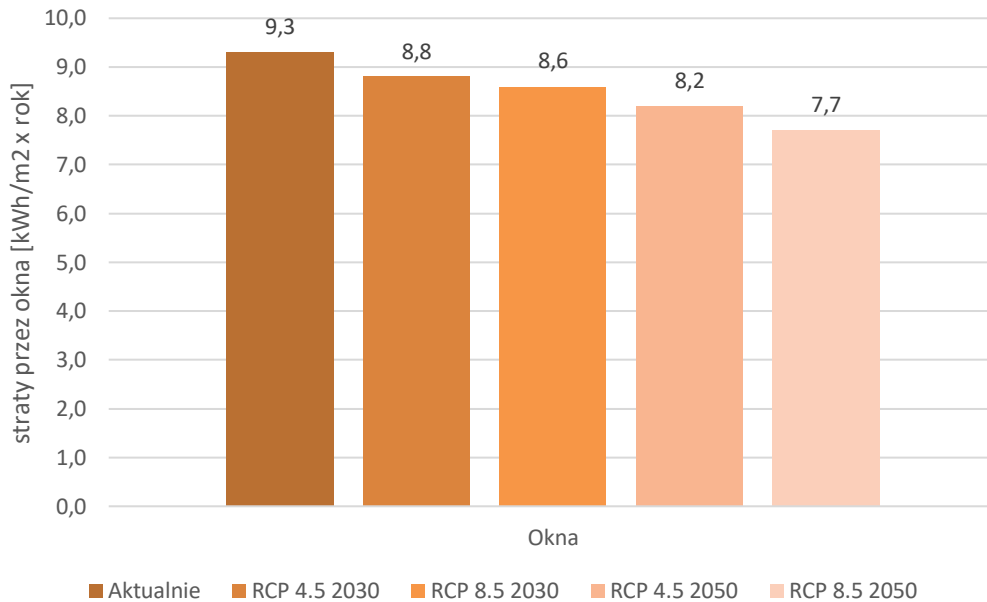
- Straty ciepła przez drzwi zewnętrzne wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.107.



Rys. 5.107 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez drzwi zewnętrzne

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez drzwi zewnętrzne będą nieznacznie malały, aż do wartości 1,5 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 4.5 i RCP 8.5 w 2050 roku.

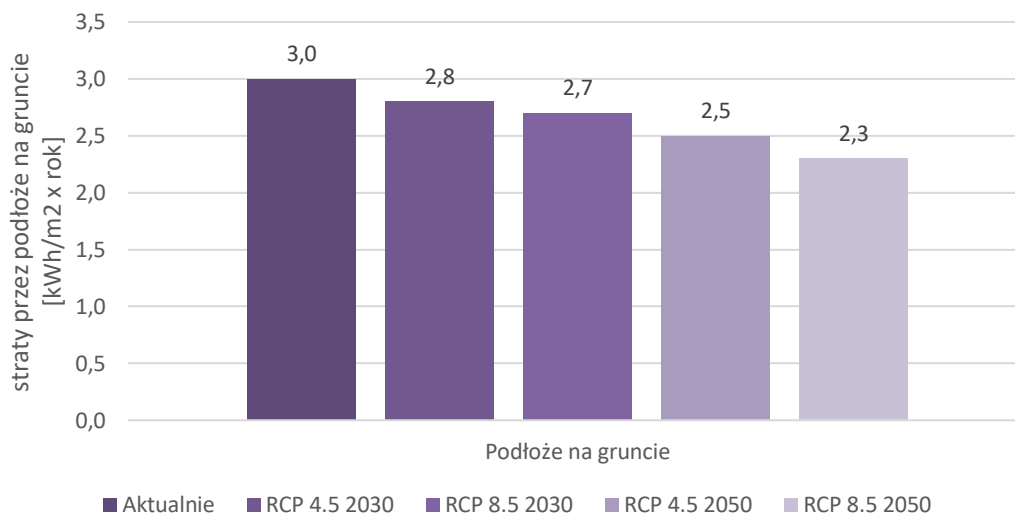
- Straty ciepła przez okna wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.108.



Rys. 5.108 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez okna

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez okna będą malały, aż do wartości 7,7 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

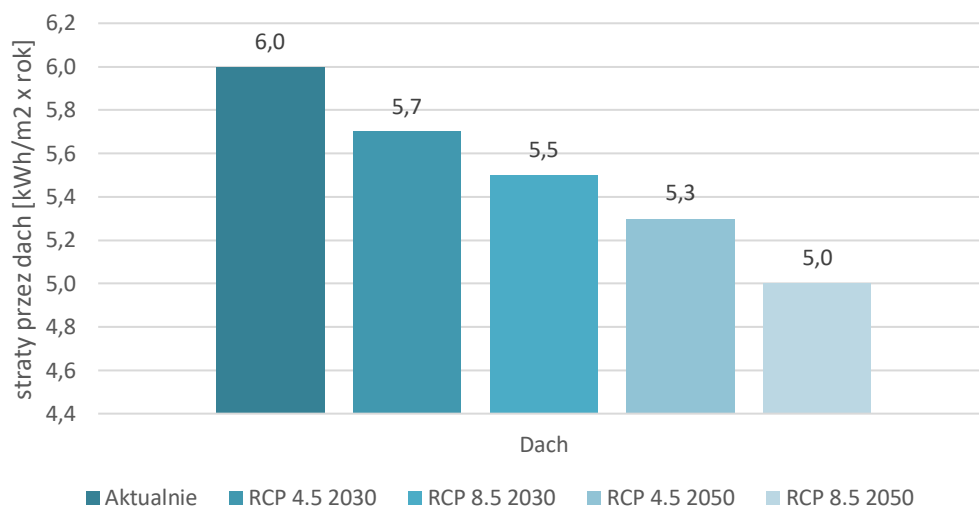
- Straty ciepła przez podłogę na gruncie wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.109.



Rys. 5.109 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez podłogę na gruncie

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez podłoże na gruncie będą malały, aż do wartości 2,3 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

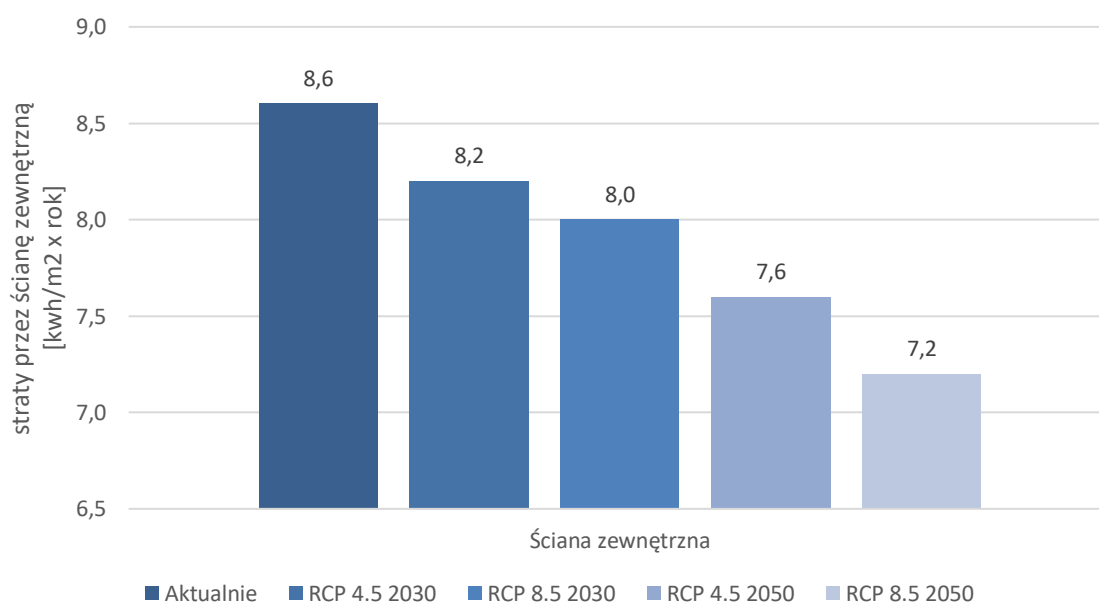
- Straty ciepła przez dach wyrażone w kWh/m²rok - **Rys. 5.110.**



Rys. 5.110 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez dach

Na podstawie powyższego wykresu, stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu, straty ciepła przez dach będą malały, aż do wartości 5,0 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

- Straty ciepła przez ścianę zewnętrzną wyrażone w kWh/m²rok - Rys. 5.111.



Rys. 5.111 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez ściany zewnętrzne

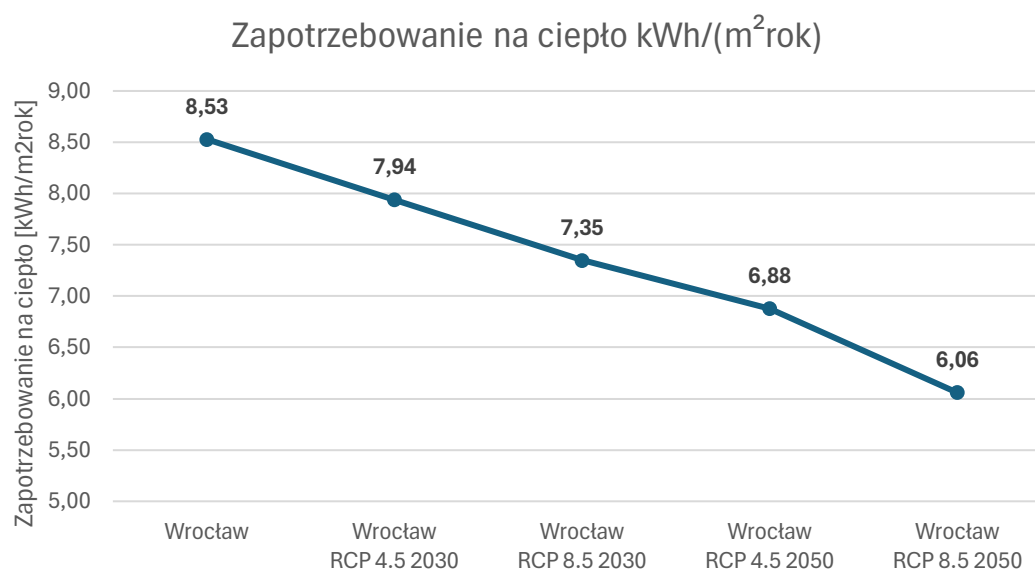
Na podstawie powyższych wykresów stwierdza się, że wraz z ociepleniem klimatu w następnych latach, straty ciepła w budynku przez ściany zewnętrzne będą malały, aż do wartości 7,2 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku.

5.7.2. Podsumowanie kluczowych parametrów

Jednym z kluczowym parametrów, będący wytyczną do określenia czy badany budynek spełnia wymogi budownictwa pasywnego jest zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania, określane jako zapotrzebowanie na ciepło budynku.

1. Zapotrzebowanie na ciepło

Na Rys. 5.112 przedstawiono wykres pokazujący zapotrzebowanie na ciepło proponowanego budynku w aktualnym i prognozowanym klimacie dla Wrocławia.

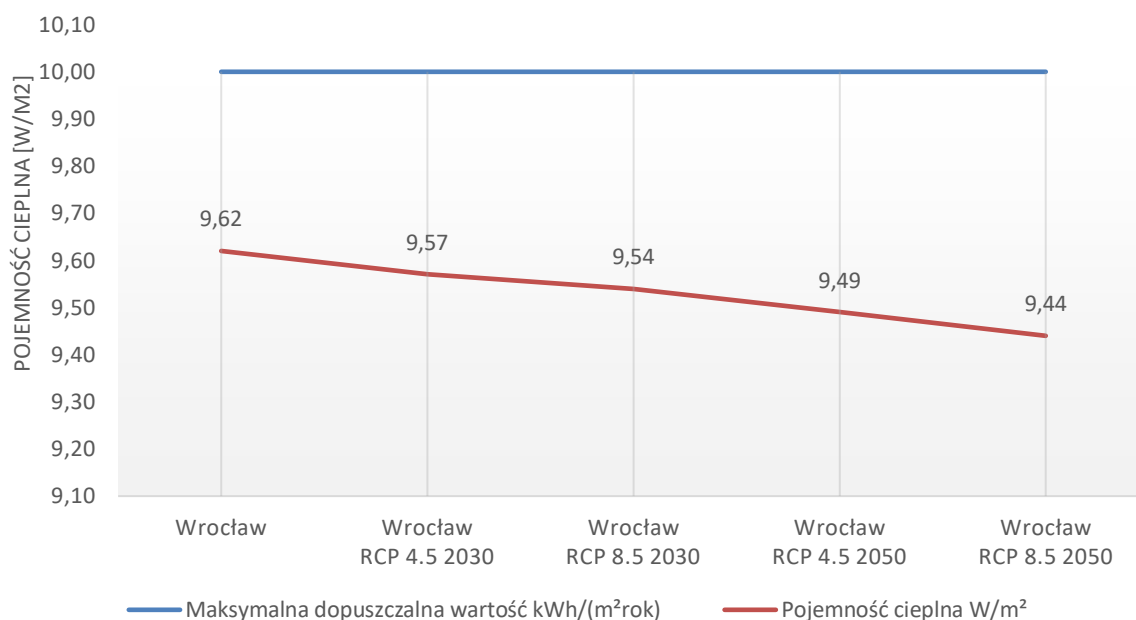


Rys. 5.112 – Wykres przedstawiający zapotrzebowanie na ciepło proponowanego budynku w aktualnym i prognozowanym klimacie

Na Rys. 5.112 powyżej przedstawiono spadek zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania od wartości 8,53 kWh/m²rok dla aktualnie panujących warunków klimatycznych we Wrocławiu do wartości 6,06 kWh/m²rok dla roku 2050 w warunkach wyznaczonych przez scenariusz RCP 8.5. Wraz z ociepleniem klimatu, budynek zmniejszy swoje zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania o niecałe 29%.

2. Pojemność cieplna

Na Rys. 5.113 poniżej pokazano zmianę pojemności cieplnej budynku w wyniku zmiany klimatu w różnych scenariuszach RCP.

