



**Politechnika  
Śląska**

# OPTIMALIZACJA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ BUDYNKÓW W PROCESIE PROJEKTOWYM W OPARCIU O TECHNOLOGIĘ BIM

**AUTOR: MGR INŻ. ARCH. JAKUB ŚWIDZIŃSKI**

PROMOTOR: DR HAB. INŻ. ARCH. MICHAŁ STANGEL, PROF. POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

OPIEKUN NAUKOWY: DR INŻ. ARCH. ŁUKASZ ZAGAŁA, MEDUSA GROUP

Wydział Architektury Politechniki Śląskiej | Szkoła Doktorów Politechniki Śląskiej

Gliwice, wrzesień 2024

## SPIS TREŚCI

ROZDZIAŁ 1. WSTĘP.....	4
1.1 Wprowadzenie.....	4
1.2 Problem badawczy.....	5
1.3 Uzasadnienie podjęcia tematu.....	6
1.4 Cel pracy.....	7
1.5 Stan badań.....	7
1.6 Tezy pracy.....	9
1.7 Zakres pracy.....	10
1.8 Metody pracy.....	10
1.9 Struktura pracy.....	11
ROZDZIAŁ 2. OPTIMALIZACJA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W ARCHITEKTURZE.....	13
2.1 Wprowadzenie.....	13
2.2 Optymalizacja w architekturze.....	13
2.3 Efektywność energetyczna.....	15
2.4 Geneza optymalizacji energetycznej.....	23
2.5 Komfort cieplny – ograniczenie optymalizacji.....	26
2.6 Wnioski i dyskusja.....	30
ROZDZIAŁ 3. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA W PROCESIE PROJEKTOWYM.....	32
3.1 Wprowadzenie.....	32
3.2 Uwarunkowania formalnoprawne w Unii Europejskiej.....	33
3.3 Uwarunkowania formalnoprawne w prawodawstwie polskim.....	35
3.4 Charakterystyka energetyczna.....	37
3.5 Inne standardy energetyczne.....	46
3.6 Wnioski i dyskusja.....	51
ROZDZIAŁ 4. PRAKTYKA PROJEKTOWA A TECHNOLOGIA BIM.....	53
4.1 Wprowadzenie.....	53
4.2 Charakterystyka polskiego zasobu mieszkaniowego.....	53
4.3 Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych.....	55
4.4 Metody optymalizacji energetycznej.....	57
4.5 Specyfika procesu projektowego.....	60
4.6 BIM – modelowanie informacji o budynku.....	63
4.7 Wnioski i dyskusja.....	66
ROZDZIAŁ 5. ANALIZA REFERENCYJNYCH, ZOPTYMALIZOWANYCH ENERGETYCZNIE BUDYNKÓW.....	68
5.1 Wprowadzenie.....	68
5.2 Analiza przypadków badań wariantowych w literaturze.....	70
5.3 Analiza przypadków istniejących budynków zoptymalizowanych energetycznie.....	78

ROZDZIAŁ 6. APLIKACJA WYBRANYCH METOD I BADANIE ICH WPŁYWU NA SPRAWNOŚĆ ENERGETYCZNĄ BUDYNKU.....	104
6.1 Wprowadzenie.....	104
6.2 Zakres badań.....	105
6.3 Model referencyjny.....	106
6.4 Scenariusze wariantowania.....	110
6.5 Wyniki.....	115
6.6 Wnioski.....	119
ROZDZIAŁ 7. PODSUMOWANIE.....	122
7.1 Wprowadzenie.....	122
7.2 Podsumowanie badań literaturowych.....	122
7.3 Podsumowanie badań analizy przypadków.....	123
7.4 Podsumowanie badań symulacji energetycznych.....	123
7.5 Wdrożenie efektów badań.....	124
7.6 Weryfikacja założeń pracy.....	127
7.7 Kierunki dalszych badań.....	130
BIBLIOGRAFIA.....	132
AKTY PRAWNE I NORMY.....	138
RAPORTY I BAZY DANYCH.....	139
SPIS ILUSTRACJI.....	140
SPIS ZDJĘĆ.....	142
SPIS TABEL.....	142
STRESZCZENIE.....	144
SUMMARY.....	144

# ROZDZIAŁ 1. WSTĘP

## 1.1 Wprowadzenie

Przedmiotem pracy doktorskiej jest zbadanie zagadnienia optymalizacji efektywności energetycznej budynków w procesie projektowym. Efektywność energetyczna jest jednym z kluczowych aspektów idei zrównoważonego rozwoju. Mając na uwadze postępujące zmiany klimatyczne oraz wytrzymałość światowego systemu ekologicznego, zmniejszenie konsumpcji energii przez obiekty budowlane ma olbrzymi potencjał zmian bilansu energetycznego współczesnych miast. Budynki i przemysł budowlany były odpowiedzialne za ponad jedną trzecią globalnego zużycia energii oraz 37% emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery w roku 2020 (United Nations Environment Programme, 2021). W Polsce w roku 2020 zużycie energii przez gospodarstwa domowe wyniosło 29,6% finalnego zużycia energii (GUS, 2022). Zarówno praktycy, jak i teoretycy architektury dokładają starań, aby do wznoszenia i funkcjonowania budynków podczas całego cyklu ich życia było potrzebne mniej energii. Globalne tendencje wskazują, że udział na rynku nieruchomości budynków energooszczędnych stale się zwiększa, między innymi przez rosnącą świadomość inwestorów, wprowadzanie regulacji prawnych dotyczących zużycia energii, zwiększonej dostępności rozwiązań technologicznych oraz presji społecznej. Niestety, wyniki kolejnych raportów (Eurostat, 2022; IEA, 2018, 2019a, 2023a; U.S. Energy Information Administration, 2023) wskazują, że obecnie przyjęte standardy staną się niewystarczające, aby zrealizować cele postawione przez Unię Europejską, by do 2030 ograniczyć o co najmniej 55% emisję gazów cieplarnianych oraz postulowaną przez Organizację Narodów Zjednoczonych i Unię Europejską neutralność klimatyczną do roku 2050 (Komisja Europejska, 2019). W związku z tym w najbliższych latach praktyka architektoniczna będzie zmuszona do zwiększania energooszczędności projektów. **Pomimo stosunkowo dobrze rozwiniętej dyskusji teoretycznej dotyczącej zagadnienia optymalizacji efektywności energetycznej w projektowaniu architektonicznym, transfer tej wiedzy do praktyki architektonicznej jest niewystarczająco skuteczny** (IEA, 2023b). Pomimo powszechnego wdrażania BIM, projektanci rzadko korzystają z modeli w myśl zasad projektowania zintegrowanego zorientowanego na optymalizację efektywności energetycznej. Wynika to m.in. z różnorodnych barier sektorowych, niedostatecznej wymiany doświadczeń, skomplikowania procesów.

Niniejsza dysertacja stanowi praktyczne ujęcie szeroko diskutowanego zagadnienia optymalizacji energetycznej w projektowaniu architektonicznym w oparciu o najważniejsze techniczno-informatyczne narzędzie architekta – modelowanie BIM. Głównym celem dysertacji jest analiza tej newralgicznej tematyki osadzonej w dynamicznie zmieniających się ramach formalnoprawnych, w sposób przystępny dla projektantów. Wynikiem i wkładem pracy są wytyczne dla projektantów dotyczące optymalizacji efektywności energetycznej budynków na różnych etapach projektowych, ze szczególnym uwzględnieniem zasad projektowania zintegrowanego oraz roli architekta w całym procesie.

Studia doktoranckie realizowane były w ramach IV edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy” w partnerstwie z biurem projektowym Medusa Group, w którym autor rozprawy był zatrudniony przez czas trwania studiów, na stanowisku architekta. W tym czasie autor uczestniczył osobiście w tworzeniu projektów m.in. budynków wielorodzinnych mieszkaniowych w różnych stopniach dokładności, zależnej od etapu zaawansowania. Rezultaty prowadzonych badań były konfrontowane z praktyką projektową i na jej podstawie dokonywano określenia potrzeb i wytyczania kierunków wdrożeń. Przeprowadzone badania bazowały na dokumentacji projektowej opracowanej w ramach działania przedsiębiorstwa.