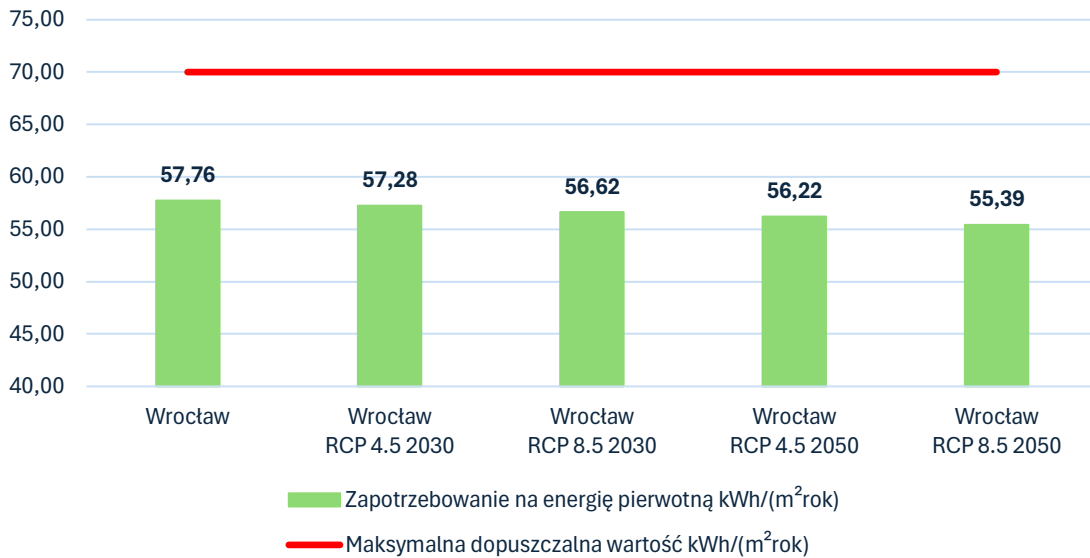


Rys. 5.113 - Zmiana pojemności cieplnej budynku dla czterech scenariuszy zmian klimatu w odniesieniu do aktualnej pojemności cieplnej

Według prognoz wartość pojemności cieplnej proponowanego budynku będzie spadała na przestrzeni kolejnych lat, spełniając minimalną wartość dopuszczalną, tj. 10W/m² dla budownictwa pasywnego.

3. Zapotrzebowanie na energię pierwotną EP

Poniżej na Rys. 5.114 przedstawiono dla czterech scenariuszy zmian klimatu, wartość zapotrzebowania na energię pierwotną EP.

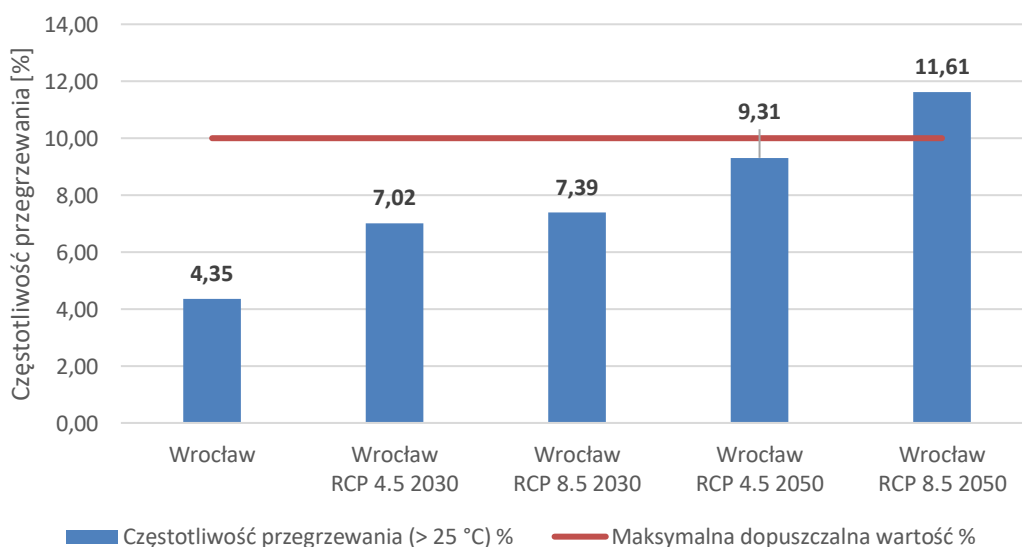


Rys. 5.114 – Zapotrzebowanie na energię pierwotną w odniesieniu do wartości wymaganej przez WT – 70 kWh/m²rok

Wartość zapotrzebowania na energię pierwotną budynku będzie się zmniejszała wraz z ocieplaniem się klimatu, osiągając wartość 55,39 kWh/m²rok dla scenariusza RCP 8.5 w roku 2050.

4. Częstotliwość przegrzewania budynku

Poniżej na Rys. 5.115 przedstawiono częstotliwość przegrzewania się budynku w czterech scenariuszach zmian klimatu w odniesieniu do wartości dla obecnie panującego klimatu.



Rys. 5.115 - Częstotliwość przegrzewania się budynku

Wartości przedstawione na powyższym wykresie wskazują, że w następnych latach częstotliwość przegrzewania się proponowanego budynku będzie się zwiększała i w 2050 r. dla scenariusza RCP 8.5 przekroczy maksymalną dopuszczalną wartość dla budynków pasywnych – 10%. Na tej podstawie można wnioskować, że zaistnieje konieczność stosowania systemu chłodzenia w kolejnych latach.

W wyniku dokonanej analizy zmiany klimatu dla takiego miasta jak Wrocław stwierdza się, że wraz z ocieplaniem się klimatu w następnych latach będzie malało zapotrzebowanie budynku na energię do ogrzewania – nawet do 29% dla 2050 roku. Jednakże wraz z ocieplaniem się klimatu stwierdza się również rosnący wskaźnik przegrzewania się budynku na przestrzeni całego roku. Wartość ta dla 2050 roku będzie, w zależności od scenariusza zmiany klimatu RCP, tuż pod lub nad dopuszczalną granicą komfortu wyznaczoną przez standardy budownictwa pasywnego, tj. 10%. Przekroczenie tej granicy wiąże się z koniecznością zastosowania dodatkowego rozwiązania w budynku w postaci systemu chłodzącego, a w konsekwencji z dodatkowym zapotrzebowaniem na energię do chłodzenia budynku.

W tym miejscu udowodniono drugą tezę stwierdzającą, że w wyniku ocieplania się klimatu, budynki, także te o najwyższej efektywności energetycznej, należy projektować uwzględniając możliwość ich przegrzewania się w przyszłości.

6. Analiza opłacalności wykonania proponowanego budynku pasywnego

W niniejszym punkcie dokonano oszacowania kosztu budowy przedmiotowego i proponowanego budynku, a następnie porównano obie otrzymane wartości. W kolejnym etapie określono, o ile mniej energii zużywa proponowany budynek od przedmiotowego i dokonano próby oszacowania w jakim czasie potencjalne oszczędności finansowe pochodzące z mniejszego zapotrzebowania na ciepło i wykorzystania odnawialnych źródeł energii przez proponowany budynek pokryją różnicę w koszcie budowy pomiędzy budynkiem proponowanym a przedmiotowym.

Oszacowanie wartości przedmiotowego i proponowanego budynku zostało wykonane przy pomocy wydawnictwa SEKOCENBUD, które stanowi zbiór biuletynów cen zebranych z rynku, wydawanych w każdym kwartale roku. W pierwszej kolejności dokonano oszacowania wartości przedmiotowego budynku w stanie deweloperskim. By wykonać taką kalkulację posłużono się cenami jednostkowymi dostępnymi w „Biuletynie cen obiektów budowlanych BCO 3/2023, cz. I – obiekty kubaturowe” (Rys. 6.1) wydawnictwa Sekocenbud dla budynku referencyjnego, najbardziej zbliżonemu swoim przeznaczeniem i parametrami do budynku istniejącego, zlokalizowanym w Bielawie. Jako budynek referencyjny wybrano „Dom jednorodzinny wolno stojący pasywny bez podpiwniczenia z pustaków silka E24”.

1110-141**DOM JEDNORODZINNY WOLNO STOJĄCY PASYWNY
BEZ PODPIWNICZENIA
Z PUSTAKÓW SILKA E24****OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDYNKU**

Technologia budowy: tradycyjna

Zapotrzebowanie energetyczne:Ep: 41,28 kWh/(m² · rok)Ek: 27,93 kWh/(m² · rok)EUco: 14,04 kWh/(m² · rok)

Budynek spełnia kryteria programu dopłat NFOŚiGW do domów energooszczędnych.

Podstawowe dane techniczno-użytkowe:Powierzchnia zabudowy 129,03 m²Powierzchnia użytkowa (bez powierzchni w pomieszczeniach o wys. poniżej 1,40 m i 50% pow. powyżej 1,40 m i poniżej 2,20 m) . . . 130,00 m²Powierzchnia kotłowni 5,23 m²Powierzchnia garażu 18,27 m²Powierzchnia netto 168,00 m²Kubatura brutto 777,94 m³Liczba kondygnacji nadziemnych: 1 +
poddasze użytkowe

Podpiwniczenie: brak

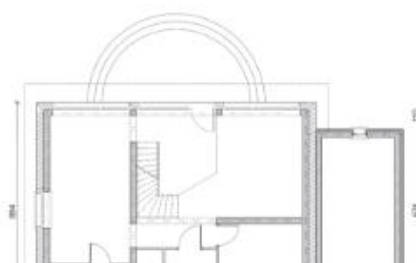
Ogrzewanie: miejscowe

Warunki gruntowe: grunt kat. III, poziom wody gruntowej poniżej poziomu posadowienia fundamentów.



PROJEKT: M&L LIPIŃSKY BIURO PROJEKTOWE, LIPIŃSKY DOMY

UL. BELGUSKA 69, 54-404 WROCLAW

Autorzy projektu: dr inż. arch. Ludwika Juchniewicz-Lipińska,
dr inż. arch. Miłosz Lipiński**Rys. 6.1** – Wycinek z biuletynu cen Sekocenbud**6.1. Wycena przedmiotowego budynku**

Kalkulacja szacunkowa wartości przedmiotowego budynku może zostać wykonana dzięki podobieństwu tego budynku do budynku referencyjnego z biuletynu poprzez prostą bryłę, brak podpiwniczenia. W szacowaniu wartości przedmiotowego budynku, skorzystano z następujących wartości dotyczących samej bryły budynku:

- powierzchnia zabudowy budynku (ozn. jako m² p.z.) – 183,28 m²,
- powierzchnia użytkowa (ozn. jako m² p.u.pod.) – 366,56 m²,
- powierzchnia netto (ozn. jako m² p.n.) - 366,56 m²,
- kubatura brutto – 916,00 m³,
- powierzchnia dachu (ozn. jako m² poł.) – 239,99 m²,
- powierzchnia ścian zewnętrznych – 329,09 m².

Poniżej w Tabeli 6.1 przedstawiono pełną kalkulację wartości całego przedmiotowego budynku.

Tabela 6.1 – Wycena pierwotnej inwestycji budynku w Bielawie

Opis	Jednostka	Cena jednostkowa	Ilość	Wartość wg jednostki [zł netto]
KONSTRUKCJE I ELEMENTY BUDOWLANE	m2 p.u. pod.		366,56	1 471 782,58
STAN ZEROWY	m2 p.z.	436,23	183,28	79 952,23
Roboty ziemne	m3	144,04		
wykonanie wykopu	m3	144,04		
Fundamenty	m3	905,56		
Betonowe	m3	615,33		
żelbetowe	m3	996,37		
Izolacje fundamentów	m2	37,38		
przeciwwilgociowe	m2	28,52		
cieplne i przeciwdźwiękowe	m2	153,95		
STAN SUROWY	m2 p.u. pod.	2238,3	366,56	601 996,19
Ściany nadziemna	m3			276 830,51
prefabrykowane	m2	841,20	329,09	276 830,51
STROPY, SKLEPIENIA, SCHODY, PODESTY	m2	546,09	239,99	131 056,14
Dach - konstrukcja	m2 poł.	156,82	239,99	37 635,23
Dach - pokrycie	m2 poł.	412,92	239,99	99 096,67
Podłóża i kanały wewnątrz budynku	m2 p.u. pod.	156,53	366,56	57 377,64
Izolacja nadziemna	m2 p.n.	285,95	366,56	104 817,83
przeciwwilgociowe	m2 p.n.	40,43	366,56	14 820,02
cieplne i przeciwdźwiękowe	m2 p.n.	245,52	366,56	89 997,81
Warstwy wyrównawcze pod posadzki	m2 p.n.	64,93	366,56	23 800,74
Stan wykończeniowy wewnętrzny	m2 p.u. pod.	1 467,10	366,56	537 780,18
Tynki i oblicowania	m2	107,26		
Okna i drzwi zewnętrzne	m2	1 225,70	83,88	102 811,72
drzwi wewnętrzne	m2	1 039,01		
ścianki działowe w technologiach suchych	m2	222,16		
Roboty malarskie	m2	22,04		
Posadzki	m2	251,10		
Stan wykończeniowy zewnętrzny	m2 p.u. pod.	687,62	366,56	252 053,99
Elewacje	m2	346,25		
<i>docieplenia</i>	m2	276,47		
Różne roboty zewnętrzne	m2	150,70		
Instalacje i urządzenia techniczne	m2 p.u. pod.	948,13	366,56	204 617,46
Instalacje i urządzenia kanalizacyjne i wodociągowe	m2 p.u. pod.	178,86	366,56	65 562,92
Instalacja wodociągowa	pkt pob.	750,48		
Instalacja kanalizacyjna	pkt odp.	1 416,18		

Opis	Jednostka	Cena jednostkowa	Ilość	Wartość wg jednostki [zł netto]
<i>kanalizacja sanitarna</i>	pkt odp.	1 416,18		
Instalacje i urządzenia techniki wentylacyjnej	m2 p.u. pod.	238,14	366,56	87 292,60
Wentylacja mechaniczna	m2 p.u. pod.	238,14		
Instalacje i urządzenia elektro-energetyczne	m2 p.u. pod.	135,18	366,56	49 551,58
Tablice rozdzielcze	m2 p.u. pod.	39,11		
Instalacja oświetleniowa	wypust	191,73		
Instalacja gniazd wtykowych	wypust	124,86		
Instalacja siłowa	wypust	805,23		
Instalacje i urządzenia teletechniczne i techniki informatycznej	m2 p.u. pod.	6,03	366,56	2 210,36
Instalacje alarmowe, dozoru i sygnalizacji	m2 p.u. pod.	1,81		
<i>instalacja przyzywowa i domofonowa</i>	wypust	235,28		
Instalacje strukturalne	m2 p.u. pod.	4,22		
<i>Instalacja sieci strukturalnych</i>	wypust	182,77		

Suma 1 676 400,04

cena za m2 4 573,33

Suma stanowiąca szacunek wartości przedmiotowego budynku w Bielawie, na podstawie cen dostępnych w biuletynie SEKOCENBUD, wynosi 1 676 400,04 zł netto, co w przeliczenie na m² budynku stanowi cenę 4 573,33 zł/m².

6.2. Wycena proponowanego budynku

W kolejnym etapie, w analogiczny sposób dokonano kalkulacji proponowanego budynku, która została dostosowana do standardu budynku pasywnego, tj. w przypadku budynku w Bielawie, zastosowano wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła, wykorzystano odnawialne źródła energii w postaci paneli fotowoltaicznych, zastosowano okna o wyższym współczynniku g i niższym współczynniku U_g oraz zmieniono grubości warstw w przegrodzie zewnętrznej w postaci ściany trójwarstwowej. Te czynniki zostały uwzględnione w kalkulacji, która została przedstawiona w postaci Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Wycena inwestycji doprowadzonej do standardu pasywnego

Opis	Jednostka	Cena jednostkowa	Ilość	Wartość wg jednostki [zł netto]
KONSTRUKCJE I ELEMENTY BUDOWLANE	m2 p.u. pod.			1 451 030,64
STAN ZEROWY	m2 p.z.	436,23	183,28	79 952,23
Roboty ziemne	m3	144,04		
wykonanie wykopu	m3	144,04		
Fundamenty	m3	905,56		
Betonowe	m3	615,33		
żelbetowe	m3	996,37		
Izolacje fundamentów	m2	37,38		
przeciwwilgociowe	m2	28,52		
cieplne i przeciwdźwiękowe	m2	153,95		
STAN SUROWY	m2 p.u. pod.	2 238,30	366,56	575 866,44
Ściany nadziemia	m3			250 700,76
prefabrykowane	m2	761,80	329,09	250700,76
STROPY, SKLEPIENIA, SCHODY, PODESTY	m2	546,09	239,99	131 056,14
Dach - konstrukcja	m2 poł.	156,82	239,99	37 635,23
konstrukcja drewniana	m2 poł.	139,89		
Dach - pokrycie	m2 poł.	412,92	239,99	99 096,67
dachówką	m2 poł.	369,94		
rynny i rury spustowe	m2 poł.	14,81		
przeszklenia	m2 poł.	1 756,65		
Podłoża i kanały wewnątrz budynku	m2 p.u. pod.	156,53	366,56	57 377,64
Izolacja nadziemia	m2	77,69		
przeciwwilgociowe	m2	31,52		
cieplne i przeciwdźwiękowe	m2	102,40		
Warstwy wyrównawcze pod posadzki	m2	65,01		
Stan wykończeniowy wewnętrzny	m2 p.u. pod.	1 481,77	366,56	543 157,98
Tynki i oblicowania	m2	107,26		
Okna i drzwi zewnętrzne	m2	1 286,99	83,88	107 952,30
drzwi wewnętrzne	m2	1 039,01		
ścianki działowe w technologiach suchych	m2	222,16		
Roboty malarskie	m2	22,04		
Posadzki	m2	251,10		
Stan wykończeniowy zewnętrzny	m2 p.u. pod.	687,62	366,56	252 053,99
Elewacje	m2	346,25		
<i>docieplenia</i>	m2	276,47		
Różne roboty zewnętrzne	m2	150,70		
Instalacje i urządzenia techniczne	m2 p.u. pod.	948,13	366,56	380 715,52
Instalacje i urządzenia kanalizacyjne i wodociągowe		178,86	366,56	50 735,57
Instalacja wodociągowa	pkt pob.	750,48		
Instalacja kanalizacyjna	pkt odp.	1 416,18		

Opis	Jednostka	Cena jednostkowa	Ilość	Wartość wg jednostki [zł netto]
<i>kanalizacja sanitarna</i>	pkt odp.	1 416,18		
Instalacje i urządzenia zaopatrzenia w ciepło	m2 p.u. pod.	389,91	366,56	142 925,41
Odnawialne źródła energii ciepłej	m2 p.u. pod.	389,91		
Instalacje i urządzenia techniki wentylacyjnej	m2 p.u. pod.	238,14	366,56	135 292,60
Wentylacja mechaniczna	m2 p.u. pod.	238,14	366,56	87 292,60
Rekuperator	liczba mieszkań	12 000,00	4	48 000,00
Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne	m2 p.u. pod.	135,18	366,56	49 551,58
Tablice rozdzielcze	m2 p.u. pod.	39,11		
Instalacja oświetleniowa	wypust	191,73		
Instalacja gniazd wtykowych	wypust	124,86		
Instalacja siłowa	wypust	805,23		
Instalacje i urządzenia teletechniczne i techniki informatycznej	m2 p.u. pod.	6,03	366,56	2 210,36
Instalacje alarmowe, dozoru i sygnalizacji	m2 p.u. pod.	1,81		
<i>instalacja przyzywowa i domofonowa</i>	wypust	235,28		
Instalacje strukturalne	m2 p.u. pod.	4,22		
<i>Instalacja sieci strukturalnych</i>	wypust	182,77		

Suma **1 831 746,16**

cena za m2 **4 997,13**

Suma stanowiąca szacunek wartości proponowanego budynku w standardzie pasywnym, na podstawie cen dostępnych w biuletynie SEKOCENBUD, wynosi 1 831 746,16 zł netto, co w przeliczenie na m² budynku stanowi cenę 4 997,13 zł/m².

6.3. Określenie czasu zwrotu nakładu poniesionego w dodatkowe inwestycje

W pierwszej kolejności określono różnicę w cenie za m² pomiędzy przedmiotowym budynkiem, a budynkiem proponowanym w standardzie pasywnym, co zostało pokazane w Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Kalkulacja różnicy wartości za m²

Stan deweloperski	Całkowity koszt [zł]	Cena za m ² [zł]
Dom tradycyjny	1 676 400,04	4 573,33
Dom w standardzie pasywnym	1 831 746,16	4 997,13
Różnica	155 346,11	423,79
		9,27%

Wyliczona różnica w wartości inwestycji obu budynków wynosi 423,79 zł za m² co sprawia, że budynek doprowadzony do standardu budownictwa pasywnego jest o 9,27% droższy od obecnie istniejącego budynku.

W celu wykonania kalkulacji czasu zwrotu poniesionych nakładów w doprowadzenie budynku do standardu pasywnego, przyjęto, że budynek jest ogrzewany z sieci miejskiej za pomocą gazu, którego średnia cena od 1 lipca 2024 r. według aktualnych stawek PGNiG wynosi 0,24355 zł za 1kWh. Poniżej w Tabeli 6.4, dokonano kalkulacji wartości rocznych kosztów ogrzewania przedmiotowego i proponowanego budynku doprowadzonego do standardu pasywnego.

Tabela 6.4 – Kalkulacja kosztu za energię ciepłą

Typ budynku	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/m ² rok]	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/rok]	Aktualna stawka od 1 lipca 2024 r. wg PGNiG [zł/kWh]	Koszt za rok grzewczy od 1 lipca 2024 r. [zł]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5] = [3] x [4]
Przedmiotowy budynek	42,90	15 725,42	0,24355	3 829,93
Proponowany budynek (pasywny)	12,10	4 435,38		1 080,24

Cena za rok grzewczy przedmiotowego budynku wyniosła według wyliczeń 3 829,93 zł, natomiast proponowanego budynku w standardzie pasywnym 1 080,24 zł. Różnica w rocznym koszcie ogrzewania pomiędzy oboma budynkami wynosi **2 749,69 zł**, co oznacza, że w budynku w standardzie pasywnym koszty ogrzewania są o ok. **71% niższe**.

Następnie sprawdzono wykorzystanie energii elektrycznej w budynku przed i po doprowadzeniu do standardu budownictwa pasywnego. Przeanalizowano zapotrzebowanie na energię elektryczną potrzebną do zasilania sprzętu domowego

i oświetlenia, ponieważ w obu budynkach wartość ta będzie taka sama, jednakże w proponowanym budynku pasywnym zostały zainstalowane panele fotowoltaiczne do produkcji energii elektrycznej, które w pełni pokrywają to zapotrzebowanie. Wartość ceny za 1kWh (1,13 zł) została zaczerpnięta z ostatniej faktury, którą otrzymał autor niniejszej pracy za wykorzystanie energii elektrycznej w lipcu 2024 r. Poniżej w Tabeli 6.5, dokonano kalkulacji wartości rocznych kosztów wykorzystania energii elektrycznej (energii końcowej) w przedmiotowym i proponowanym budynku doprowadzonym do standardu pasywnego.

Tabela 6.5 – Kalkulacja kosztu za energię elektryczną

Typ budynku	Zużycie energii elektrycznej [kWh/m2rok]	Zużycie energii elektrycznej [kWh/rok]	Aktualna stawka wg ostatniego rachunku autora pracy [zł/kWh]	Koszt za rok korzystania z energii elektrycznej [zł]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5] = [3] x [4]
Dom tradycyjny	21,70	7 954,35	1,13	8 988,42
Dom w standardzie pasywnym	21,70	7 954,35	Energia z OZE	0,00

Biorąc pod uwagę, że roczne zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną w postaci energii końcowej do zasilenia sprzętu i oświetlenia oraz fakt, że w budynku pasywnym całość tego zapotrzebowania jest pokrywane przez energię ze źródła odnawialnego, określono roczne oszczędności na tej części energii elektrycznej na poziomie **8 988,42 zł**.

Następnie w Tabeli 6.6 wyznaczono „rok po roku” sumę oszczędności w proponowanym budynku pasywnym, wynikających z szacowanych oszczędności na ograniczeniu zapotrzebowania na energię grzewczą (rocznie 2 749,69 zł) i z pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną przez źródła odnawialne (rocznie 8 988,42 zł), przy założeniu niezmienności cen energii grzewczej i elektrycznej w kolejnych latach.

W wyniku powyższej kalkulacji, określono, że w **czternastym roku użytkowania** proponowanego budynku różnica w poniesionych nakładzie doprowadzenia przedmiotowego budynku do standardu pasywnego (155 346,11 zł), zostanie zrekompensowana przez oszczędności w szacowanym koszcie za energię grzewczą i energię elektryczną.

Tabela 6.6 - Kalkulacja zwrotu poniesionych nakładów w proponowany budynek pasywny

Aktualny klimat			
Pełny rok użytkowania	Oszczędność z energii grzewczej [zł]	Oszczędność z energii elektrycznej [zł]	Suma oszczędności w danym roku [zł]
[1]	[2]	[3]	[4] = [2]+[3]
1	2 749,69	8 988,42	11 738,11
2	5 499,38	17 976,84	23 476,22
3	8 249,07	26 965,25	35 214,33
4	10 998,76	35 953,67	46 952,44
5	13 748,46	44 942,09	58 690,54
6	16 498,15	53 930,51	70 428,65
7	19 247,84	62 918,92	82 166,76
8	21 997,53	71 907,34	93 904,87
9	24 747,22	80 895,76	105 642,98
10	27 496,91	89 884,18	117 381,09
11	30 246,60	98 872,60	129 119,20
12	32 996,29	107 861,01	140 857,31
13	35 745,99	116 849,43	152 595,42
14	38 495,68	125 837,85	164 333,53

Należy podkreślić, że wartość ta jest jedynie wartością szacunkową, bazującą na założeniach o niezmienności cen energii elektrycznej i grzewczej w następnych latach. Ze względu na bardzo wysoką dynamikę zmiany cen surowców na rynku, w niniejszej pracy nie podjęto próby prognozy cen w następnych latach. Wspomniana dynamika zmiany cen jest spowodowana niestabilną sytuacją geopolityczną na świecie oraz zmianami regulacyjnymi w samej Unii Europejskiej. Próba wyznaczenia prognozy cen energii grzewczej i elektrycznej, nawet w perspektywie najbliższej dekady, mogłaby być obarczona zbyt dużym błędem, co w konsekwencji sprawiłoby, że w dość krótkim czasie powyższa pogładowa kalkulacja szacunkowa uległaby przedawnieniu. Warto jednak podkreślić, że wyliczony okres zwrotu poniesionych nakładów w postaci ok. czternastu lat jest wynikiem zadowalającym. Mając na uwadze rosnące ceny surowców, zaostrzenie regulacji emisyjnych i energetycznych w UE oraz zależność Polski od energii importowanej, inwestycja w ograniczenie zapotrzebowania na energię oraz inwestycja we własną, lokalną produkcję energii ze źródeł odnawialnych jest zabiegiem opłacalnym, który będzie zyskiwał na wartości również w następnych latach.

W tym miejscu udowodniono trzecią tezę niniejszej rozprawy doktorskiej stwierdzającą, że koszt budowy proponowanego budynku w standardzie

pasywnym jest wyższy od kosztu przedmiotowego budynku, a zwrot dodatkowo poniesionych nakładów finansowych w wyniku zmniejszenia zapotrzebowania na energię ciepłą i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest możliwy w co najmniej kilkunastoletniej perspektywie czasowej, która jest też zależna od czynników rynkowych i geopolitycznych.

7. Wnioski i uwagi końcowe

7.1. Podsumowanie

Coraz częstszym wyborem inwestorów w sektorze nowego budownictwa mieszkaniowego i użyteczności publicznej stają się budynki efektywne energetycznie, które cechuje niskie zapotrzebowanie na energię do ogrzewania oraz wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Ma to swoje podłoże w coraz większej świadomości nabywców i użytkowników tych budynków, którzy obserwując rosnące koszty energii cieplnej i elektrycznej, chcą, by nowy budynek był zarówno komfortowy, jak i możliwie jak najbardziej niezależny od niestabilności rynku energetycznego i wpływu tej niestabilności na koszty utrzymania budynku. Budynek pasywny to najwyższej jakości budynek efektywny energetycznie. Wymagane względem takiego budynku niskie zapotrzebowanie na energię ma także korzystny wpływ na środowisko, ponieważ taki budynek będzie odpowiedzialny jedynie za niewielką ilość emisji CO₂, a jego wysoka szczelność i izolacyjność termiczna w znaczącym stopniu uniezależniają go od wpływu zmian klimatu na zużycie energii.

Firma Betard jako jeden z liderów na rynku w produkcji prefabrykatów betonowych, rozumiejąca ideę budownictwa zrównoważonego, wprowadziła na rynek ścianę trójwarstwową z wysokiej jakości izolacją termiczną w postaci płyty PIR i współczynnikiem przenikania ciepła przegrody spełniającym nie tylko Warunki Techniczne [134], ale także wymogi budownictwa pasywnego.