## 1.2 Problem badawczy

Definicje pojęcia efektywności energetycznej różnią się w zależności od omawianej dyscypliny naukowej. Ze względu na jej kluczowe znaczenie w strategiach, politykach klimatycznych, aktach prawnych itp. zagadnienie występuje w różnych gałęziach przemysłu i gospodarki. W szerszym kontekście określenie stosowane jest niemal w każdej dyscyplinie, w której wykorzystywana jest energia elektryczna bądź cieplna i dotyczy efektywnego jej wykorzystywania mającego na celu zmniejszenie lub wyeliminowanie strat w procesie tworzenia produktów lub dostarczenia usług. Zagadnienie jest więc obecne m.in. w transporcie, produkcji urządzeń, przemyśle, energetyce i jej dystrybucji oraz w projektowaniu, budowaniu i eksploatacji budynków. Ze względu na tak szerokie zastosowanie terminu, najbardziej ogólną definicję podaje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej (Dyrektywa 2012/27/UE, 2012), która określa efektywność energetyczną jako: *“stosunek uzyskanych wyników, usług, towarów lub energii do wkładu energii”*. Definicją bardziej szczegółową, adekwatną do problematyki sektora architektoniczno-budowlanego, która występuje w polskim prawodawstwie, jest ta podana przez Ministerstwo Rozwoju i Technologii:

*“Przez efektywność energetyczną budynku należy rozumieć stopień przygotowania budynku do zapewnienia komfortu jego użytkowania zgodnie z przeznaczeniem przy jednoczesnym możliwie najniższym zużyciu energii przez ten budynek.”* (Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030, 2024)

Przy takim sformułowaniu, możliwa jest obiektywna ocena zbioru właściwości budynku, mających wpływ na jego zużycie energii. Rezultat oceny charakterystyki obiektu nieodłącznie związany jest z zagadnieniem budynków energooszczędnych, w których straty energii są zminimalizowane lub zredukowane do zera. Wśród budynków energooszczędnych można wyróżnić m. in.:

1. **Budynki zeroenergetyczne** (Zero Energy Building) - “budynek energooszczędny, w którym, w odniesieniu do nośników energii, w ciągu roku ilość energii końcowej dostarczonej jest mniejsza lub równa energii wygenerowanej na miejscu i wyeksportowanej do sieci” (U.S. Department of Energy, 2015).
2. **Budynki netto zeroenergetyczne** (netto Zero Energy Building) - o zerowym zużyciu energii pierwotnej w ujęciu rocznym  $EP=0$  kWh/(m<sup>2</sup>·rok). W tym przypadku bilans pobieranej energii bierze pod uwagę straty i nieefektywność systemu energetycznego w danym miejscu. Należy zwrócić szczególną uwagę na to, że klasyfikacja jako netto zeroenergetyczne zależy od udziału OZE i paliw kopalnych w systemie energetycznym i w krajach o dużym udziale OZE w krajowym miksie energetycznym warunek ten jest dużo prostszy do spełnienia, niż np. w Polsce, gdzie udział źródeł odnawialnych to ok 20%. (GUS, 2024).
3. **Budynki pasywne** – certyfikowane przez Instytut Budownictwa Pasywnego w Darmstadt (Passivehaus Institut – PHI). Założeniem tych budynków jest uzyskanie niskich wartości zużycia energii poprzez stosowanie pasywnych metod optymalizacji energetycznej, takich jak maksymalizacja zysków słonecznych, doskonała izolacja, czy wysoka szczelność budynku. Jednym z podstawowych założeń jest maksymalne zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania i chłodzenia na poziomie  $EU=15$  kWh/(m<sup>2</sup>·rok) (PHI, 2023).
4. **Budynki plusenergetyczne** - budynki, które w swojej granicy bilansowania posiadają ujemny bilans zużycia energii. Powszechnie definiowany jest jako taki, który generuje rocznie więcej energii niż rocznie wykorzystuje w ciągu cyklu życia. Osiągnięcie takiego efektu jest możliwe tylko przy generowaniu energii w ramach granicy budynku. (Ryńska, 2017).
5. **Budynki o niemal zerowym zużyciu energii**- *“budynek o niemal zerowym zużyciu energii oznacza budynek o bardzo wysokiej charakterystyce energetycznej określonej zgodnie z załącznikiem I. Niemal zerowa lub bardzo niska ilość wymaganej energii powinna pochodzić w bardzo wysokim stopniu z energii ze źródeł odnawialnych, w tym energii ze źródeł odnawialnych wytwarzanej na miejscu lub w pobliżu”* (Dyrektywa 2010/31/UE, 2010). Doprecyzowanie definicji leżało w

kompetencji poszczególnych państw członkowskich i w Polsce podstawą regulacji był zmienny wskaźnik zużywanego energii pierwotnej, wynoszący  $EP=65 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$  od 2021 roku. W prawodawstwie krajowym budynki te są określane jako *budynek o niskim zużyciu energii* (*Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030, 2024*).

Przyjmując za punkt wyjścia praktykę architektoniczną w Polsce oraz realistyczny zakres wkładu architekta w zmniejszenie zużycia energii przez budynek, najistotniejszym dla dysertacji typem budynków energooszczędnych są budynki o niemal zerowym zużyciu energii, w Polsce definiowane także jako budynki o niskim zużyciu energii. Charakterystyka pozostałych wymienionych budynków energooszczędnych uwzględnia w szczególności sposób sytuację socjoekonomiczną i geopolityczną, ponieważ uwzględnia także źródła energii, którą są zasilane. W niniejszej pracy, autor odnosi się w szczególności do wskaźników bezpośrednio dotyczących zapotrzebowania na energię. Ponadto, budynki energooszczędne i o obniżonym zapotrzebowaniu na energię odnoszą się do takich, w których obniżenie energochłonności było jednym z założeń projektowych i zakładało dążenie do osiągnięcia niższych współczynników niż wymagane przez prawo w danym miejscu i czasie, co jednoznacznie wskazuje na przeprowadzenie procesu optymalizacji energetycznej.

### 1.3 Uzasadnienie podjęcia tematu

Działania w zakresie optymalizacji energetycznej są obecnie niezbędnym postępowaniem przy każdym powstającym bądź modyfikowanym budynku i zamierzeniu budowlanym. Budynki i ich użytkowanie pochłaniają znaczną część ogólnie produkowanej energii, więc naturalnym procesem jest dążenie do zmniejszenia wydatków energetycznych w każdym użytkowanym obiekcie. Motywacje do poprawienia energooszczędności nowych inwestycji są różnorodne - począwszy od aspektu ekonomicznego w kontekście stale drożejącej energii, kończąc na ograniczeniu emisji  $\text{CO}_2$  i gazów cieplarnianych do atmosfery z troski o kondycję środowiska naturalnego, jak i zdrowie mieszkańców naszej planety. Zasadniczym, bezpośrednim bodźcem do zmniejszenia zapotrzebowania budynków na energię są uwarunkowania prawne, wymagające stosowania określonych standardów w celu uzyskania pozwolenia na budowę obiektu. Właśnie te uwarunkowania stanowią punkt wyjścia niniejszej pracy jako uniwersalny wymóg obejmujący każdy omawiany przypadek. W praktyce architektonicznej bardzo istotny jest proces projektowy budynków pasywnych. **Pomimo wysokiego poziomu wiedzy dotyczącego budownictwa energooszczędnego, publikacje odnoszące się do samego procesu projektowego, zadań, kompetencji i możliwości w zakresie optymalizacji efektywności energetycznej budynków, są niedostateczne.** Można zaobserwować, że projektanci są często zaznajomieni z zagadnieniem efektywności energetycznej, natomiast brakuje know-how, bądź zainteresowania w zakresie wykonywania projektów, które osiągają bardziej optymalną charakterystykę energetyczną (Bać, 2020a). W wielu przypadkach rozważania na temat oszczędności projektowanych obiektów ogranicza się do obliczania izolacyjności przegród i określeniu przy jakiej minimalnej grubości izolacji warunków przenikania ciepła  $U$  określony w WT zostanie spełniony (Żurawski, 2009). Temat, który powinien być jednym z podstawowych aspektów przy korzystaniu z nowoczesnych metod projektowych, traktowany jest często jako przykra konieczność i utrudnianie pracy projektanta i inwestora. Taki stan rzeczy powoduje, że w Polsce użytkujemy w większości budynki nienależące do efektywnych energetycznie, przy jednoczesnym oparciu energetyki głównie o węgiel kamienny (GUS, 2024). Ważnym czynnikiem motywującym do podjęcia problematyki optymalizacji efektywności energetycznej jest potencjał wdrożenia w codziennej pracy zawodowej, zwłaszcza w obliczu rosnących wymagań formalnoprawnych na tym polu. Zważywszy, że według kolejnych raportów tempo redukcji emisji  $\text{CO}_2$  jest niewystarczające, należy spodziewać się bardziej radykalnych kroków podejmowanych przez organizacje międzynarodowe w celu uzyskania neutralności klimatycznej w 2050 r. Dysertacja jest okazją do poruszenia newralgicznego tematu budownictwa w kontekście pogłębiającego się kryzysu klimatycznego i ma szansę być nowym głosem w dyskursie dot. metodologii tworzenia nowoczesnej architektury oraz w kontekście budownictwa przyjaznego środowisku w Polsce i Europie.

## 1.4 Cel pracy

Dysertacja pisana jest w trybie doktoratu wdrożeniowego, z perspektywy aktywnego uprawnionego architekta i stanowi zapis badań i analiz powiązanych z projektowaniem budynków mieszkaniowych wielorodzinnych w pracy autora w biurze projektowym Medusa Group. Najistotniejsze cele niniejszej pracy są związane z optymalizacją efektywności energetycznej w budynkach w praktyce architektonicznej:

- Cel 1.** Systematyzacja wiedzy dotyczącej efektywności energetycznej oraz metod jej optymalizacji w przemyśle architektoniczno-budowlanym.
- Cel 2.** Zestawienie metod służących optymalizacji energetycznej w różnych fazach procesu projektowo-budowlanego oraz w różnych fazach cyklu życia budynku.
- Cel 3.** Wyznaczenie kompetencji architekta spośród zestawionych metod optymalizacji efektywności energetycznej w budynkach na etapie projektowym.
- Cel 4.** Zbadanie zasadności użycia oprogramowania BIM w celu optymalizacji efektywności energetycznej.
- Cel 5.** Opracowanie metodologii optymalizacji efektywności energetycznej w praktyce architektonicznej oraz określenie niezbędnych narzędzi architekta.
- Cel 6.** Oszacowanie skali oszczędności wydatków energetycznych w budynku dzięki zaproponowanej metodologii efektywności energetycznej.
- Cel 7.** Rozważenie zagadnienia optymalizacji efektywności energetycznej jako kompetencji architekta w kontekście projektowania zintegrowanego.
- Cel 8.** Wyznaczenie zaleceń i wytycznych dotyczących metod pracy architekta w celu optymalizacji efektywności energetycznej.