W niniejszej rozprawie doktorskiej zrealizowano postawione w pracy następujące cele:

1. Opisano podstawowe parametry fizyki budowli i pod tym kątem przeanalizowano przegrody zewnętrzne przedmiotowego budynku.
2. W wyniku symulacji energetycznej określono charakterystykę energetyczną przedmiotowego budynku i porównano otrzymane wyniki z wymaganymi wartościami określającymi standard budynków pasywnych.
3. Wyznaczono rozwiązania doprowadzające przedmiotowy budynek do standardu budownictwa pasywnego w postaci:
 - zwiększenia izolacji w ścianie zewnętrznej z 12 do 18 cm,
 - zmianie okien na okna lepszym współczynnikiem przenikania ciepła U_g i U_f , a także korzystniejszych współczynnikiem g ,
 - zastosowania wentylacji z odzyskiem ciepła o sprawności 89%,

- zamontowania paneli fotowoltaicznych w celu obniżenia zapotrzebowania na energię pierwotną.

Dzięki wyznaczeniu ww. rozwiązań poprawiających charakterystykę energetyczną pierwotnego budynku, udowodniono pierwszą tezę niniejszej rozprawy doktorskiej, mówiącej, że ściana trójwarstwowa produkowana przez Betard sp. z o.o. może stanowić przegrodę w budynku o standardzie pasywnym, co zostało wykazane na stronie 154 rozprawy.

4. Wyznaczono i porównano wybrane czynniki klimatotwórcze w postaci średniej miesięcznej temperatury, średniego miesięcznego promieniowania słonecznego i średniej miesięcznej prędkości wiatru, odpowiadające takim lokalizacjom jak Wrocław, Suwałki, Zakopane i Warszawa. Następnie wyznaczono i porównano prognozowane wartości wybranych czynników klimatotwórczych w postaci średniej miesięcznej temperatury, średniej miesięcznej temperatury punktu rosy i średniego promieniowania słonecznego dla Wrocławia w roku 2030 i 2050.
5. Zweryfikowano i potwierdzono, że proponowany budynek będzie spełniał wymogi budownictwa pasywnego w różnych klimatach Polski, ale też w prognozowanym klimacie dla Wrocławia. Wyjątek stanowi klimat określony jako RCP 8.5 w 2050 roku, w którym to proponowany budynek w ciągu roku będzie się przegrzewał częściej niż jest to dozwolone w budynkach pasywnych ($\leq 10\%$).

Na stronie 175 niniejszej rozprawy wykazano, że proponowany budynek w prognozowanym klimacie dla Wrocławia określonym jako RCP 8.5 w 2050 roku będzie ulegał przegrzewaniu częściej niż wskazuje maksymalna dopuszczalna wartość częstotliwości przegrzewania równa 10% dla budynków pasywnych. Jest to dowód dla drugiej tezy niniejszej rozprawy, która mówi, że w wyniku ocieplania się klimatu, budynki, także te o najwyższej efektywności energetycznej, należy projektować uwzględniając możliwość ich przegrzewania się w przyszłości.

6. Opracowano rekomendacje w postaci dodatkowego źródła chłodu oraz zacienienia przegród w okresie letnim jako zabezpieczenie przed możliwym przegrzewaniem się budynku w następnych latach jako skutku zmian klimatycznych.
7. Porównano koszt budowy przedmiotowego i proponowanego budynku.

8. Określono czas zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na dostosowanie przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego w postaci 14 lat.

Na stronie 184 niniejszej rozprawy doktorskiej wykazano trzecią tezę niniejszej rozprawy doktorskiej stwierdzającą, że koszt budowy proponowanego budynku w standardzie pasywnym jest wyższy od kosztu przedmiotowego budynku (o 9,27%), a zwrot dodatkowo poniesionych nakładów finansowych w wyniku zmniejszenia zapotrzebowania na energię cieplną i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest możliwy w co najmniej kilkunastoletniej perspektywie czasowej.

7.2. Wnioski

Problem naukowy niniejszej rozprawy doktorskiej został przedstawiony w rozdziale 2.1. w formie pytań. Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski wynikające z niniejszej rozprawy doktorskiej, odpowiadające na postawione w rozdziale 2.1 pytania:

1. Przenalizowano podstawowe parametry fizyki budowli przegród zewnętrznych przedmiotowego budynku, ze szczególnym uwzględnieniem ściany zewnętrznej w postaci ściany trójwarstwowej prefabrykowanej firmy Betard, która została sprawdzona także pod kątem liniowych i punktowych mostków termicznych oraz badań cieplno - wilgotnościowych. Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej przedmiotowego budynku nie spełnia wymagań budownictwa pasywnego ($\leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) i wymaga zwiększenia grubości warstwy izolacji termicznej. Ściana zewnętrzna została zaprojektowana poprawnie pod kątem badań cieplno - wilgotnościowych. Występuje mostek termiczny na styku ściany zewnętrznej i podłogi na gruncie, który należy uwzględnić w obliczeniach charakterystyki energetycznej. Wartość punktowych mostków cieplnych w ścianie zewnętrznej przedmiotowego budynku jest pomijalnie mała i nie należy ich uwzględniać w dalszych obliczeniach.
2. Określono charakterystykę energetyczną przedmiotowego budynku w wyniku symulacji energetycznej przy wykorzystaniu arkusza PHPP do oceny budynków pod kątem standardu pasywnego. Przedmiotowy budynek nie spełnia wymagań budownictwa pasywnego w zakresie zapotrzebowania na ciepło (**42,90 kWh/m²rok** $\geq 15 \text{ kWh/m}^2\text{rok}$) oraz częstotliwości przegrzewania się budynku (**25,57%** $\geq 10\%$).

3. Wyznaczono rozwiązania doprowadzające przedmiotowy budynek do spełnienia standardu budynku pasywnego. Dzięki zwiększeniu izolacji w ścianie zewnętrznej z 12 do 18 cm, zmianie okien na te o lepszym współczynniku przenikania ciepła U_g i U_f , a także o korzystniejszym współczynniku g , zastosowaniu wentylacji z odzyskiem ciepła o sprawności 89% oraz zamontowaniu paneli fotowoltaicznych zmniejszono zapotrzebowanie na energię do ogrzewania o **71%**. Powyższe rozwiązania nie gwarantują analogicznej skuteczności w innych przykładach budynków, ponieważ każdy budynek należy rozpatrywać indywidualnie. Warto jednak podkreślić, że mogą one stanowić drogowskaz i kierunek w dążeniu do osiągnięcia wymaganych przez budownictwo pasywne parametrów. W każdym z analizowanych przypadków należy zweryfikować bilans energetyczny budynku i nakreślić obszary, w których występują największe straty ciepła.
4. Przy udziale autora niniejszej rozprawy, Betard sp. z o.o. dokonał wdrożenia ściany trójwarstwowej ze zwiększoną warstwą izolacji termicznej w postaci płyty PIR (z 12 cm na 18 cm) na rynek budowlany poszerzając swoją ofertę o produkt, którego współczynnik przenikania ciepła spełnia wymogi budownictwa pasywnego.
5. Analizując wybrane czynniki klimatotwórcze dla 4 lokalizacji w Polsce, stwierdza się, że najwyższe średnie miesięczne temperatury występują we Wrocławiu, natomiast najniższe w Zakopanem i w Suwałkach. Zauważalne różnice w promieniowaniu rozproszonym występują w okresie letnim od maja do sierpnia i najwyższe wartości zostały odnotowane dla Wrocławia i Warszawy. Średnia miesięczna prędkość wiatru dla Wrocławia, Warszawy i Suwałk osiąga porównywalne wartości w ciągu całego roku.
6. Analizując wybrane prognozowane czynniki klimatotwórcze dla Wrocławia, stwierdza się, że prognozowane wartości średniej miesięcznej temperatury wskazują na dość duże odchylenie od wartości aktualnych dla scenariusza RCP 8.5 dla roku 2050 (między 2°C a 3°C) oraz dla scenariusza RCP 4.5 dla roku 2050 (między 1 a 2°C). Dla wszystkich miesięcy we wszystkich czterech przeanalizowanych scenariuszach odnotowano choćby minimalny wzrost średniej miesięcznej temperatury otoczenia. Otrzymane wyniki wskazują na ocieplenie klimatu i podnoszenie się wartości średnich miesięcznych temperatur. Analogiczne wartości średniej miesięcznej temperatury punktu rosy będą rosły w kolejnych latach. Może przyczynić się to do zwiększenia ilości

pary wodnej w atmosferze, a w konsekwencji do intensyfikacji opadów deszczu i śniegu.

7. W wyniku symulacji energetycznej proponowanego budynku w różnych regionach Polski, stwierdza się, że budynek będzie spełniał wymogi budownictwa pasywnego w zakresie zapotrzebowania energii na ogrzewanie, częstotliwości przegrzewania się budynku oraz zapotrzebowania na energię pierwotną we wszystkich 5 rozpatrywanych lokalizacjach (Bielawa, Wrocław, Suwałki, Warszawa i Zakopane).
8. Na podstawie symulacji energetycznej proponowanego budynku w prognozowanych klimatach dla Wrocławia, stwierdzono, że wraz z ocieplaniem się klimatu zmniejszeniu ulegnie pojemność cieplna budynku, jego zapotrzebowanie na energię grzewczą, ale też i na energię pierwotną. Jednakże wraz z ocieplaniem się klimatu stwierdza się również rosnącą częstotliwość przegrzewania się budynku na przestrzeni całego roku. Wartość ta dla scenariusza RCP 8.5 w 2050 roku będzie przekraczała dopuszczalną granicą komfortu wyznaczoną przez standardy budownictwa pasywnego, tj. 10%. Przekroczenie tej granicy wiąże się z koniecznością zastosowania dodatkowego rozwiązania w budynku w postaci systemu chłodzącego, a w konsekwencji z dodatkowym zapotrzebowaniem na energię do chłodzenia budynku.
9. Proponowany budynek będzie droższy od przedmiotowego o 155 346,11 zł (9,27%). Wartość ta jest odzwierciedleniem aktualnego średniego zakresu dodatkowych inwestycji w efektywność energetyczną budynku, by uzyskać standard pasywny.
10. Określono czas zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na dostosowanie przedmiotowego budynku do standardu budownictwa pasywnego w wyniku prognozowanych oszczędności na zapotrzebowaniu na energię grzewczą i wykorzystaniu energii elektrycznej z OZE. Na podstawie aktualnych rynkowych cen energii określono, że poniesione dodatkowe nakłady finansowe zostaną zbilansowane przez oszczędności na energii grzewczej i elektrycznej w 14 lat. Wyliczony czas jest wartością poglądową, jednak mogący stanowić mocny argument opłacalności inwestowania w budownictwo efektywne energetycznie, w tym w budownictwo pasywne.

7.3. Argumentacja potrzeby wdrożenia produktu

W akapicie 5.1 niniejszej rozprawy przeanalizowano produkt firmy Betard pod kątem fizyki budowli w postaci współczynnika przenikania ciepła, liniowych i punktowych mostków termicznych oraz wykonano badania ciepło-wilgotnościowe. Badania te wykazały, że przegroda została zaprojektowana prawidłowo względem Warunków Technicznych i obowiązujących norm [134] [138]. W wyniku symulacji energetycznej istniejącego budynku, w bilansie energetycznym odnotowano straty ciepła przez ścianę zewnętrzną na poziomie 14,2 kWh/m²rok przy współczynniku przenikania ciepła równym 0,163 W/mK. W wyniku modyfikacji grubości warstw ściany:

- warstwa nośna żelbetowa – z 23 cm do 18 cm,
- warstwa izolacja z płyty PIR – z 12 cm do 18 cm,
- warstwa elewacyjna żelbetowa – niezmienna grubość 7 cm,

sumaryczna grubość ściany zwiększyła tylko o 1 cm (z 42 do 43 cm). W wyniku tego działania, a przede wszystkim dzięki zwiększeniu grubości izolacji termicznej, osiągnięto współczynnik przenikania ciepła równy 0,114 W/mK i spełniono kryterium dla budynków pasywnych ($\leq 0,15$ W/mK), ale także zmniejszono straty ciepła przez ścianę zewnętrzną do wartości 9,9 kWh/m²rok. Wyniki te pokazują, że dzięki niewielkiej modyfikacji grubości poszczególnych warstw w przegrodzie, można osiągnąć ok. 30% mniejsze straty ciepła i produkt możliwy do zastosowania w budynkach o bardzo wysokiej efektywności energetycznej. Na podstawie powyższych wniosków stwierdzono, że zmodyfikowany produkt firmy Betard może znaleźć zastosowanie w budynkach pasywnych mieszkaniowych i użyteczności publicznej i będzie on stanowić realną korzyść w poszerzeniu oferty producenta podnosząc jego konkurencyjność na rynku budowlanym.

7.4. Proponowane kierunki badań

Badania przeprowadzone w rozprawie doktorskiej wskazują na ich przydatność w zakresie wyznaczenia obszaru rozwiązań dostosowujących budynki spełniający Warunki Techniczne do standardu budynków pasywnych. Wykazano, że w przypadku ściany zewnętrznej wystarczy zmodyfikować grubości warstw, natomiast należy także zastosować wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła oraz niezbędne będzie też wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. W pracy przedstawiono także wpływ zmian klimatu na charakterystykę

energetyczną budynku. Kontynuacja tematu powinna dotyczyć takich zagadnień jak:

1. Oszacowanie śladu węglowego budynku, co może służyć do oceny budynków względem wymogu zeroemisyjności nowych budynków użyteczności publicznej od 2028 r. i wszystkich nowych budynków od 2030 r.
2. Określenie mapy rekomendacji dostosowujących budynki do standardu pasywnego w zależności od lokalizacji i klimatu panującego w danej lokalizacji.
3. Opracowanie uniwersalnego kalkulatora zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych w dostosowanie budynku do najwyższych standardów energooszczędności w wyniku oszczędności na zapotrzebowaniu na energię i dywersyfikacji źródeł energii z wykorzystaniem energii odnawialnej.

7.5. Praktyczne zastosowanie przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej dowodzą ich przydatność w ocenie możliwości zastosowania prefabrykacji betonowej w budynkach o standardzie pasywnym, także przy uwzględnieniu ocieplenia klimatu w następnych latach. Praktyczne zastosowanie przeprowadzonych badań wskazano poniżej:

1. Opracowane rozwiązania umożliwiającego doprowadzenie budynku spełniającego Warunki Techniczne do standardu budownictwa pasywnego mogą stanowić kierunek działania dla pozostałych istniejących budynków, których właściciele/inwestorzy chcą zwiększyć ich efektywność energetyczną.
2. Wykazanie możliwości wykorzystania prefabrykacji betonowej w budynkach pasywnych daje możliwość poszerzenia zakresu swojej oferty nie tylko dla firmy Betard, ale także innych producentów prefabrykatów betonowych.
3. Analiza porównawcza klimatu w różnych regionach Polski oraz analiza zmian klimatycznych na przestrzeni kolejnych lat, stanowi bazę do działań projektowych, uwzględniających zmianę czynników klimatotwórczych środowiska zewnętrznego budynku. Takie badanie umożliwi wykazanie, że projektowany budynek zachowa swoje właściwości także w innym klimacie.