## 1.5 Stan badań

Tematyka efektywności energetycznej, stanowiącą jedną z podstaw zrównoważonego rozwoju zaczęła być podnoszona w latach 80. XX w. Najważniejsze publikacje, które ugruntowały te założenia w świecie to: *Our Common Future—Call for Action* (Brundtland, 1987), który był punktem wyjścia do działań ONZ, zwieńczonych Szczytem Ziemi w Rio De Janeiro w 1992 i opracowaniu „Agendy 21: Strategia Szczytu Ziemi dla ochrony naszej planety” (United Nations, 1992). Pozycja ta zyskała aktualizację w roku 2015 w formie „Agendy 2030”, która zawiera 17 celów zrównoważonego rozwoju, których osiągnięcie ma poprawić dobrobyt ludzi i stanu środowiska (United Nations, 2015a).

Dokumenty te stanowiły podstawę do dalszych badań i licznych publikacji w tym temacie. Do najważniejszych z nich należą m.in.: *The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy Technology and Policy* (Prindle, 2007), jak również publikacje napisane przez (Brophy i Lewis, 2011; Gillingham i in., 2009; Laustsen, 2008; Pacheco i in., 2012; Wilkinson i in., 2007).

Badania nad optymalizacją energetyczną prowadzone są na wielu czołowych uczelniach, łączących teorię z praktycznymi projektami budowlanymi. Harvard University realizuje projekty takie jak ZERØ House, testując technologie budynków o zerowym zużyciu energii, skupiając się na efektywności energetycznej i energii odnawialnej. Podobne badania połączone z praktyką realizowane są także przez

MIT, Stanford University, University of Cambridge, Technical University of Denmark oraz University of California, Berkeley. Autorzy publikujący na temat optymalizacji energetycznej z wymienionych uczelni to na przykład: Ali Malkawi, Leon Glicksman, John Ochsendorf, Koen Steemers, Per Heiselberg, Gail Brager (Bizzarri i in., 2023; Brager i in., 2015; De Wolf i in., 2016; Heisel i Hebel, 2022; Kolarevic i Malkawi, 2004; Nikolopoulou i Steemers, 2003; Steemers, 2003; Wang i Malkawi, 2019).

W temacie standardów i certyfikacji energetycznej budynków warto wymienić prace takich autorów jak: Hemann Amecke, Xavier Garcia Casals, Pablo la Roche i Luis Pérez-Lombard (Amecke, 2012; Casals, 2006; La Roche i Milne, 2004; Pérez-Lombard i in., 2008). Ważnym źródłem informacji w tym temacie są także publikacje w czasopismach *Energies* oraz *Energy and Buildings* (Butala i Novak, 1999; Cristino i in., 2022; Karimi i in., 2023; Kwiatkowski i Rucińska, 2020).

W Polsce temat zrównoważonego rozwoju jest także bardzo często poruszany, w różnych kontekstach, począwszy od samej idei (Bać, 2016, 2014; Baranowski, 1998; Kronenberg i in., 2010). Zagadnienie opisywane jest w różnych skalach, począwszy od miejskiej i urbanistycznej (Górka, 2002; Gzell, 2015; Stangel, 2013; Wehle-Strzelecka i Korczyńska, 2007; Zuziak, 2007) do architektonicznej, gdzie warto wymienić pracę takich autorów jak: Anna Bać, Janusz Marchwiński, Elżbieta Ryńska, Katarzyna Zielonko-Jung oraz Andrzej Baranowski (Bać, 2020b; Marchwiński i Zielonko-Jung, 2014; Ryńska, 2001; Zielonko-Jung, 2013). Energetyka w architekturze, jako jeden z kluczowych obszarów zrównoważonego rozwoju, jest opisywana przez wielu autorów pod względami koncepcji energetycznej budynku (Fidorów-Kaprawy i in., 2017; Kasperkiewicz, 2007) oraz podejścia projektowego (Jagiełło-Kowalczyk, 2017; Kurtz, 2012; Sowa i in., 2017).

Interesującą pozycją, traktującą przekrojowo zagadnienia efektywności energetycznej w architekturze, jest: *Architektura energoaktywna po 2021*, która interdyscyplinarnie ukazuje temat światowych tendencji w projektowaniu klimatycznym i energooszczędnym, wymogi prawne związane z energią od roku 2021 w Polsce i Unii Europejskiej oraz o możliwości i uwarunkowania ich spełnienia. Autorami poszczególnych rozdziałów są: Anna Bać, Henryk Kwapisz, Katarzyna Zielonko-Jung, Łukasz Nowak, Jarosław Figaszewski, Piotr Kuczia, Piotr Kęskiewicz, Przemysław Wojsznis, Radosław Radziecki, Wojciech Stec, Konrad Witczak i Wojciech Kujawski.

Podobny przekrojowy charakter w przedmiotowym temacie ma publikacja *Budynki o niemal zerowym zużyciu energii* pod redakcją Jerzego Sowy przy udziale autorów: Piotra Bartkiewicza, Jarosława Chudzickiego, Pawła Kędzierskiego, Anny Komerskiej, Jerzego Kwiatkowskiego, Macieja Mijakowskiego, Liliany Mirosz, Piotra Narowskiego, Piotra Prackiego, Joanny Rucińskiej, Elżbiety Dagny Ryńskiej, Jerzego Sowy, Michała Strzeszewskiego, Adriana Trząskiego i Andrzeja Wiszniewskiego (Sowa i in., 2017).

Zagadnienie efektywności energetycznej w budownictwie jest rozpatrywane nie tylko z perspektywy czysto architektonicznej, ale również w kontekście dziedzin pokrewnych, takich jak fizyka budowli czy systemy instalacyjne, które zapewniają komfort użytkownika oraz umożliwiają pozyskiwanie energii. Ze względu na ścisłe powiązania między tymi obszarami, wiele prac naukowych omawia te kwestie jednocześnie, tworząc kompleksowy obraz wyzwań i rozwiązań związanych z optymalizacją energetyczną w sektorze budowlanym (Bochnia, 2017; Borowska i Kulczewska, 2016; Dopke, 2010; Firląg i Staniaszek, 2015; Furtak i in., 2021; Górski i in., 2020; Jagiełło-Kowalczyk, 2010; Kasperkiewicz, 2007; Komorowska i Mirowski, 2016; Lis i Lis, 2018; Pogorzelski, 2007; Sadowska, 2015; Szczechowiak, 2015).

Certyfikacja, opisywana jest zarówno w kontekście charakterystyki energetycznej i wyzwań z nią związaną (Chruściel, 2023; Jadwiszczak, 2013; Rucińska i in., 2019; Żurawski, 2013), jak i w opracowaniach alternatywnych propozycji, wśród których interesujące podejście poparte analizą polskiego zasobu budowlanego prezentują Jerzy Kwiatkowski i Joanna Rucińska (Kwiatkowski i Rucińska, 2020).

Zrównoważone podejście do projektowania opisują w swoich pracach Robert Barelkowski, Beata Majerska-Pałubicka i Jan Pallado, (Barelkowski, 2017; Majerska-Pałubicka, 2014, 2013; Pallado, 2016), natomiast o roli zintegrowanego projektowania we współczesnej architekturze piszą między innymi Magdalena Jagiełło-Kowalczyk i Przemysław Markiewicz (Jagiełło-Kowalczyk, 2017; Markiewicz, 2016).



Wykorzystanie symulacji komputerowych na poszczególnych etapach projektowych jest jednym z głównych obszarów niniejszej pracy. Literatura przedmiotu traktująca o tym zagadnieniu jest szczególnie istotna w kontekście wykorzystania ich w procesie projektowym. Źródłami w tym temacie publikacje autorów takich jak: Jui-Sheng Chou, Dac-Khuong Bui, Varick Erickson, Dae Kyo Jung, Xiwang Li oraz Frauke Oldewurtel (Chou i Bui, 2014; Erickson i in., 2009; Jung i in., 2013; Li i Wen, 2014; Oldewurtel i in., 2012, 2010). W Polsce o tym zagadnieniu piszą Andrzej Borkowski, Jan Słyk, Jacek Janota-Bzowski, Dariusz Kasznia, Tadeusz Kuczyński, Agnieszka Rogoża, Radosław Szczerbowski (Borkowski i in., 2022; Borkowski i Maroń, 2023; Borkowski i Michalak, 2024; Janota-Bzowski, 2015; Kasznia i in., 2017; Kuczyński i in., 2011; Rogoża, 2014; Słyk, 2015; Szczerbowski, 2014).

Bardzo istotną kwestią w tym obszarze jest istnienie tzw. "performance gap", czyli różnicy sprawności energetycznej między opracowanymi modelami a faktycznie istniejącymi budynkami. Zjawisko to zaobserwowano w kolejnych badaniach studiów przypadków (Bahadori-Jahromi i in., 2022; Borkowski i Michałkiewicz, 2022; Imam i in., 2017; Kim i in., 2021; Mehta, 2021; Wang i in., 2020).

Związane z tematem i warte uwagi badania na podstawie studiów przypadków przeprowadzili Leszek Dulak i Rafał Żuchowski, Bartosz Felski, Olga Gębczyk, Jerzy Górski, Joanna Klimowicz, Marcin Kaczmarzyk, Joanna Kajewska-Szkudlarek, Elżbieta Dagna Ryńska i Adrian Trząski. (Dulak i Żuchowski, 2013; Felski, 2019; Gębczyk, 2008; Górski i Klimowicz, 2018; Kaczmarzyk, 2017; Kajewska-Szkudlarek i in., 2024; Klimowicz, 2018; Ryńska i in., 2020; Trząski, 2021).

Zagadnienie komfortu cieplnego, opracowane przez Povla Ole Fanger (Fanger, 1970), jest rozwijane przez organizacje zajmujące się standaryzacją takie jak ASHRAE, która opracowuje standardy (np. ASHRAE Standard 55) dotyczące warunków środowiskowych zapewniających komfort cieplny, ISO (np. ISO 7730), definiująca międzynarodowe normy ergonomii środowiska termicznego na podstawie wskaźników takich jak PMV i PPD, oraz CIBSE, brytyjska organizacja, która wydaje wytyczne dotyczące projektowania budynków zapewniających odpowiednie warunki komfortu cieplnego oraz jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń. Autorzy, których prace stanowią podstawę wiedzy na ten temat to Richard De Dear, Gail Brager, Bjarne Olesen, Fergus Nicols i Michael Humphreys (Brager i De Dear, 1998; Nicol i Humphreys, 1998; Olesen i Parsons, 2002).

W Polsce temat komfortu termicznego poruszają prace Anny Lis, Zbigniewa Pluteckiego, Iwony Sudoł-Szopińskiej i Anny Chojnackiej i Lecha Śliwowskiego (Lis, 2016, 2007; Plutecki, 2011; Sudoł-Szopińska i Chojnacka, 2007; Śliwowski, 1999).

Poruszany obszar tematyczny jest także tematem obronionych rozpraw doktorskich w ostatnich latach (Jamroży, 2021; Juchimiuk, 2019; Michalski, 2019; Sikorski, 2018).

## 1.6 Tezy pracy

Teza główna:

**Projektowanie architektoniczne obiektów mieszkaniowych wielorodzinnych, w oparciu o technologię BIM na wczesnych etapach koncepcyjnych, może ułatwić proces optymalizacji efektywności energetycznej budynku. Pozwala ono na bardziej świadomą kontrolę wartości parametrów dotyczących elementów architektury budynku decydujących o jego wydajności energetycznej.**

Tezy pomocnicze:

1. **Projektowanie zintegrowane jest katalizatorem procesu optymalizacji efektywności energetycznej budynku mieszkalnego wielorodzinnego w początkowych fazach procesu projektowo-budowlanego.**
2. **Symulacje wykonywane na podstawie modelu BIM stanowią adekwatne narzędzie do przeprowadzania optymalizacji efektywności energetycznej w ramach kompetencji architekta.**

## 1.7 Zakres pracy

Zakres pracy wynika z określonych celów dysertacji, ma źródło w praktyce architektonicznej i jest następstwem problematyki napotkanej przez autora podczas wykonywania komercyjnych projektów dla prywatnych inwestorów. Analizie poddano budynki mieszkalne wielorodzinne, które charakteryzują się określoną typologią oraz zbiorem parametrów architektonicznych, np. układami okien, planem funkcjonalnym, geometrią czy wymaganiami formalno-prawnymi.

Większość budynków oddanych do użytku w ostatnich latach w Polsce to budynki mieszkalne. W 2023 aż 81%, z czego 51%, czyli aż 41% wszystkich, to budynki mieszkalne wielorodzinne (GUS, 2024a). Statystyka ta ma odzwierciedlenie w praktyce projektowej autora, który w latach trwania doktoratu tj. 2020-2024 pracował między innymi nad projektem zespołu budynków mieszkalnych w Katowicach. Przeanalizowano przypadki budynków mieszkalnych wielorodzinnych w celu wyodrębnienia cech i wskaźników, które determinowały ich mniejsze zużycie energii niż w budynkach konwencjonalnych. W centrum zainteresowania autora były metody, strategie i podejścia, które stanowią kompetencje architekta. W pracy oddzielono czynniki niezależne od procesu projektowego i skupiono się na działaniach praktycznych i opartych o szeroko stosowane modelowanie BIM. Ponadto na podstawie badań źródeł została przybliżona problematyka związana z optymalizacją efektywności energetycznej oraz jej powiązań z projektowaniem architektonicznym. Wskazano przyczyny konieczności przeprowadzania optymalizacji oraz omówiono tematykę pokrewną istotną w kontekście dysertacji. Przedstawiono zagadnienie z perspektywy interdyscyplinarnej – fizyki budowli, instalacji wewnętrznych, budownictwa, aby zarysować granice kompetencji i wskazać działania wymagające interdyscyplinarnego zespołu.

Zakres czasowy dla analiz przeprowadzonych w pracy został określony na dekadę poprzedzającą początek studiów doktoranckich, czyli okres po roku 2010. Standardy energetyczne ewoluują w szybkim tempie, co wynika z aktualności tematu, stąd zasadną jest analiza budynków zrealizowanych w podobnych uwarunkowaniach ekonomiczno-prawnych. W przypadku badań literatury zakres został poszerzony o opracowania wcześniejsze, aby uniknąć pominięcia ważnych dla dziedziny publikacji.

Zakres przestrzenny prowadzonych badań osadzony jest w Polsce i rozszerzany w zależności od poruszanego obszaru tematycznego. Przy analizie przypadków budynków wzięto pod uwagę obiekty znajdujące się w lokalizacjach o podobnych warunkach klimatycznych, co zostało opisane szczegółowo w podrozdziale 5.3.2. Do analizy uwarunkowań formalnoprawnych wzięto pod uwagę kraje Europejskiego Obszaru Gospodarczego (EOG), ze względu na wspólnotę gospodarczo-rynkową i prawną.

## 1.8 Metody pracy

W pracy wykorzystano różnorodne metody badawcze, stanowiące kompetencje zarówno badaczy teorii architektury, jak i praktyków.

Analiza źródeł literaturowych posłużyła do wyjaśnienia podstawowych pojęć i nakreślenia historii pojęcia optymalizacji efektywności energetycznej budynków.

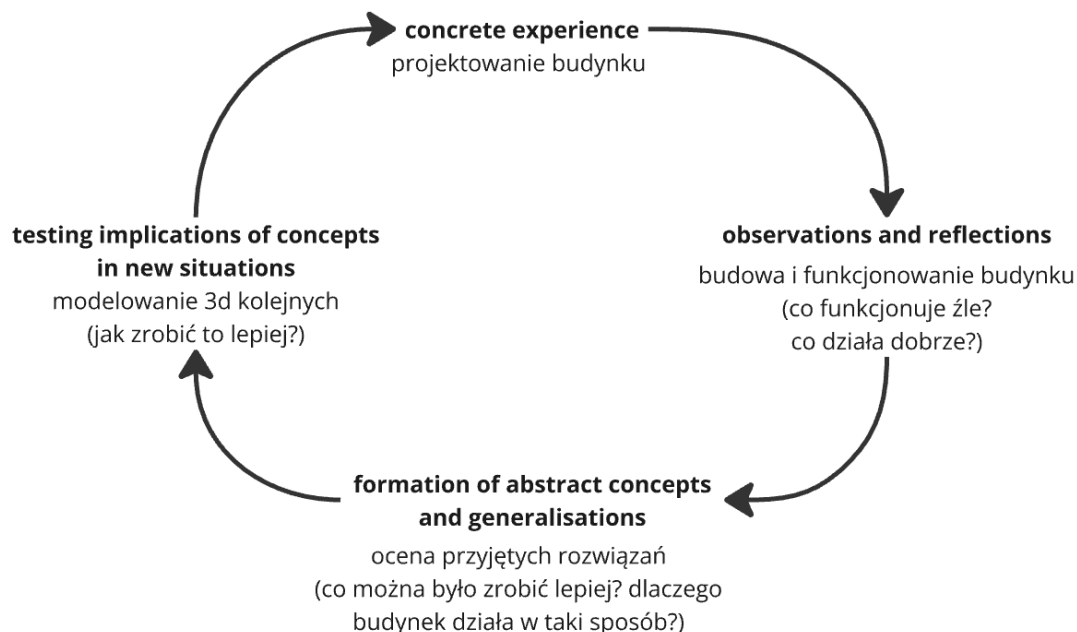
Szeroko stosowana w architekturze i opisie nowych procesów (Yin, 1994) metoda analizy przypadków pozwoliła ustalić, jakie cechy budynków determinują ich efektywność energetyczną. Studia przypadków dobrano za pomocą metody doboru eksperckiego.

Kluczowe w dysertacji są badania w zakresie tzw. *reflective practice*. Metoda pozwala na uczenie się na błędach we własnej praktyce, ewaluację tych błędów, wyciąganie konstruktywnych wniosków, a następnie wdrożenie tych wniosków w procesach. To szczególnie wartościowa i adekwatna refleksja ze względu na charakterystykę pracy architekta oraz projektów architektonicznych, które mimo potencjału do replikowania niektórych rozwiązań, mają unikalny charakter.

Metodą stanowiącą jedną z najważniejszych kompetencji architekta jest modelowanie BIM, za pomocą którego wykonano modele badanych przypadków oraz końcowe symulacje, które badają zaprojektowane przez autora w wyniku wniosków z badań przypadków scenariusze projektowe.

Symulacje wykonano na modelu koncepcji budynku mieszkalnego w Katowicach, który powstaje na podstawie projektu Medusa Group.