4. Analiza porównawcza kosztu wykonania budynku spełniającego aktualne Warunki Techniczne, a budynku doprowadzonego do standardu pasywnego pokazuje szacowany dodatkowy nakład zastosowanych rozwiązań. Powyższe działanie może służyć do szacowania budżetów inwestora, a także do przygotowania analizy finansowej opłacalności takiego rozwiązania.
5. Zastosowanie aplikacyjne ma kalkulacja czasu zwrotu dodatkowo poniesionego nakładu, bazująca na rynkowych cenach energii grzewczej i elektrycznej. Baza wiedzy oraz zastosowana metodyka obliczeń mają potencjał do stworzenia kalkulatora, który będzie do uniwersalnego zastosowania dla reprezentantów rynku budowlanego.

KONIEC

8. Bibliografia

- [1] W. Feist, „Passive houses in practice,” *The Building Physics Calendar. Ernst & Sohn, Berlin*, pp. 675-741, 2007.
- [2] W. Feist, Definition of passive houses, 2006.
- [3] A. Górka, „Największy w Polsce certyfikowany pasywny budynek biurowy-specyfika, fizyka budowli i systemy HVAC,” *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 2023.
- [4] W. Feist, „Cost efficient passive houses in central european climate,” *Passive House Inst., Darmstadt (DE)*, 1 7 1998.
- [5] A. Kaliszuk-Wietecha i A. Węglarz, Nowoczesne budynki energoefektywne: znowelizowane warunki techniczne, Polcen, 2019.
- [6] F. Nesi, Passivhaus, Maggioli S.p.A., 2017.
- [7] W. Derkowski, „Prefabrykacja betonowa-zrównoważone rozwiązanie dla budownictwa,” *Materiały Budowlane*, 2021.
- [8] H. Wilden, Precast and Prestressed Concrete 7th ed., Prestressed Concrete Inst, 2014.
- [9] G. Adamczewski i P. Woyciechowski, „Prefabrykacja - jakość, trwałość, różnorodność, cz.1,” *Stowarzyszenie Producentów Betonu*, 2014.
- [10] G. Adamczewski i P. Woyciechowski, „Kierunki rozwoju prefabrykacji,” *Materiały Budowlane*, 2019.
- [11] E. KS., „Precast concrete structures,” *Crc Press*, 2019.
- [12] G. Woyciechowski, „Prefabrykacja betonowa w zrównoważonym budownictwie,” *Materiały budowlane*, pp. 16-19, 2018.
- [13] M. Szruba, „Nowoczesne prefabrykacja,” *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 4 2016.
- [14] W. Derkowski, „Prefabrykacja betonowa krokiem w kierunku budownictwa o obiegu zamkniętym,” *Beton - niskoemisyjny materiał budowlany*, 2021.
- [15] A. Benayoune, A. Samad, D. Trikha, A. Ali i S. Ellinna, „Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich compositepanel – experimental and theoretical investigations,” *Construct. Build. Mater.*, p. 580–592, 2008.
- [16] K. Schabowicz, B. Witkowski i M. Moczko, „Prefabrykacja betonowa we współczesnym budownictwie mieszkaniowym,” w *Dni Betonu*, Wisła, 2023.

-
- [17] A. Orchowska, „The role of prefabrication in shaping the residential architecture of the twenty first century.,” *Housing Environ*, pp. 69-70, 2020.
- [18] G. I. N. Budowlanego, „Katastrofy budowlane w Polsce w 2021 roku,” 2022.
- [19] P. Woyciechowski i G. Adamczewski, „Aspekty materiałowo-technologiczne w strategii realizacji budownictwa prefabrykowanego XXI wieku,” *Materiały Budowlane*, 11 2021.
- [20] A. Węglarz, O. Kulik i T. Skoczkowski, „Niskoemisyjne budownictwo w Polsce w kontekście Europejskiego Zielonego Ładu,” *Materiały Budowlane*, 2021.
- [21] M. Moczko, „Szczelne ściany zespolone,” *Inżynier budownictwa*, pp. 66-67, 4 2021.
- [22] M. Moczko i M. Lisewski, „Prefabrykowane ściany zespolone z izolacją termiczną,” *Builder*, 10 2021.
- [23] K. Schabowicz, B. Witkowski i M. Moczko, „Izolacje we współczesnej prefabrykacji betonowej,” *Izolacje*, 5 2021.
- [24] Schöck, Fyzyka budowli - podręcznik. Podstawy ochrony cieplno-wilgotnościowej, Schöck, 2018.
- [25] H. Hens, „Building physics-heat, air and moisture: fundamentals, engineering methods, material properties and exercises,” *John Wiley&Sons*, 2023.
- [26] K. Firkowicz - Pogorzelska, „Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych,” *Instytut Techniki Budowlanej*, pp. 33-53, 2001.
- [27] A. Kaczmarek, M. Wesołowska, P. Szczepaniak i K. Pawłowski, „Zagadnienia fizyczne w termomodernizacji i remontach obiektów budowlanych,” *Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego*, 2019.
- [28] A. Węglarz i P. Narowski, „The optimal thermal design of residential buildings using energy simulation and fuzzy sets theory,” *Building Simulation*, 2011.
- [29] M. Wesołowska i P. Szczepaniak, „Metoda obliczeń strat ciepła przez przenikanie a wartość emisji unikniętej CO₂,” *Inżynier Budownictwa*, 2023.
- [30] M. Wesołowska i K. Pawłowski, Aspekty związane z dostosowaniem obiektów istniejących do standardów budownictwa energooszczędnego, Agencja Reklamowa TOP, 2016.
- [31] W. Feist, Z. Bastian, W. Ebel, E. Gollwitzer, J. Grove-Smith, O. Kah, B. Kaufmann, B. Krick, R. Pfluger, J. Schneiders i J. Steiger, „Passivhaus Projektierungs-Paket v.9,” *Passivhaus Institut, Darmstadt*, 2015.
- [32] Y. Yang, K. Javanroodi i V. Nik, „Climate change and energy performance of European residential building stocks – A comprehensive impact assessment using climate big data from the coordinated regional climate downscaling experiment,” *Applied Energy*, 2021.

- [33] S. Attia, P. Kosiński, R. Wójcik, A. Węglarz, D. Koc i O. Laurent, „Energy efficiency in the polish residential building stock: A literature review,” *Journal of Building Engineering*, 1 2022.
- [34] S. Yu, Y. Liu, D. Wang, A. Bahaj, Y. Wu i J. Liu, „Review of thermal and environmental performance of prefabricated buildings: Implications to emission reductions in China,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.
- [35] P. Kosinski, R. Wójcik i A. Rosiński, „An influence of temperature on thermal conductivity of loose fill insulations of natural origin,” *Journal of Physics: Conference Series*, 2023.
- [36] E. Walsh, *Understanding Passivhaus*, Emma Walsh First In Architecture, 2020.
- [37] A. Tataru i S. Aurora, „Study of the possibility of implementation in Finland of the Passivhaus concept in order to reduce energy consumption,” w *MATEC Web of Conferences*, 2020.
- [38] J. Schnieders, T. Eian, M. Filippi, J. Florez, B. Kaufmann, S. Pallantzas, M. Paulsen, E. Reyes, M. Wassouf i S. Yeh, „Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones,” *Energy Efficiency*, 2020.
- [39] Z. Tian, X. Zhang, X. Jin, X. Zhou, B. Si i X. Shi, „Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review,” *Energy and Buildings*, 2018.
- [40] D. Johnston, M. Siddall, O. Ottinger, S. Peper i W. Feist, „Are the energy savings of the passive house standard reliable? A review of the as-built thermal and space heating performance of passive house dwellings from 1990 to 2018,” *Energy Efficiency*, 2020.
- [41] D. Heim i A. Miszczuk, „Modelling building infiltration using the airflow network model approach calibrated by air-tightness test results and leak detection,” *Building Services Engineering Research and Technology*, 6 2020.
- [42] A. Civic i B. Vucijak, „Multi-criteria optimization of insulation options for warmth of buildings to increase energy efficiency,” *Procedia Engineering*, 2014.
- [43] K. Klingenberg, „Passive House (Passivhaus),” *Sustainable Built Environments*, 2020.
- [44] W. Feist, *Podstawy budownictwa pasywnego*, Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, 2006.
- [45] A. Węglarz, „Budownictwo energooszczędne w Polsce,” *Rynek Instalacyjny*, 2009.
- [46] W. Feist, W. Ebel, S. Peper, W. Hasper, R. Pfluger i M. Kirchmair, „25 Jahre Passivhaus Darmstadt Kranichstein,” *Passivhaus Institut, Darmstadt*, 2016.
- [47] A. Węglarz, „Dom energooszczędny Cz. 3: Ogrzewanie domu energooszczędnego,” *Budujemy dom*, 10 2017.

-
- [48] D. Borelli, P. Cavalletti, A. Marchitto i C. Schenone, „A comprehensive study devoted to determine linear thermal bridgestransmittance in existing buildings,” *Energy and Buildings*, 2020.
- [49] F. Ochs, G. Dermentzis i W. Feist, „Minimization of the residual energy demand of multi-storey passive houses–energetic and economic analysis of solar thermal and PV in combination with a heat pump,” *Elsevier*, pp. 1124-1133, 1 1 2014.
- [50] T. Godlewski, Ł. Mazur, O. Szlachetka, M. Witowski, S. Łukasik i E. Koda, „Design of passive building foundations in the Polish climatic conditions,” *Energies*, 2021.
- [51] C. Piccardo, A. Dadoo, L. Gustavsson i U. Tettey, „Retrofitting with different building materials: Life-cycle primary energy implications,” *Energy*, 2020.
- [52] C. Ionescu, T. Baracu, G. Vlad, H. Necula i A. Badea, „The historical evolution of the energy efficient buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [53] A. Bauer, S. Möller, B. Gill i F. Schröder, „When energy efficiency goes out the window: How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany,” *Energy Research & Social Science*, 2021.
- [54] A. Węglarz, „Dom energooszczędny. Cz. 2. Wentylacja w domu energooszczędnym,” *Budujemy dom*, 2017.
- [55] A. Węglarz i J. Żurawski, „Aktualne wymagania prawne w zakresie efektywności energetycznej,” *Izolacje*, pp. 26-31, 2015.
- [56] D. Prakash i P. Ravikumar, „Transient analysis of heat transfer across the residential building roof with PCM and wood wool- A case study by numerical simulation approach,” *Archives of Civil Engineering*, p. 483-497, 4 2013.
- [57] E. Zilberberg, P. Trapper, I. Meir i S. Isaac, „The impact of thermal mass and insulation of building structure on energy efficiency,” *Energy and Buildings*, 2021.
- [58] J. Grove-Smith, V. Aydin, W. Feist, J. Schnieders i S. Thomas, „Standards and policies for very high energy efficiency in the urban building sector towards reaching the 1.5 C target,” *Elsevier*, pp. 103-114, 1 2 2018.
- [59] A. Mischczuk i D. Heim, „Parametric study of air infiltration in residential buildings – the effect of local conditions on energy demand,” *Energies*, 2021.
- [60] A. Moreno-Rangel, T. Sharpe, G. McGill i F. Musau, „Indoor air quality in Passivhaus dwellings: A literature review,” *International journal of environmental research and public health*, 2020.
- [61] S. Firląg i A. Chmielewski, „Defining the Polish nearly Zero Energy Building (nZEB) renovation standard,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.

- [62] S. Marinelli, R. Gamberini, B. Rimini i F. Nesi, „Implementing the nearly zero-energy buildings notion in industrial facilities,” *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2021.
- [63] A. Węglarz i D. Pierzchalska, „Praktyczna realizacja idei głębokiej termomodernizacji,” *Materiały Budowlane*, 2016.
- [64] M. Wesołowska i P. Szczepaniak, „Projektowanie budynku mieszkalnego wielorodzinnego z wymaganą charakterystyką energetyczną,” *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, pp. 205-212, 2010.
- [65] P. Simona i P. Spiru, „Ion IV. Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation,” *Energy Procedia*, 2017.
- [66] R. Rupp, J. Kim, E. Ghisi i R. de Dear, „Thermal sensitivity of occupants in different building typologies: The Griffiths Constant is a Variable,” *Energy and Buildings*, p. 11-20, 2019.
- [67] V. Harish i A. Kumar, „A review on modeling and simulation of building energy systems,” *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016.
- [68] R. Wang, S. Lu i W. Feng, „A three-stage optimization methodology for envelope design of passive house considering energy demand,” *thermal comfort and cost. Energy.*, 2020.
- [69] W. Feist, *Passive House Planning Package PHPP: Energy Balance and Passive House Design Tool for Quality Approved Passive Houses and EnerPHit Retrofits*, Passive House Institute, 2015.
- [70] F. Han, B. Liu, Y. Wang, G. Dermentzis, X. Cao, L. Zhao, R. Pfluger i W. Feist, „Verifying of the feasibility and energy efficiency of the largest certified passive house office building in China: A three-year performance monitoring study,” *Journal of Building Engineering*, 2022.
- [71] M. Gustafsson, G. Dermentzis, J. Myhren, C. Bales, F. Ochs, S. Holmberg i W. Feist, „Energy performance comparison of three innovative HVAC systems for renovation through dynamic simulation,” *Energy and Buildings*, pp. 512-519, 1 10 2014.
- [72] S. Firąg, A. Miszczuk i B. Witkowski, „Analysis of climate change and its potential influence on Energy performance of building and indoor temperatures, part 1: Climate change scenarios,” *Archives of Civil Engineering*, pp. 29-42, 2021.
- [73] P. Gilewski, P. Krysik i A. Węglarz, „Wpływ pakietu „Fit for 55” na budownictwo,” *Materiały Budowlane*, 1 2024.
- [74] S. J. S. J. Runkiewicz L, „Ewolucja budownictwa prefabrykowanego w Polsce,” *Przegląd budowlany*, 2020.

-
- [75] W. Feist, *Podstawy budownictwa pasywnego*, Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, 2006.
- [76] S. Marinelli, R. Gamberini, B. Rimini, F. Nesi, Implementing the nearly zero-energy buildings notion in industrial facilities. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2021.
- [77] W. Derkowski, „Prefabrykacja betonowa - zrównoważone rozwiązanie dla budownictwa.,” *Materiały budowlane*, 2021.
- [78] L. Runkiewicz, J. Szulc i J. Sieczkowski, „Ewolucja budownictwa prefabrykowanego w Polsce,” *Przegląd budowlany*, 10 2020.
- [79] M. Kaśkosz, Ł. Majchrzak, M. Putowski, J. Szulc i E. Więcek, „Nowoczesna prefabrykacja w budownictwie mieszkaniowym - najczęstsze pytania,” *Inżynier budownictwa*, 3 2019.
- [80] P. Borek i J. Szulc, „Rola prefabrykacji betonowej w architekturze,” *Cement, Wapno, Beton*, 3 2022.
- [81] M. Szruba, „Nowoczesna prefabrykacja,” *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 4 2016.
- [82] A. Yee i D. PE Hon, „Social and environmental benefits of precast concrete technology,” *PCI Journal*, 2001.
- [83] V. Marinakis, „Big data for energy management and energy-efficient buildings,” *Energies*, 2020.
- [84] S. Yigit i B. Ozorhon, „A simulation-based optimization method for designing energy efficient buildings,” *Energy and Buildings*, 2018.
- [85] R. Mitchell i S. Natarajan, „Overheating risk in Passivhaus dwellings,” *Building Services Engineering Research and Technology*, 2019.
- [86] G. McGill, M. Qin i L. Oyedele, „A case study investigation of indoor air quality in UK Passivhaus dwellings,” *Energy Procedia*, 2014.
- [87] K. Firkowicz-Pogorzelska, „Metodyka określania wartościobliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła i dane tabelaryczne donormalizacji. Praca naukowo-badawcza ITB nr3391/NF-31/99 i nr3391/NF-31/00,maszyn.,” *biblioteka ITB*, 2021.
- [88] A. Ogando, N. Cid i M. Fernández, „Energy modelling and automated calibrations of ancient building simulations: A case study of a school in the northwest of Spain,” *Energies*, 6 2017.
- [89] S. Firląg, „Cost-optimal plus energy building in a cold climate,” *Energies*, 12 2019.
- [90] A. Atmaca i G. Gedik, „Determination of thermalcomfort of religious buildings by measurementand survey methods: Examples ofmosques in a temperate-humid climate,” *Journal of Building Engineering*, 2020.

- [91] R. Elghamry i H. Hassan, „Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment,” *International Journal of Ventilation*, p. 233–259, 4 2020.
- [92] T. Kuczyński i A. Staszczuk, „Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings,” *Energy*, 2020.
- [93] K. Kurowski, „The influence of building and installation conditions on shaping the optimal conditions of room microclimate,” *E3S Web of Conferences*, 2018.
- [94] M. Humphreys i J. Nicol, „Understanding the adaptive approach to thermal comfort,” *ASHRAE Transactions*, 1998.
- [95] M. Santamouris, „Cooling the buildings – past, present and future,” *Energy and Buildings*, p. 617–638, 10 2016.
- [96] T. Kisilewicz, M. Fedorczak-Cisak i T. Barkanyi, „Active thermal insulation as an element limiting heatloss through external walls,” *Energy and Buildings*, 2019.
- [97] S. Firlag i A. Miszczuk, „Szczelność powietrzna budynków energooszczędnych a instalacje,” *Rynek Instalacyjny*, p. 56–62, 4 2015.
- [98] A. Chan, „Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong,” *Energy and Buildings*, p. 2860–2868, 2011.
- [99] F. Ismaila, M. Shahrestani, M. Vahdati, P. Boyd i S. Donyavi, „Climate change and the Energy performance of buildings in the future – A case study for prefabricated buildings in the UK,” *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [100] M. Tootkaboni, I. Ballarini i V. Corrado, „Analysing the future energy performance of residential buildings in the most populated Italian climatic zone: A study of climate change impacts,” *Energy Reports*, 7 2021.
- [101] J. Szulc i J. Sieczkowski, „Przyszłość technologii modułowych w budownictwie,” *Inżynier budownictwa*, 5 2020.
- [102] M. Charciarek, „Dom jako prototyp – poszukiwanie wzorca racjonalnej architektury mieszkaniowej wykonanej w technologii prefabrykacji betonowych,” *Builder*, 2023.
- [103] J. Gołaszewski, „Technologia betonu za progiem XXI wieku,” *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 3 2020.
- [104] K. Elliott, „Precast concrete structures,” *Crc Press*, 2019.
- [105] R. O'Hegarty i K. Oliver, „Review of precast concrete sandwich panels and their innovations,” *Construction and building materials*, 2020.
- [106] R. O'Hegarty, O. Kinnane, M. Grimes, J. Newell, M. Clifford i R. West, „Development of thin precast concrete sandwich panels: Challenges and outcomes,” *Construction and Building Materials*, 2021.

-
- [107] I. Holly i A. Iyad, „Connections and joints in precast concrete structures,” *Slovak Journal of Civil Engineering*, pp. 49-56, 2020.
- [108] R. O’Hegarty, A. Reilly, R. West i O. Kinnane, „Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels,” *J. Build. Eng.*, 2019.
- [109] J. Keenehan, K. Concannon, D. Hajjalizadeh i C. McNally, Numerical Assessment of The Thermal Performance of Structural Precast Panels, University College of Dublin, 2012.
- [110] P. Szczepaniak i D. Liczkowski, „Wpływ nowoczesnych rozwiązań materiałowych na charakterystyki cieplne obudowy przestrzeni ogrzewanych,” *Izolacje*, 2024.
- [111] K. Schabowicz, B. Witkowski i M. Moczko, „Izolacje we współczesnej prefabrykacji betonowej,” *Izolacje*, 5 2021.
- [112] Z. Pásztor, „An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials,” *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [113] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, S. Setunge i L. Shi, „A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings,” *Energy and Buildings*, 2020.
- [114] S. Yang, M. Wan, W. Chen, B. Ng i S. Dubey, „Model predictive control with adaptive machine-learning-based model for building energy efficiency and comfort optimization,” *Applied Energy*, 2020.
- [115] G. Adamczewski i P. Woyciechowski, „Prefabrykaty w budownictwie część 2: współczesne zastosowania,” *Builder*, pp. 64-68, 7 2024.
- [116] P. Kosiński, R. Wójcik, M. Kostowicki i M. Rzepski, „Vapor Permeability of Natural Based Materials on the Example of Wood Wool,” w *AIP Conference Proceedings*, 2023.
- [117] A. Kaczmarek i M. Wesołowska, „Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building,” *Procedia Engineering*, pp. 205-210, 1 1 2017.
- [118] M. Wesołowska i P. Szczepaniak, „Nowe wymagania w ocenie wilgotnościowej przegród,” *Izolacje*, pp. 34-37, 3 2009.
- [119] T. Skoczkowski, S. Bielecki, A. Węglarz, M. Włodarczak i P. Gutowski, „Impact assessment of climate policy on Poland's power sector,” *Mitigation and adaptation strategies for global change*, pp. 1303-1349, 12 2018.
- [120] P. Król, S. Firląg i A. Węglarz, „Zintegrowana ocena wpływu budynku jednorodzinnego na środowisko,” *Rynek Instalacyjny*, 2013.
- [121] A. Węglarz i R. Stępień, „Dom pasywny,” *Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju*, 2011.
- [122] A. Węglarz i J. Żurawski, „Budownictwo energooszczędne-aspekty prawne i technologie,” *Czysta Energia*, 2015.

- [123] S. Firląg, A. Kaliszuk-Wietecha i A. Węglarz, „Głęboka termomodernizacja budynków,” *Izolacje*, 11 2020.
- [124] T. Skoczkowski i A. Węglarz, „Efektywność energetyczna w Polsce,” *Nowa Energia*, pp. 66-69, 2018.
- [125] J. Schnieders, W. Feist i L. Rongen, „Passive Houses for different climate zones,” *Energy and Buildings*, pp. 71-87, 10 2015.
- [126] P. Woyciechowski i G. Adamczewski, „Aspekty materiałowo-technologiczne w strategii realizacji budownictwa prefabrykowanego XXI wieku,” *Materiały Budowlane*, 11 2021.
- [127] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. na podstawie art. 7 ust. 2 pkt 1 2 ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane (Dz. U. 2021 r. poz. 2351 oraz z 2022 poz.88)
- [128] Dz. U., Poz. 264, Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r.
- [129] Biuletyn cen SEKOCENBUD – katalog ZWW I kw. 2017 r. – II kw. 2024 r.
- [130] Katalog Betard „Budownictwo mieszkaniowe 2022”
- [131] PN-EN 12667:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych - Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego - Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym
- [132] Dane Głównego Urzędu Statystycznego
- [133] PN-EN ISO 6946:2017-10: Komponenty budowlane i element budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczeniowe
- [134] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii 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
- [135] PN-EN 15251:2012 Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę.
- [136] Raport World Meteorological Organization „State of Climate”, 2022
- [137] Załącznik do Uchwały nr 23/2022 Rady Ministrów z dnia 9 lutego 2022 r., „Długoterminowa strategia renowacji budynków. Wspieranie renowacji krajowego zasobu budowlanego”. 2022
- [138] PN-ISO 10456:2009, Materiały i wyroby budowlane - Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Tabełaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.

-
- [139] PN-EN ISO 10211:2017, Mostki cieplne w konstrukcji budowlanej - Przepływy ciepła i temperatury powierzchni - Obliczenia szczegółowe.
- [140] PN-EN ISO 13788:2013-05, Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku - Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej - Metody obliczania
- [141] Dz. U., Poz. 264, Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r.
- [142] informacje ze strony internetowej www.bankier.pl – notowania surowców energetycznych
Data dostępu: 20.12.2022 r.
- [143] Dane Towarowej Giełdy Energii – strona internetowa www.tge.pl
Data dostępu: 20.12.2022 r.
- [144] strona internetowa www.passiv.de
Data dostępu: 05.03.2023 r.
- [145] strona internetowa www.rynekelektryczny.pl/produkcja-energii-elektrycznej-w-polsce/
Data dostępu: 17.07.2024 r.
- [146] informacje ze strony internetowej <https://www.betard.pl/>
Data dostępu: 03.06.2024 r.
- [147] informacje ze strony internetowej www.tilsonhomes.com/blog/what-is-a-blower-door-test/
Data dostępu: 21.05.2024 r.
- [148] informacje ze strony internetowej <https://inzynierbudownictwa.pl/bloki-z-wielkiej-płyty-technologie-i-elementy-konstrukcyjne/>
Data dostępu: 21.05.2024 r.
- [149] informacje ze strony internetowej <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/ocieplenie-o-1-5-stopnia-specjalny-raport-ipcc-308>
Data dostępu: 28.07.2024 r.
- [150] strona internetowa www.passipedia.org
Data dostępu: 04.02.2024 r.
- [151] strona internetowa informacje ze strony internetowej <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/>
Data dostępu: 16.07.2024 r.
- [152] strona internetowa <https://www.grida.no/resources/15562>
Data dostępu: 16.07.2024 r.

- [153] strona internetowa www.doba.pl
Data dostępu: 29.06.2024 r.
- [154] strona internetowa <https://knsokna.pl/news/szyby-eclaz>
Data dostępu: 14.05.2024 r.
- [155] strona internetowa <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/climate-change/paris-agreement>
Data dostępu: 12.04.2024 r.
- [156] strona internetowa <https://energiasloneczna.com/poradnik-inwestora-warunki-techniczne-i-usytuowanie-budynku/>
Data dostępu: 06.07.2024 r.
- [157] strona internetowa <https://poradnikinzyniera.pl/strefy-przemarzania-gruntu/>
Data dostępu: 18.06.2024 r.
- [158] strona internetowa <https://www.rynekinstalacyjny.pl/artypk/centrale-wentylacyjno-klimatyzacyjne/152513,wilgotnosc-powietrza-wewnetrznego>
Data dostępu: 10.06.2024 r.
- [159] Strona internetowa
https://vistula.pk.edu.pl/~sciezor/pliki/MS/wartosci_krytyczne_SW.pdf
Data dostępu: 25.06.2024 r.

Łącznie 159 pozycji bibliograficznych

9. Spis tabel

Tabela 1.1 - Wartość współczynników przenikania ciepła określonych przez obowiązujące Warunki Techniczne	22
Tabela 3.1 - Opory przejmowania ciepła dla różnych rodzajów przegród [133]	36
Tabela 3.2 - Wartości współczynnik przenikania ciepła w podziale na przegrody zewnętrzne dla budynku pasywnego i nowych Warunków Technicznych 2021[134] [44]	45
Tabela 3.3 - Reguły godne zastosowania w celu ograniczenia mostków termicznych [44]...	48
Tabela 4.1 - Minimalne wartości współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych w budynku pasywnym.....	68
Tabela 5.1 - Wyniki odczytanych pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła λ	72
Tabela 5.2 - Kalkulacja wartości średniego odchylenia w próbie.....	74
Tabela 5.3 - kalkulacja oporu cieplnego warstw ściany trójwarstwowej.....	76
Tabela 5.4 - Kalkulacja liniowego współczynnika przenikania ciepła podłoga - ściana	79
Tabela 5.5 - Kalkulacja liniowego współczynnika przenikania ciepła - naroże ściany	81
Tabela 5.6 - Minimalny współczynnik temperaturowy	84
Tabela 5.7 - Wartości strumienia kondensacji i akumulacji	84
Tabela 5.8 - Założenia przyjęte w kalkulatorze PHPP w zakresie lokalizacji i klimatu.....	90
Tabela 5.9 - Określone parametry klimatyczne ze stacji Poznań/Piła	91
Tabela 5.10 - Wartości określające liczbę dni grzewczych oraz średnie roczne wartości promieniowania słonecznego.....	92
Tabela 5.11 - Powierzchnie przegród zewnętrznych budynku	95
Tabela 5.12 - Zestawienie z danymi dotyczącymi przeszkleń w budynku	97
Tabela 5.13 - Podsumowanie strat i zysków ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone w kWh/rok	98
Tabela 5.14 - Kalkulacja współczynnika przepuszczalności powietrza q_{50}	99
Tabela 5.15 - Wyliczenie krotności wymiany powietrza i średniego natężenia przepływu powietrza	101
Tabela 5.16 - Średnie miesięczne wartości wilgotności względnej	103
Tabela 5.17 - Podstawowe parametry do kalkulacji obciążenia cieplnego budynku.....	104
Tabela 5.18 - Parametry budynku w podziale miesięcznym potrzebne do wyliczenia zapotrzebowania budynku na ogrzewanie	113
Tabela 5.19 - Podsumowanie pokazujące czy spełnione zostały kryteria budownictwa pasywnego.....	120
Tabela 5.20 - Podsumowanie pokazujące czy spełnione zostały kryteria budownictwa pasywnego.....	121
Tabela 5.21 - Zestawienie z danymi dotyczącymi przeszkleń w budynku z ulepszonymi oknami i ramą okienną	130
Tabela 5.22 - Parametry budynku w podziale miesięcznym potrzebne do wyliczenia zapotrzebowania budynku na ogrzewanie	140
Tabela 5.23 - Aktualne dane klimatyczne dla stacji Wrocław - Strachowice	156
Tabela 6.1 - Wycena pierwotnej inwestycji budynku w Bielawie.....	178