Wszystkie badania ze względu na nietypową w architekturze formę doktoratu wdrożeniowego (partnerstwo podmiotu przemysłowego z uczelnią poprzez doktoranta) mają charakter pilotażowy i eksperymentalny.



Ilustracja 1. Schemat cyklu Kolba (reflective practice)

Źródło: opracowanie własne na podstawie modelu Kolbe'a (Kolb i Fry, 1975)

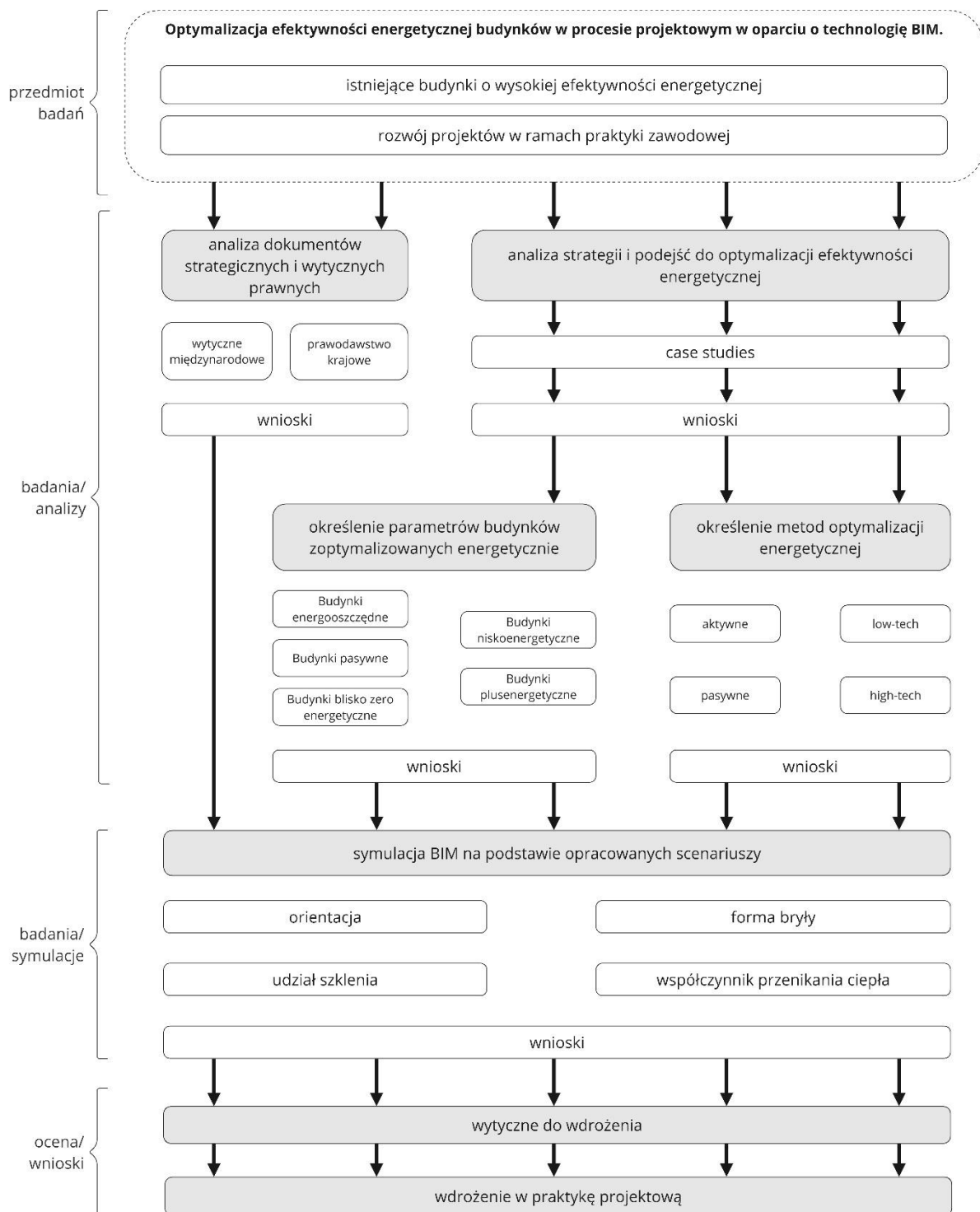
## 1.9 Struktura pracy

Poniżej przedstawiono schemat struktury pracy doktorskiej, który został opracowany na początku studiów, jako plan działania w ramach prowadzenia badań. Schemat jest podzielony na kilka głównych etapów, zaczynając od przedmiotu badań, gdzie rozważa się istniejące budynki o wysokiej efektywności energetycznej oraz rozwój projektów w ramach praktyki zawodowej. W pierwszym etapie zdefiniowano główne założenia pracy, co zostało opisane w rozdziale 1. Następnym krokiem było przeprowadzenie badań polegających na analizie literatury źródłowej, obejmujących dwa zasadnicze obszary tematyczne: analizę dokumentów strategicznych i wytycznych prawnych oraz analizy źródeł naukowych dotyczących pojęcia optymalizacji, efektywności energetycznej, ich miejscem w procesie projektowym oraz możliwych do zastosowania metod służących obniżeniu zapotrzebowania budynków na energię potrzebną do funkcjonowania zgodnie z przyjętymi założeniami.

Badania literatury dotyczącej optymalizacji i efektywności energetycznej zostały opisane w rozdziale 2, natomiast badania na temat efektywności energetycznej na tle procesu projektowego, w którym zawarto analizę wiążących dokumentów prawnych przeprowadzono w rozdziale 3.

Określenie cech budynków, dotyczących parametrów mających wpływ na zużycie energii przez budynek opisano w rozdziale 4, razem z identyfikacją możliwych do wykorzystania metod, wykorzystywanych w procesie optymalizacji. W rozdziale tym poruszono także rolę technologii BIM w procesie projektowym, a także sam jego charakter i alternatywne metody przeprowadzenia.

Badania polegające na studiach przypadków, zarówno przeprowadzonych badań opisanych w literaturze, jak i istniejących budynków poddanych procesowi optymalizacji na etapie ich projektowania. Ta część badań została opisana w rozdziale 5. Rozdział 6 poświęcony jest opisaniu wyników przeprowadzenia symulacji w oparciu o scenariusze, które stworzono na podstawie wniosków z wcześniejszych badań. Wnioski wynikające z analizy wyników badań symulacyjnych stanowią podstawę do wytycznych wdrożeniowych oraz do wytyczenia kierunków dalszych badań.



Ilustracja 2. Schemat pracy doktorskiej.  
 Źródło: opracowanie własne

## ROZDZIAŁ 2. OPTIMALIZACJA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W ARCHITEKTURZE

### 2.1 Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale opisano rolę optymalizacji w architekturze i jej różne rodzaje. W kontekście optymalizacji energetycznej przedstawiono genezę powstania potrzeby jej przeprowadzenia, jak i historię jej zastosowań. Określono także granicę efektywności energetycznej, którą jest komfort cieplny, którego zapewnienie stanowi jedną z podstawowych funkcji budynków.

### 2.2 Optymalizacja w architekturze

Optymalizacja to pojęcie znajdujące zastosowanie w wielu dziedzinach naukowych i praktycznych. Wg szerokiej, powszechnych definicji, jak np. Słownik wyrazów obcych (Kopaliński, 1994) optymalizacja *to wyznaczanie przy użyciu metod matematycznych optymalnego (najlepszego, najkorzystniejszego), ze względu na wybrane kryteria, rozwiązania danego problemu*. Podobnie, w Słowniku Języka Polskiego (Dubisz, 2003) optymalizacja oznacza uzyskanie najlepszych, optymalnych wyników w jakiejś dziedzinie; także wybór najlepszego wariantu. W ujęciu matematycznym Jan Palczewski (Palczewski, 2018) podaje: *„Optymalizacja” to poszukiwanie czegoś „najlepszego”. Sprawdzenie, czy coś (np. decyzja) jest najlepsze, wymaga, przede wszystkim, określenia jakiejś miary, która pozwoli tą decyzję ocenić – funkcji celu*. W dziedzinie ekonomii optymalizacja definiowana jest jako *„proces doskonalenia zarządzania systemem gospodarczym, zapewniający osiągnięcie najlepszego stanu (lub w dynamice – najlepszy sposób funkcjonowania) tego systemu według ustalonego kryterium optymalności i przy ustalonych ograniczeniach”* (Fiedorenko, 1975), natomiast w ujęciu encyklopedycznym optymalizacja [łac. optimus ‘najlepszy’] *to wyznaczenie najlepszego rozwiązania jakiegoś zadania (np. techn., ekon., społ.) ze względu na przyjęte kryterium (wskaźnik specyficznie rozumianej jakości, np. koszt, zysk, niezawodność, dokładność, czas realizacji zadania), przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń* (PWN, 2001).