Tabela 6.2 - Wycena inwestycji doprowadzonej do standardu pasywnego	180
Tabela 6.3 - Kalkulacja różnicy wartości za m ²	182
Tabela 6.4 - Kalkulacja kosztu za energię ciepłą.....	182
Tabela 6.5 - Kalkulacja kosztu za energię elektryczną.....	183
Tabela 6.6 - Kalkulacja zwrotu poniesionych nakładów w proponowany budynek pasywny	184

Łącznie 34 tabele

10. Spis rysunków

Rys. 1.1 - Schemat przedstawiający pięć zasad budownictwa pasywnego [6]	11
Rys. 1.2 - Wykres zmian poziomu stawki Robocizny kosztorysowej dla robót ogólnobudowlanych - brutto według danych Sekocenbud [129]	14
Rys. 1.3 - Wykres zmian poziomu cen materiałów budowlanych według danych Sekocenbud [129]	14
Rys. 1.4 - Wykres zmian poziomu cen najmu sprzętu budowlanego według danych Sekocenbud [129]	15
Rys. 1.5 - Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych według kierunków użytkowania (wyrażona w procentach) [132]	16
Rys. 1.6 - Notowania gazu ziemnego (USD / mln Btu) [142]	17
Rys. 1.7 - Notowania ropy naftowej (USD / baryłka) [142]	17
Rys. 1.8 - Notowania węgla kamiennego (USD / tona) [142]	18
Rys. 1.9 - Wykres miesięcznej ceny energii elektrycznej (BASE) [PLN/MWh] [142]	18
Rys. 1.10 - Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce, dane na maj 2024 r. [145]	19
Rys. 1.11 - Zapotrzebowanie na Energię pierwotną budynku w zależności od panujących Warunków Technicznych [156]	22
Rys. 1.12 - Zdjęcie uformowanej ściany prefabrykowanej w zakładzie Betard [130]	25
Rys. 1.13 - Zdjęcie ściany trójwarstwowej z widoczną izolacją	26
Rys. 1.14 - Zamontowane ściany zespolone zabezpieczone podporami ukośnymi [23]	27
Rys. 3.1 - Przykład zdjęcia termowizyjnego pokazującego budynek mieszkalny przed i po renowacji przy Tevesstrasse w Frankfurtzie [6]	38
Rys. 3.2 - Rozkład izoterm w narożu ściany [6]	39
Rys. 3.3 - Reguła ołówka lub flamastra [1]	42
Rys. 3.4 - Skutki kondensacji wilgoci w miejscach konstrukcyjnych [31]	43
Rys. 3.5 - Wykres zależności kosztów względem grubości ocieplenia [46]	46
Rys. 3.6 - Blower Door Test [6]	47
Rys. 3.7 - Wykres udziału powierzchni danej przegrody wraz z udziałem straty przez przenikanie [1]	48
Rys. 3.8 - Schemat pracy wentylacji nawiewno - wywiewnej z rekuperacją [41]	50
Rys. 3.9 - Wentylacja wywiewna bez pasywnego odzysku ciepła [6]	55
Rys. 3.10 - Zjawisko Coandy wykorzystane przez powietrze nawiewane z anemostatu [44]	56
Rys. 3.11 - Średnie zmiany temperatury powierzchni Ziemi od 1850 roku [136]	58
Rys. 3.12 - Rozkład budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej według przedziałów efektywności energetycznej budynków [137]	59
Rys. 3.13 - Rozkład budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej w poszczególnych okresach według wskaźnika Energii Pierwotnej wyrażonego w kWh/(m ² rok) [137]	61
Rys. 3.14 - Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce [145]	62
Rys. 3.15 - Wykresy przedstawiające scenariusze zmian koncentracji węgla RCP [152]	63
Rys. 4.1 - Graf przedstawiający zakres badań własnych	64

Rys. 4.2 – Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną	65
Rys. 4.3 – 3 z 12 płyt betonowych o wymiarach 300mm x 300 mm x 3 mm, przeznaczonych do badania	66
Rys. 4.4 - 9 z 12 płyt betonowych o wymiarach 300mm x 300 mm x 3 mm, przeznaczonych do badania	66
Rys. 4.5 - Grafika reklamująca wtyczkę DesignPH [144]	67
Rys. 5.1 - Wycinek przekroju pokazujący łączenie ściany i podłogi	78
Rys. 5.2 - Rozkład izoterm wewnątrz przegród wraz z wycinkiem gruntu	79
Rys. 5.3 - przekrój naroża ściany	80
Rys. 5.4 - Rozkład izoterm w narożu ściany	81
Rys. 5.5 – Kotwy Schöck Isolink [24]	82
Rys. 5.6 - Widok z lotu ptaka na teren inwestycji „Muflon”	86
Rys. 5.7 - Wizualizacja jednego z budynków w Bielawie [57]	86
Rys. 5.8 – Elewacja północna modelu budynku	87
Rys. 5.9 – Elewacja południowa modelu budynku	87
Rys. 5.10 – Elewacja północna z widoczną elewacją zachodnią	88
Rys. 5.11 - Elewacja południowa z widoczną elewacją wschodnią	88
Rys. 5.12 - Zwymiarowany budynek w Bielawie	89
Rys. 5.13 - Strefy przemarzania na terenie Polski [157]	89
Rys. 5.14 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej	92
Rys. 5.15 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła podłogi na gruncie	93
Rys. 5.16 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła dachu	94
Rys. 5.17 - Grafika przedstawiająca przekrój wybranego oszklenia [154]	96
Rys. 5.18 - Wykres słupkowy pokazujący podsumowanie zysków i strat ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone z podziałem na kierunki świata	98
Rys. 5.19 - Diagram Scofielda–Sterlinga obrazujący wpływ wilgotności względnej na czynniki biologiczne i chemiczne w otoczeniu człowieka [158]	103
Rys. 5.20 – Wycinek z PHPP z kalkulacją P_T , P_V , P_L	105
Rys. 5.21 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_S , P_I , P_G	106
Rys. 5.22 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_H i P_H/A_{TFA}	107
Rys. 5.23 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T	108
Rys. 5.24 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V	109
Rys. 5.25 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L	109
Rys. 5.26 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S	110
Rys. 5.27 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I	110
Rys. 5.28 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G	111
Rys. 5.29 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H	112
Rys. 5.30 - Wykres słupkowy pokazujący zapotrzebowanie na ciepło wraz z zyskami i stratami ciepła	114
Rys. 5.31 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T	115
Rys. 5.32 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V i Q_L	116
Rys. 5.33 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S	117

Rys. 5.34 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I	117
Rys. 5.35 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G	118
Rys. 5.36 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H	118
Rys. 5.37 - Bilans energetyczny przedmiotowego budynku	119
Rys. 5.38 - Wycinek rzutu ściany zewnętrznej	123
Rys. 5.39 - Zdjęcia ściany trójwarstwowej z powiększoną warstwą izolacyjną	124
Rys. 5.40 - Widok ściany z otworami okiennymi z widocznymi trzema warstwami	124
Rys. 5.41 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej	125
Rys. 5.42 - Kalkulacja strat ciepła przez ścianę zewnętrzną	126
Rys. 5.43 - Wycinek tabeli z arkusza PHPP wraz z wyliczonym współczynnikiem przenikania ciepła ściany zewnętrznej	126
Rys. 5.44 - Kalkulacja strat ciepła przez ścianę zewnętrzną	127
Rys. 5.45 - Wykres strat i zysków ciepła w [kWh/m ² rok] przez powierzchnie szklone	128
Rys. 5.46 - Przekrój przez oszklenie okna SGG CLIMATOP LUX	128
Rys. 5.47 - Wycinek certyfikatu okna SGG CLIMATOP LUX	129
Rys. 5.48 - Wycinek z certyfikatu szyby z wartościami U_g i g	129
Rys. 5.49 - Wycinek certyfikatu ramy okiennej	129
Rys. 5.50 - Wycinek certyfikatu komponentu wraz ze współczynnikiem przenikania ciepła	130
Rys. 5.51 - Podsumowanie strat i zysków ciepła w wyniku przenikania ciepła przez powierzchnie szklone w kWh/rok	130
Rys. 5.52 - Kalkulacja strat ciepła przez okna	131
Rys. 5.53 - Wykresy słupkowe zysków i strat ciepła przez okna w proponowanym budynku [kWh/m ² rok]	131
Rys. 5.54 - Wycinek certyfikatu komponentu	132
Rys. 5.55 - Wycinek z kalkulacją strat ciepła przez wentylację w proponowanym budynku	132
Rys. 5.56 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_T , P_V , P_L	133
Rys. 5.57 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_S , P_I , P_G	134
Rys. 5.58 - Wycinek z PHPP z kalkulacją P_H i $P_{H/A_{TFA}}$	135
Rys. 5.59 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T	136
Rys. 5.60 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V	137
Rys. 5.61 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L	137
Rys. 5.62 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S	138
Rys. 5.63 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I	138
Rys. 5.64 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G	139
Rys. 5.65 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H	140
Rys. 5.66 - Wykres słupkowy pokazujący zapotrzebowanie na ciepło wraz z zyskami i stratami ciepła	141
Rys. 5.67 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T	142
Rys. 5.68 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V i Q_L	143
Rys. 5.69 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S	144
Rys. 5.70 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_I	144
Rys. 5.71 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_G	145

Rys. 5.72 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_H	145
Rys. 5.73 - Wykres bilansu energetycznego	146
Rys. 5.74 – Wycinek z PHPP z wyliczonym obciążeniem chłodem	147
Rys. 5.75 - Wykres słupkowy dotyczący energią zwiększającą wilgotność a energią osuszającą	147
Rys. 5.76 – Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_T	148
Rys. 5.77 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_V	148
Rys. 5.78 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_L	149
Rys. 5.79 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_S	149
Rys. 5.80 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_i i Q_f	149
Rys. 5.81 - Wycinek z PHPP z kalkulacją Q_K	150
Rys. 5.82 - Wykres zapotrzebowania na chłód w ciągu roku	150
Rys. 5.83 – Wycinek z PHPP z przyjętym systemem instalacji fotowoltaicznej	151
Rys. 5.84 – Wycinek z PHPP z informacjami z karty katalogowej modułów paneli PV	151
Rys. 5.85 – Wycinek z PHPP z dalszą specyfikacją dotyczącą paneli PV	152
Rys. 5.86 – Wycinek z PHPP z informacją dotyczącą powierzchni modułów i zajmowanej powierzchni dachu	152
Rys. 5.87 – Wycinek z PHPP z wynikiem pokazującym roczny uzysk energii elektrycznej dla każdej instalacji	152
Rys. 5.88 - Wykres produkcji energii elektrycznej przez panele PV	153
Rys. 5.89 - Klasyfikacja budynku po zmianach względem standardu certyfikacji	154
Rys. 5.90 – Wycinek podsumowania sprawdzenia kryterium ($\lambda = 0,59 \text{ W/(mK)}$)	155
Rys. 5.91 – Wycinek podsumowania sprawdzenia kryterium ($\lambda = 1,7 \text{ W/(mK)}$)	155
Rys. 5.92 – Wykres średniej miesięcznej temperatury w czterech miastach	157
Rys. 5.93 – Wykres średniego miesięcznego promieniowania rozproszonego w czterech miastach	158
Rys. 5.94 – Wykres średniej prędkości wiatru w czterech miastach	158
Rys. 5.95 – Wykres zmiany średniej miesięcznej temperatury otoczenia dla wskazanych scenariuszy zmian klimatu	159
Rys. 5.96 – Wykres radarowy pokazujący odchylenia temperatury otoczenia w zależności od przyjętego scenariusza koncentracji węgla	160
Rys. 5.97 – Aktualne i prognozowane temperatury punktu rosy w zależności od scenariusza RCP w podziale na miesiące	162
Rys. 5.98 - Wykres średnich miesięcznych wartości promieniowania całkowitego	163
Rys. 5.99 - Wykres prognozowanych wartości całkowitego promieniowania słonecznego	163
Rys. 5.100 – Zapotrzebowanie do ogrzewania budynku dla różnych lokalizacji	164
Rys. 5.101 – Zapotrzebowanie budynku na nieodnawialną energię pierwotną	165
Rys. 5.102 – Częstotliwość przegrzewania się budynku	166
Rys. 5.103 – Wykres zysków i strat ciepła	167
Rys. 5.104 – Wykres pokazujący wewnętrzne zyski ciepła i zyski ciepła z promieniowania słonecznego	168
Rys. 5.105 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez wentylację	168
Rys. 5.106 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez mostki termiczne	169
Rys. 5.107 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez drzwi zewnętrzne	169
Rys. 5.108 – Wykres przedstawiający straty ciepła przez okna	170

Rys. 5.109 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez podłogę na gruncie	170
Rys. 5.110 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez dach	171
Rys. 5.111 - Wykres przedstawiający straty ciepła przez ściany zewnętrzne	171
Rys. 5.112 - Wykres przedstawiający zapotrzebowanie na ciepło proponowanego budynku w aktualnym i prognozowanym klimacie	172
Rys. 5.113 - Zmiana pojemności cieplnej budynku dla czterech scenariuszy zmian klimatu w odniesieniu do aktualnej pojemności cieplnej	173
Rys. 5.114 - Zapotrzebowanie na energię pierwotną w odniesieniu do wartości wymaganej przez WT - 70 kWh/m²rok	174
Rys. 5.115 - Częstotliwość przegrzewania się budynku	174
Rys. 6.1 - Wycinek z biuletynu cen Sekocenbud	177

Łącznie 150 rysunków

Streszczenie rozszerzone

Tytuł:

MODUŁOWY BUDYNEK PASYWNY Z PREFABRYKATÓW FIRMY BETARD W ZASTOSOWANIU W BUDOWNICTWIE MIESZKANIOWYM I UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

Streszczenie:

Coraz większym zainteresowaniem inwestorów zarówno w zakresie budownictwa mieszkaniowego, jak i użyteczności publicznej stają się budynki efektywne energetycznie. W szczególności cechuje je niskie zapotrzebowanie na energię do ogrzewania oraz wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, co jest w pełni uzasadnione biorąc pod uwagę sytuację geopolityczną w naszym regionie i uzależnienie od niej cen surowców energii.