Pomimo różnic cechą wspólną tych definicji jest poszukiwanie najlepszego możliwego rozwiązania przy jednoczesnym zachowaniu istniejących ograniczeń. **W takim rozumieniu optymalizacja jest immanentną częścią projektowania architektonicznego, które stanowi element kształtowania rozwiązań przestrzennych, poprzedzający fizyczną transformację środowiska.** Równocześnie, specyfika rozstrzygnięć architektonicznych uniemożliwia odnalezienie całkowicie optymalnej propozycji z perspektywy pojedynczego zagadnienia (Barelkowski, 2017). Zdaniem Beaty Majerskiej-Paľubickiej, zadaniem architekta powinno być opracowanie optymalnego projektu, uwzględniającego kontekst miejsca i współczesne potrzeby ekologiczne, ekonomiczne, społeczne i kulturowe (Majerska-Paľubicka, 2014). W procesie kształtowania przestrzeni zbudowanej występują różne formy optymalizacji, m. in:

- **Optymalizacja funkcji:** wytworzenie typologii budynków i przestrzeni odpowiadających precyzyjnie wyznaczonym potrzebom i spełniających konkretną funkcję. W późniejszym czasie projektowanie budynków, które mogą być łatwo przekształcane lub dostosowywane do zmieniających się potrzeb.
- **Optymalizacja formy:** od modernistycznego podporządkowania formy budynku jego funkcji, do parametrycznego optymalizowania kształtu w celu uzyskania lepszych warunków fizycznych, zmniejszenia zużycia materiału itp.
- **Optymalizacja konstrukcji:** projektowanie konstrukcji o maksymalnej wytrzymałości przy minimalnym zużyciu materiałów, zachowanie wydajności strukturalnej.
- **Optymalizacja wykorzystania przestrzeni wewnętrznej:** projektowanie przestrzeni, które są funkcjonalne, wygodne i dostosowane do potrzeb użytkowników z uwzględnieniem anatomii człowieka i zasad ergonomii.

- **Optymalizacja wykorzystania przestrzeni zewnętrznej:** optymalne wykorzystanie dostępnej przestrzeni na działce, uwzględniające kontekst miejsca poprzez integrację z otoczeniem, zarówno pod względem estetyki, jak i funkcjonalności i uwarunkowań lokalnych.
- **Optymalizacja kosztów budowy:** zarządzanie kosztem materiałów i robocizny poprzez logistykę na etapie budowy – kontrola dostaw materiałów, zarządzania placem budowy, harmonogramem prac, minimalizacja przestojów i marnotrawstwa, systematyczny proces poszukiwania najlepszych funkcjonalnych alternatyw, które minimalizują koszty przy zachowaniu lub zwiększeniu jakości i wydajności.
- **Optymalizacja kosztów eksploatacji:** polega na zredukowaniu wydatków związanych z jego użytkowaniem i utrzymaniem, przy jednoczesnym zachowaniu lub podniesieniu standardów funkcjonalności, komfortu i bezpieczeństwa. Proces ten obejmuje różne działania, które mają na celu poprawę efektywności energetycznej, zmniejszenie zużycia zasobów, optymalizację procesów konserwacyjnych, zarządzanie systemami technicznymi budynku oraz zapewnienie odpowiedniej trwałości budynku.
- **Optymalizacja technologiczna:** wybór odpowiednich technologii budowlanych, które skracają czas budowy, zmniejszają koszty i zwiększają jakość konstrukcji oraz dobór systemów instalacyjnych o parametrach adekwatnych do zakładanych potrzeb.
- **Optymalizacja środowiskowa:** uwzględnienie wszystkich kosztów środowiskowych związanych z budynkiem, od budowy przez użytkowanie, konserwację, aż po likwidację. Optymalizacja ta ma na celu minimalizację całkowitych kosztów środowiskowych w cyklu życia budynku i minimalizację śladu węglowego.
- **Optymalizacja zużycia energii:** polega na uzyskaniu jak największej efektywności energetycznej, czyli zmniejszenia ilości energii potrzebnej do osiągnięcia założonych celów dzięki stosowaniu odpowiednich strategii aktywnych i pasywnych.

Wymienione rodzaje optymalizacji oraz ich oddziaływanie na budynki były eksplorowane z różną intensywnością w różnych okresach czasu. Oczywiście, procesy te są od siebie współzależne, często osiągając wspólne cele poprzez zastosowanie konkretnego rozwiązania, ale mogą prowadzić do sprzeczności i eliminować się nawzajem. Zdaniem autora można postawić tezę, że w każdym projekcie można zauważyć wypadkową poszczególnych optymalizacji poczynionych w różnych obszarach.

W procesie projektowym następuje weryfikacja, na którym polu należy zastosować najbardziej optymalne rozwiązania, a gdzie jest miejsce do ustępstw. Następuje gradacja i ewaluacja dostępnych rozwiązań, a następnie podjęcie decyzji i wprowadzenie do projektu. Przykładami ukierunkowania działań optymalizacyjnych na dominujące zagadnienie mogą być prototypowe budynki samowystarczalne pod względem energetycznym, które jednak przez drastycznie wyższe od przeciętnych koszty budowy oraz skomplikowane rozwiązania nie mają potencjału do wdrożenia jako rozwiązania uniwersalne. Innym przypadkiem może być niepoohamowane dążenie do ograniczeń kosztów na etapie budowy w budownictwie mieszkaniowym, którego rezultatem często jest powstawanie nieergonomicznej przestrzeni, która nie spełnia podstawowych oczekiwań użytkowników a jednocześnie nie spełnia standardów materiałowych i jakości wykonania. Nadmierna optymalizacja kosztów eksploatacji i materiałów może prowadzić do zatracenia indywidualnego charakteru projektu, zaniedbania poszanowania kontekstu i zignorowania konieczności dostosowania się do niego. Skupienie uwagi jedynie na zwiększeniu wydajności strukturalnej i optymalizacji konstrukcji może zaowocować zniweczeniem potencjału adaptacyjnego, skazując obiekt na pełnienie założonej (jednej) funkcji przez cały cykl jego życia. Działania takie mogą być świadome i zamierzone, jednak w większości przypadków podporządkowanie wszystkich aspektów projektowych pod jeden kierunek działań z jednoczesnym zmarginalizowaniem innych składowych jest działaniem niepożądanym.

Każdy z tych typów optymalizacji odgrywa istotną rolę w procesie projektowania i realizacji nowoczesnych budynków, pomagając tworzyć efektywne, ekonomiczne i zrównoważone obiekty.

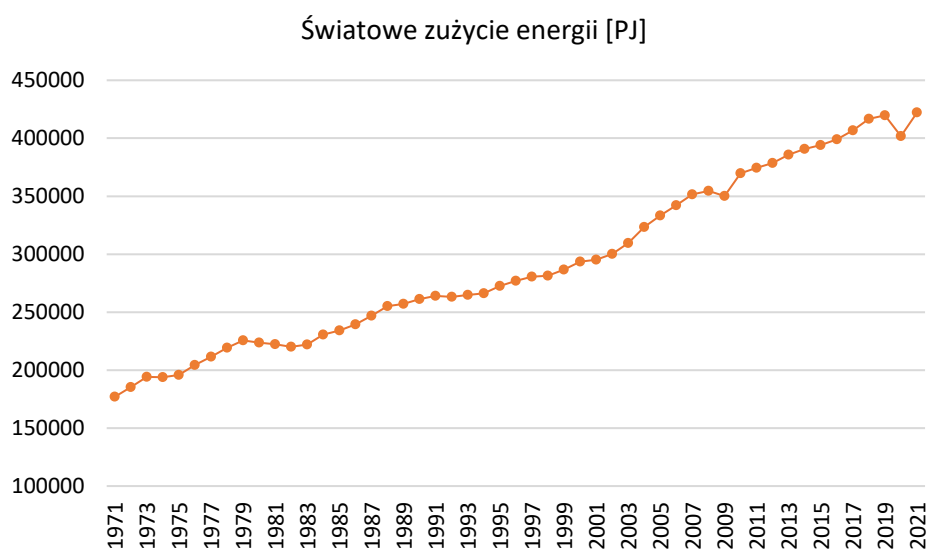
## 2.3 Efektywność energetyczna

Kluczowym zagadnieniem w kontekście optymalizacji zużycia energii jest efektywność energetyczna. Jej poprawa jest celem wielu polityk międzynarodowych, krajowych i lokalnych, m.in. polityki Unii Europejskiej, realizowanej poprzez szereg dyrektyw oraz polityki energetycznej Polski, w której jest kluczowym kierunkiem (Polityka energetyczna Polski do 2040 r., 2021). Obniżenie zużycia energii w poszczególnych sektorach gospodarki jest więc jednym z najbardziej istotnych podejmowanych obecnie działań.

### 2.3.1 Zużycie energii na świecie

Gwałtownie rosnące zużycie energii na świecie wzbudza obawy dotyczące trudności z zaopatrzeniem, wyczerpywaniem się zasobów energetycznych i poważnym wpływem na środowisko poprzez zubożenie warstwy ozonowej, globalne ocieplenie oraz zmiany klimatyczne. Globalne zużycie energii jest stale monitorowane przez wiele organizacji międzynarodowych, między innymi przez Międzynarodową Agencję Energetyczną – IEA (*International Energy Agency*). Została ona założona w 1974 w trakcie kryzysu naftowego przez kraje należące do OECD (Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju). Jednym z podstawowych celów IEA jest zapobieganie przerwom w dostawach ropy naftowej, ale jest także źródłem informacji statystycznych dotyczących międzynarodowego rynku energetycznego. Obecni państwami członkowskimi są prawie wszystkie państwa UE, w tym Polska, jak również Australia, Nowa Zelandia, Korea Południowa, Japonia, Norwegia, Szwajcaria, Turcja, Wielka Brytania, Meksyk, Stany Zjednoczone i Kanada. Dane gromadzone i przetwarzane są przy współpracy z wieloma organizacjami międzynarodowymi m.in. z Europejskim Urzędem Statystycznym – EUROSTAT.