Dotychczas większość tego typów budynków powstawała jako konstrukcja wykonywana w technologii tradycyjnej lub współczesna konstrukcja szkieletowa. Firma Betard, jako jeden z liderów na rynku w produkcji prefabrykatów betonowych, rozumiejąca ideę budownictwa zrównoważonego, opracowała i wdrożyła na rynek ścianę trójwarstwową z wysokiej jakości izolacją termiczną w postaci płyty PIR i współczynnikiem przenikania ciepła przegrody spełniającym nie tylko Warunki Techniczne, ale też wymogi budownictwa pasywnego.

Problemem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej była odpowiedź na pytanie czy przy wykorzystaniu produktu firmy Betard w postaci ścian trójwarstwowych przedmiotowy budynek może osiągnąć wymogi budownictwa pasywnego oraz aktualnych Warunków Technicznych. Kolejnym problemem naukowym było zdefiniowanie wpływu zmian klimatycznych na spełnienie tych wymogów oraz określenie czasu zwrotu poniesionych dodatkowych nakładów inwestycyjnych.

W rozprawie doktorskiej dokonano wprowadzenia w problematykę pracy wraz z krytyczną analizą literatury przedmiotu, przedstawiono historię prefabrykacji, jej ewolucji i rozwoju w związku z niestabilną sytuacją gospodarczą, przedstawiono wymagania legislacyjne w Polsce i w Unii Europejskiej w zakresie nowych budynków i polityki klimatyczno – energetycznej, podstawowych parametrów fizyki budowli, określonych przez obowiązujące normy, stanu wiedzy o budownictwie pasywnym i wymaganiach wynikających z tego standardu, a także wpływie zmian klimatu na charakterystykę energetyczną budynku oraz podjętych działaniach ograniczających postępujące ocieplenie klimatu.

Do określenia współczynnika przewodzenia ciepła warstw betonowych ściany trójwarstwowej firmy Betard wykonano badania w aparacie płytowym z osłoniętą płytą grzejną. Do badania wykorzystano 12 próbek w postaci płyt betonowych o wymiarach 300x300x30mm, z których uzyskano 17 miarodajnych wyników współczynnika przewodzenia ciepła λ . Na podstawie otrzymanych wyników, zgodnie z obowiązującą normą wyznaczono wartość deklarowaną współczynnika przewodzenia ciepła warstw betonowych ściany trójwarstwowej, która wyniosła 0,59 W/(mK).

Następnie wyznaczono współczynniki przenikania ciepła wszystkich przegród zewnętrznych budynku oraz sprawdzono budynek pod kątem możliwości występowania mostków termicznych. Do sprawdzenia liniowych mostków termicznych posłużono się oprogramowaniem Therm. Wykonano także badania cieplno – wilgotnościowe ściany zewnętrznej, do których użyto oprogramowania Termo URSA. Dzięki temu narzędziu sprawdzono, że na powierzchni wewnętrznej przegrody nie dojdzie do rozwoju pleśni, natomiast występująca kondensacja pary wodnej wewnątrz przegrody w okresie zimowym nie stanowi zagrożenia dla konstrukcji.

Opracowano model budynku w oprogramowaniu do projektowania i modelowania budynków - SketchUp oraz określono parametry dla tego modelu poprzez zdefiniowanie przegród zewnętrznych, danych klimatycznych i orientacji budynku. Przy użyciu wtyczki do symulacji energetycznej - DesignPH, wykonano symulację energetyczną budynku i otrzymane wyniki zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego PHPP. Pierwotny budynek nie spełniał wymagań budynku pasywnego, dlatego też określono drogę do ich spełnienia poprzez zastosowanie rozwiązań w postaci zwiększenia izolacji w ścianie zewnętrznej z 12 do 18 cm, zmianie okien na okna lepszym współczynnikiem przenikania ciepła U_g i U_f , a także korzystniejszych współczynnikiem g , zastosowania wentylacji z odzyskiem ciepła o sprawności 89% oraz zamontowania paneli fotowoltaicznych w celu obniżenia zapotrzebowania na energię pierwotną. Dzięki wykonaniu ponownej symulacji energetycznej wraz ze zdefiniowanymi modyfikacjami, otrzymano wyniki, które wskazały na spełnienie wszystkich wymaganych parametrów budownictwa pasywnego oraz Warunków Technicznych.

W kolejnym etapie badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, przeanalizowano aktualnie panujący klimat w Polsce na próbie czterech lokalizacji oraz w oparciu o opisane ścieżki koncentracji węgla (RCP) wyznaczone przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC), przygotowano prognozowane parametry klimatyczne dla czterech scenariuszy zmian klimatu – dwa dla roku

2030 i dwa dla roku 2050. Dzięki temu zabiegowi możliwym było porównaniu jak zmieniają się czynniki klimatotwórcze w następnych latach dla prognozowanych ścieżek koncentracji węgla. Po analizie prognozowanych zmian klimatycznych, wykonano symulację energetyczną dla badanego budynku w dwóch wariantach - dla obecnego klimatu, ale różnych lokalizacjach w Polsce oraz dla jednej lokalizacji - Wrocławia, ale dla różnych scenariuszy zmiany klimatu. W wyniku badań odnotowano, że jest jeden parametr, który z dużym prawdopodobieństwem przekroczy minimalną dopuszczalną wartość dla budynków pasywnych - częstotliwość przegrzewania się budynku, co może skutkować w kolejnych latach o konieczność zastosowania dodatkowej instalacji chłodzącej.

W ostatnim etapie rozprawy doktorskiej dokonano sprawdzenia okresu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów na dostosowanie przedmiotowego budynku do standardu pasywnego w wyniku możliwych oszczędności na zużyciu energii grzewczej i elektrycznej. Biorąc pod uwagę różnicę w zapotrzebowaniu na energię ciepłą i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w budynku pasywnym, oszacowano, że najbliższy możliwy zwrot poniesionych nakładów nastąpi po 14 latach.

Przedstawiono wnioski z badań w zakresie: podstawowych parametrów fizyki budowli, charakterystyki energetycznej istniejącego budynku, opracowania ścieżek rozwiązań doprowadzających przedmiotowy budynek do spełnienia standardu budynku pasywnego, porównania wyników najważniejszych parametrów budownictwa pasywnego dla budynku znajdującego się w obecnym i prognozowanym klimacie, oszacowania czasu zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów finansowych na dostosowanie budynku do standardu budownictwa pasywnego w wyniku oszczędności na zapotrzebowaniu na energię grzewczą i wykorzystaniu energii elektrycznej z OZE. Następnie opisano proponowane kierunki badań oraz praktyczne zastosowanie wyników uzyskanych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Streszczenie

Tytuł:

MODUŁOWY BUDYNEK PASYWNY Z PREFABRYKATÓW FIRMY BETARD W ZASTOSOWANIU W BUDOWNICTWIE MIESZKANIOWYM I UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

Streszczenie:

Coraz większym zainteresowaniem inwestorów zarówno w zakresie budownictwa mieszkaniowego, jak i użyteczności publicznej stają się budynki efektywne energetycznie, które cechuje je niskie zapotrzebowanie na energię do ogrzewania oraz wykorzystanie odnawialnych źródeł energii.

Firma Betard, jako jeden z liderów na rynku w produkcji prefabrykatów betonowych, rozumiejąca ideę budownictwa zrównoważonego, opracowała i wdrożyła na rynek ścianę trójwarstwową z wysokiej jakości izolacją termiczną w postaci płyty PIR i współczynnikiem przenikania ciepła przegrody spełniającym nie tylko Warunki Techniczne, ale też wymogi budownictwa pasywnego.

Problemem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej była odpowiedź na pytanie czy przy wykorzystaniu produktu firmy Betard w postaci ścian trójwarstwowych przedmiotowy budynek może osiągnąć wymogi budownictwa pasywnego oraz aktualnych Warunków Technicznych. Kolejnym problemem naukowym było zdefiniowanie wpływu zmian klimatycznych na spełnienie tych wymogów oraz określenie czasu zwrotu poniesionych dodatkowych nakładów inwestycyjnych.

W rozprawie doktorskiej dokonano wprowadzenia w problematykę pracy wraz z krytyczną analizą literatury przedmiotu. Do określenia współczynnika przewodzenia ciepła warstw betonowych ściany trójwarstwowej firmy Betard wykonano badania w aparacie płytowym z osłoniętą płytą grzejną. Do badania wykorzystano 12 próbek w postaci płyt betonowych, a z uzyskanych wyników badania wyznaczono wartość deklarowaną współczynnika przewodzenia ciepła warstw betonowych ściany trójwarstwowej, która wyniosła 0,59 W/(mK).

Następnie wyznaczono współczynniki przenikania ciepła wszystkich przegród zewnętrznych budynku, sprawdzono budynek pod kątem możliwości występowania mostków termicznych oraz wykonano badania ciepło - wilgotnościowe ściany zewnętrznej, dzięki którym sprawdzono, że na powierzchni wewnętrznej przegrody nie dojdzie do rozwoju pleśni, natomiast występująca

kondensacja pary wodnej wewnątrz przegrody w okresie zimowym nie stanowi zagrożenia dla konstrukcji.

Opracowano model budynku w oprogramowaniu do projektowania i modelowania budynków - SketchUp oraz określono parametry dla tego modelu poprzez zdefiniowanie przegród zewnętrznych, danych klimatycznych i orientacji budynku. Przy użyciu wtyczki do symulacji energetycznej - DesignPH, wykonano symulację energetyczną budynku i otrzymane wyniki zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego PHPP. Pierwotny budynek nie spełniał wymagań budynku pasywnego, dlatego też określono drogę do ich spełnienia poprzez zastosowanie rozwiązań w postaci zwiększenia izolacji w ścianie zewnętrznej z 12 do 18 cm, zmianie okien na okna lepszym współczynnikiem przenikania ciepła U_g i U_f , a także korzystniejszym współczynnikiem g , zastosowania wentylacji z odzyskiem ciepła o sprawności 89% oraz zamontowania paneli fotowoltaicznych w celu obniżenia zapotrzebowania na energię pierwotną. Dzięki wykonaniu ponownej symulacji energetycznej wraz ze zdefiniowanymi modyfikacjami, otrzymano wyniki, które wskazały na spełnienie wszystkich wymaganych parametrów budownictwa pasywnego oraz Warunków Technicznych.

W kolejnym etapie badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, przeanalizowano aktualnie panujący klimat w Polsce na próbie czterech lokalizacji oraz w oparciu o opisane ścieżki koncentracji węgla (RCP) wyznaczone przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC), przygotowano prognozowane parametry klimatyczne dla czterech scenariuszy zmian klimatu – dwa dla roku 2030 i dwa dla roku 2050. W wyniku badań odnotowano, że jest jeden parametr, który z dużym prawdopodobieństwem przekroczy minimalną dopuszczalną wartość dla budynków pasywnych – częstotliwość przegrzewania się budynku, co może skutkować w kolejnych latach o konieczność zastosowania dodatkowej instalacji chłodzącej.

W ostatnim etapie rozprawy doktorskiej oszacowano okres zwrotu dodatkowo poniesionych nakładów na dostosowanie przedmiotowego budynku do standardu pasywnego w wyniku możliwych oszczędności na zużyciu energii grzewczej i elektrycznej. Biorąc pod uwagę różnicę w zapotrzebowaniu na energię cieplną i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w budynku pasywnym, oszacowano, że najbliższy możliwy zwrot poniesionych nakładów nastąpi po 14 latach.

Przedstawiono wnioski z badań, a następnie opisano proponowane kierunki badań oraz praktyczne zastosowanie wyników uzyskanych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Summary

Title:

MODULAR PASSIVE HOUSE FROM PRECAST CONCRETE ELEMENTS PRODUCED BY BETARD FOR APPLICATION IN RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS

Summary:

Energy-efficient buildings are becoming increasingly popular among investors in both residential and public construction. In particular, they are characterized by low demand for energy for heating and the use of renewable energy sources.

Betard company, as one of the market leaders in the production of precast concrete elements, understanding the idea of sustainable building, has developed and introduced a three-layer wall with high-quality thermal insulation to the market in the form of a PIR board and the heat transfer coefficient of the partition meeting not only the Technical Conditions, but also the requirements of passive houses.

The scientific problem of this doctoral dissertation was to answer the question whether using the Betard product in the form of three-layer walls, the analysed building can meet the requirements of passive houses and current Technical Conditions. Another scientific problem was to define the impact of climate change on meeting these requirements and determining the payback period for additional investment outlays.

The doctoral dissertation introduces a critical analysis of the literature on the subject. To determine the thermal conductivity coefficient of the concrete layers of Betard's three-layer wall, tests were carried out in a plate apparatus with covered heating plate. 12 samples in the form of concrete slabs with dimensions of 300x300x30mm were used for the test. Based on the results, in accordance with the applicable standard, the declared value of the thermal conductivity coefficient of the concrete layers of the three-layer wall was determined as 0.59 W/(mK).

Then, the heat transfer coefficients of all building envelopes were determined and the building was also checked for the possibility of thermal bridges. Thermal and humidity tests of the external wall were also performed. Based on them, it was verified that no mold would develop on the internal surface of the partition, and condensation of water vapor occurring inside the partition in winter did not pose a threat to the structure.

A building model was developed in the design and building modeling software - SketchUp, and parameters for this model were determined by defining external partitions, climate data and building orientation. Using the energy simulation plug-in - DesignPH, an energy simulation of the building was performed and the obtained results were exported to a PHPP excel sheet. The original building did not meet the requirements of a passive building, so a way to meet them was determined by using solutions such as increasing the insulation in the external wall from 12 to 18 cm, replacing the windows with windows with a better heat transfer coefficient U_g and U_f , as well as a more favorable g coefficient, using ventilation with heat recovery with the efficiency of 89% and the installation of photovoltaic panels to reduce the demand for primary energy. By performing another energy simulation with defined modifications, results were obtained which indicated that all required parameters of passive house and Technical Conditions were met.

In the next stage of the research, the current climate in Poland was analysed on a sample of four locations and, based on the described Representative Concentration Pathway (RCP) determined by the International Panel on Climate Change (IPCC), forecasted climate parameters were prepared for four scenarios of climate change - two for 2030 and two for 2050. As a result of the research, it was noted that there is one parameter that is likely to exceed the minimum permissible value for passive houses - the frequency of building overheating, which may result in the need to use an additional cooling system in the following years.

In the last stage of the doctoral dissertation, it was checked the payback period for additional expenditure incurred on adapting the building to the passive house standard as a result of possible savings on heating and electricity consumption. Taking into account the differences in the demand for heating energy and the use of renewable energy sources in a passive building, it was estimated that the closest possible payback will occur after 14 years.

Conclusions from research were presented as well as the proposed research directions and the practical application of the results obtained in this doctoral thesis.