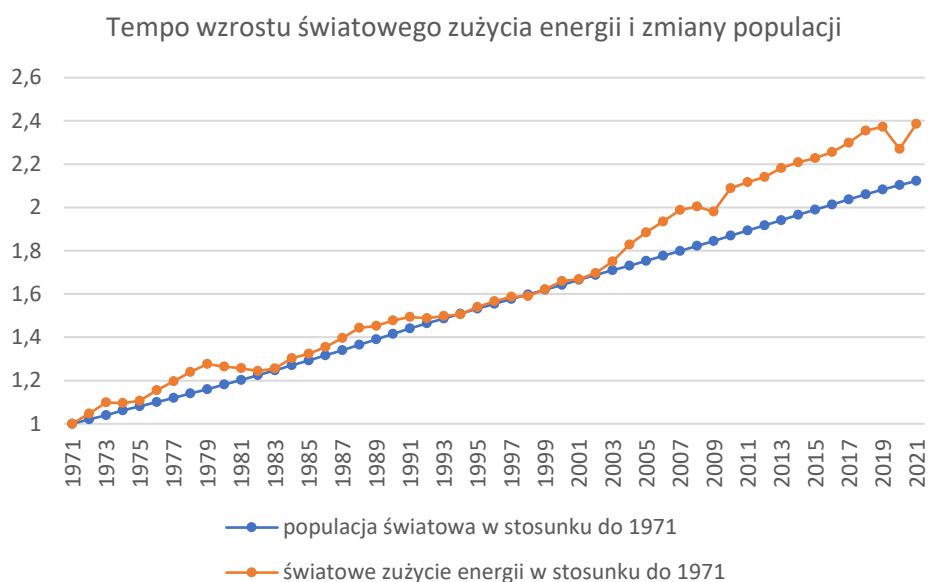
W ciągu ostatnich 50 lat globalne zużycie energii w ujęciu rocznym wzrosło ponad dwukrotnie (z 176913 PJ do 422118 PJ). Na wykresie poniżej (ilustracja 3) można wyraźnie zaobserwować stałą tendencję wzrostową z lokalnymi okresami spowolnień, które spowodowane były kryzysami naftowymi w latach 70. i 80. kryzysem gospodarczym z lat 2008-2009 oraz pandemią COVID-19. Widoczne jest także wyraźne przyspieszenie wzrostu po roku 2000.



Ilustracja 3. Światowe zużycie energii [PJ].

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA)

W zestawieniu konsumpcji energii z przyrostem światowej populacji, jako punkt wyjściowy przyjmując rok 1971, należy zauważyć, że podczas gdy wzrost liczby ludności na świecie ma charakter liniowy, zużycie energii per capita w ostatnich latach rośnie szybciej (ilustracja 4). Liczba ludności od roku 1971 wzrosła o około 70%, podczas gdy wzrost zużycia to prawie 140%. Tutaj ponownie widać wyraźne oderwanie tendencji na początku lat 2000, co jest odzwierciedleniem wzrostu tempa rozwoju gospodarczego krajów rozwijających się, takich jak Chiny i Indie (Rosicki, 2010). Dalsza analiza wskazuje także, że w ostatnich latach tendencja zaczyna nieco zwalniać, jednak nadal rośnie szybciej niż populacja.



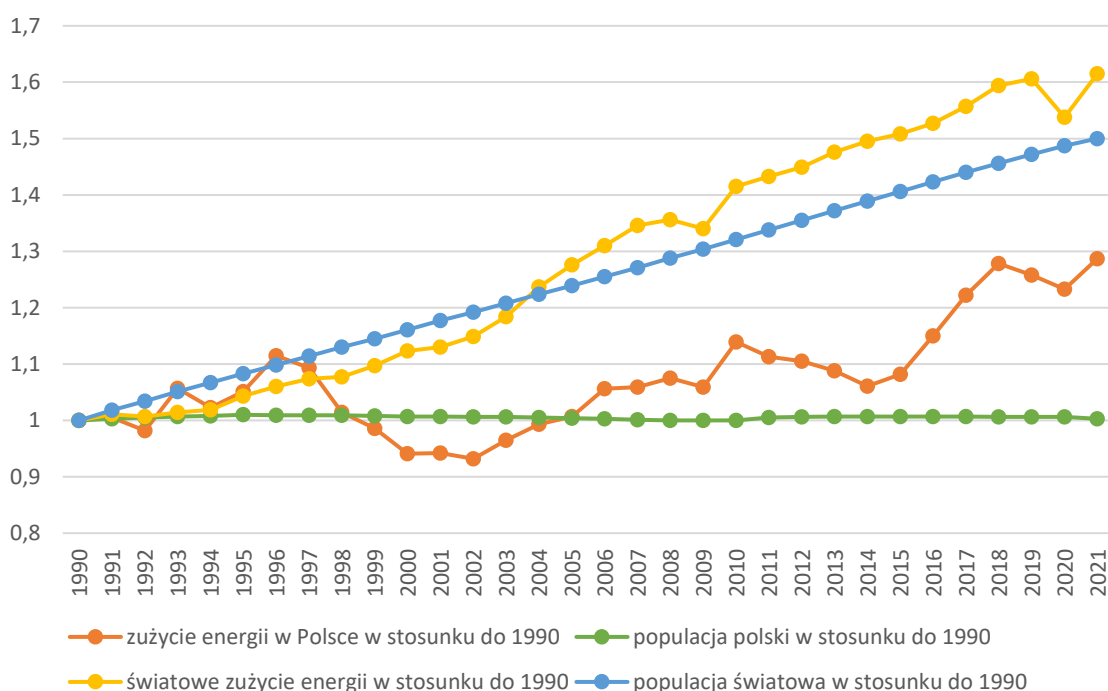
Ilustracja 4. Tempo wzrostu światowego zużycia energii i zmiany populacji.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) i Organizacji Narodów Zjednoczonych (UN)

W przypadku posłużenia się danymi z roku 1990 jako referencyjnymi (ilustracja 5) jeszcze wyraźniej widać moment, w którym tempo wzrostu zapotrzebowania na energię przewyższyło tempo wzrostu ludności. Inaczej wygląda analiza danych dotyczących jedynie Polski. Przede wszystkim, liczba mieszkańców pozostaje na relatywnie stałym poziomie. Oznacza to, że wszelkie zmiany nie są związane ze wzrostem liczby ludności, a raczej z czynnikami gospodarczymi i strukturalnymi. Po roku 1989 w Polsce nastąpiła transformacja ustrojowa i przejście od gospodarki centralnie planowanej do rynkowej. Spadek w połowie lat 90. odzwierciedla restrukturyzację przemysłu i zmniejszenie energochłonności w wyniku zamknięcia lub modernizacji wielu przestarzałych zakładów przemysłowych oraz przestawienia się na bardziej efektywne technologie. W latach tych wprowadzano reformy mające na celu poprawę efektywności energetycznej i ograniczenie marnotrawstwa energii. Na początku XIX w. nastąpiła stabilizacja w sektorze energetycznym oraz szybki rozwój gospodarczy związany ze wstąpieniem Polski do Unii Europejskiej w 2004 r. Warto jednak zauważyć, że poziom zużycia energii waha się i nie rośnie w sposób liniowy. Najbardziej dynamiczny wzrost można zauważyć od roku 2015, co sugeruje intensyfikację działalności gospodarczej i wzrost zapotrzebowania na energię.



Tempo wzrostu zużycia energii i zmiany populacji na świecie i w Polsce

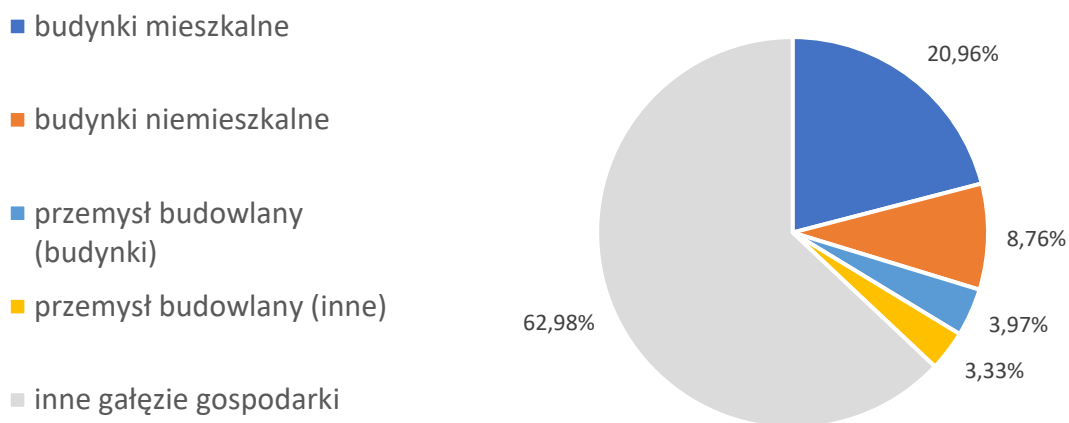


Ilustracja 5. Zużycie energii [PJ] i zmiana populacji w Polsce i na świecie w stosunku do 1990.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) i Organizacji Narodów Zjednoczonych (UN)

Ze zgromadzonych w roku 2022 danych wynika, że obecnie budynki i ich wznoszenie globalnie zużywają ok. 37% całej energii, wobec czego jest to jeden z najbardziej kluczowych sektorów gospodarki w ujęciu energetycznym (ilustracja 6). Drugi pod względem energochłonności jest transport (32,3%). Wysoki udział budynków mieszkalnych podkreśla potrzebę inwestowania w efektywność energetyczną w tym obszarze, podczas gdy mniejszy udział budynków niemieszkalnych i przemysłu budowlanego wskazuje na relatywnie mniejsze, ale wciąż istotne, możliwości oszczędności energii.

Globalne zużycie energii w budynkach na tle innych sektorów w roku 2022



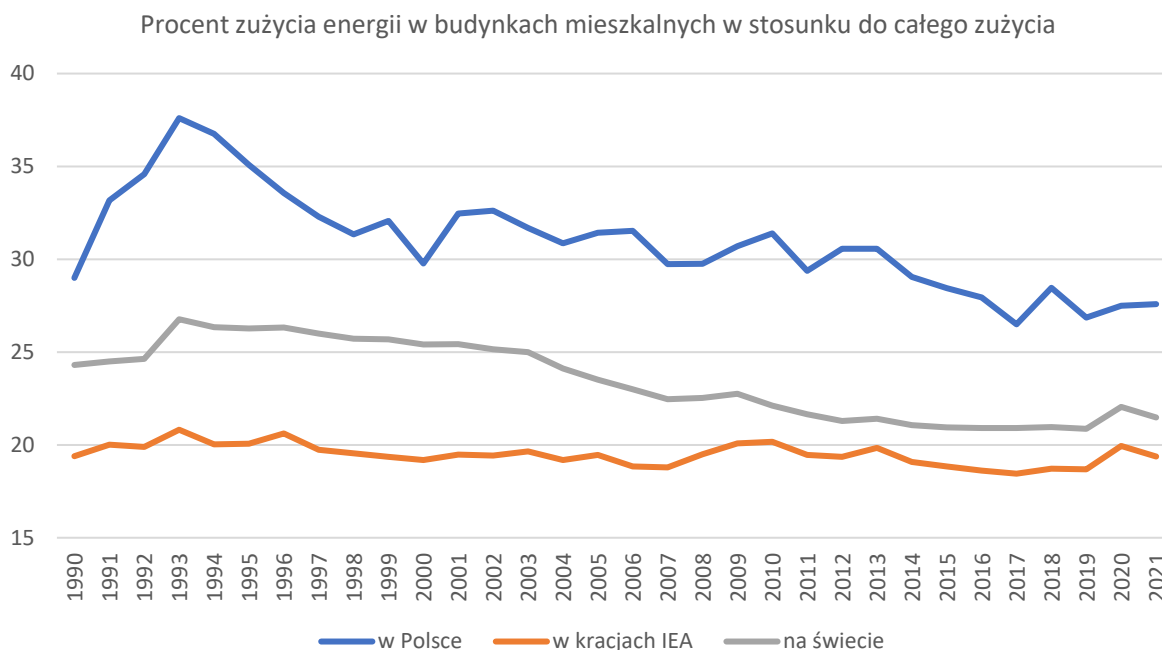
\*energia ukazana jako przemysł budowlany (budynki i inne) odnosi się do energii potrzebnej na cele wznoszenia nowych budynków i infrastruktury

Ilustracja 6. Globalne zużycie energii w budynkach na tle innych sektorów w 2022 roku.

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/final-energy-consumption-of-buildings-relative-to-other-sectors-2022>

Wykres (ilustracja 7) przedstawia procentowy udział zużycia energii w budynkach mieszkalnych w Polsce, w krajach członkowskich Międzynarodowej Agencji Energetycznej IEA oraz globalnie, na przestrzeni lat 1990–2021. W Polsce procentowy udział zużycia energii w budynkach mieszkalnych był najwyższy na początku lat 90., osiągając wartość blisko 38% w 1991 roku. Od tego momentu widoczny jest systematyczny spadek udziału, który stabilizuje się na poziomie około 25-27% w ostatnich latach. Ten spadek może być wynikiem poprawy efektywności energetycznej w sektorze mieszkaniowym, restrukturyzacji gospodarki, a także wzrostu zapotrzebowania na energię w innych sektorach gospodarki, co zmniejsza relatywny udział sektora mieszkalnego.

Światowy udział zużycia energii w budynkach mieszkalnych pozostaje stabilny na poziomie około 25% od 1990 roku, z lekką tendencją spadkową w latach 2000-2020. Stabilność tej wartości może sugerować, że globalnie sektor mieszkalny utrzymuje swoje relatywne zużycie energii na podobnym poziomie, co może wynikać z równoważenia wzrostu liczby ludności i efektywności energetycznej. W krajach IEA procentowy udział zużycia energii w budynkach mieszkalnych utrzymuje się na poziomie około 20%, z niewielkimi wahaniami w czasie. Ten niższy procentowy udział w porównaniu do Polski i średniej światowej może być wynikiem wyższej efektywności energetycznej w krajach członkowskich IEA, gdzie większy nacisk kładzie się na oszczędność energii w budynkach oraz większy udział innych energochłonnych sektorów gospodarki. Globalnie oraz w krajach IEA udział ten pozostaje stabilny, co sugeruje, że zmiany w strukturze zużycia energii są tam mniej dynamiczne.



Ilustracja 7. Zużycie energii w budynkach mieszkalnych w Polsce, krajach członkowskich Międzynarodowej Agencji Energetycznej oraz globalnie.

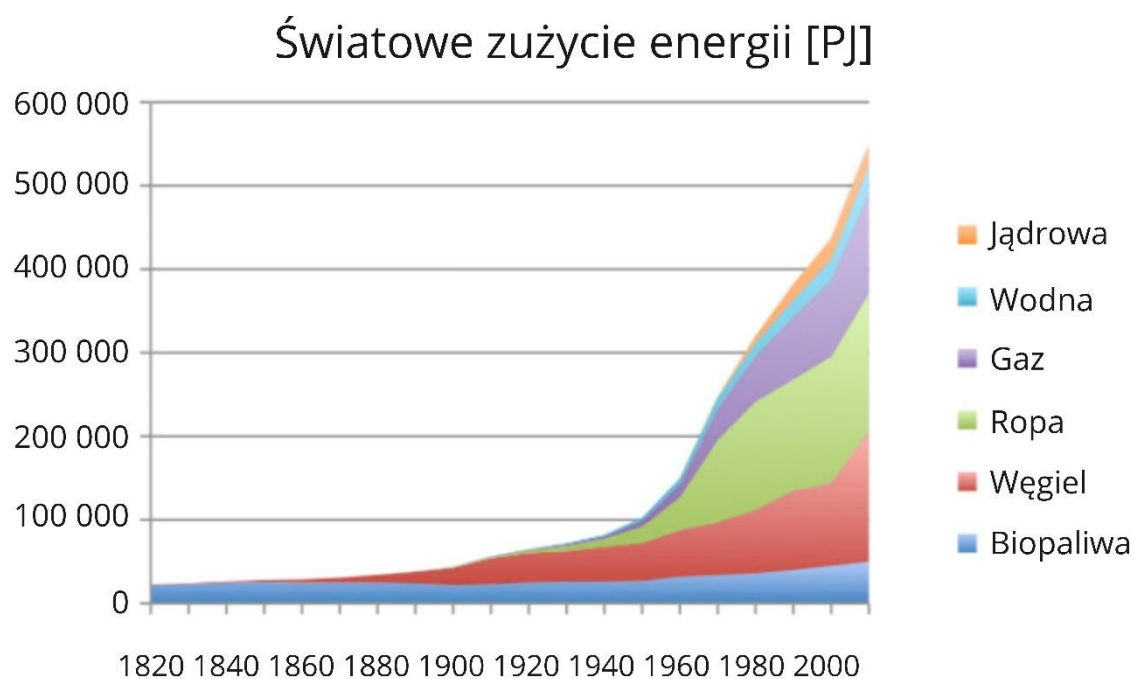
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA)

W raporcie dotyczącym roli budynków IEA przewiduje, że budynki odegrają centralną rolę w transformacji energetycznej. W scenariuszu szybszej transformacji emisje CO<sub>2</sub> z paliw spalanych bezpośrednio w budynkach zmniejszą się o prawie 75% do 2050 roku. Osiągnięte to zostanie dzięki niemal całkowitemu wyeliminowaniu węgla, 85% redukcji zużycia ropy naftowej i 50% spadku zapotrzebowania na gaz ziemny. Udział energii elektrycznej w budynkach wzrośnie z 33% w 2017 do prawie 55% w 2050 roku, a związane z budynkami emisje spadną o około 6% rocznie. Wiele opłacalnych technologii przynosi średnie oszczędności energii na poziomie 500 milionów ton ekwiwalentu ropy naftowej [Mtoe] rocznie w sektorze budownictwa na całym świecie w latach 2020–2050. Budowa budynków o wysokiej wydajności i modernizacje energetyczne zmniejszą zużycie energii w tym sektorze o prawie 30% do 2050 roku, mimo że powierzchnia użytkowa globalnie się podwoi (IEA, 2019b).

### 2.3.2 Przyczyny wzrostu konsumpcji energii na świecie

Efektywne zarządzanie i wykorzystywanie energii to jedno z podstawowych wyzwań stojących przed współczesnym budownictwem. Jak wspomniano we wstępie, początki tego zjawiska można zaobserwować w latach 70 XX w. Warto jednak przeanalizować zagadnienie od wcześniejszych czasów.

W początkowych okresach ludzkiego osadnictwa, budynki były zazwyczaj ograniczone do prostych konstrukcji, które wymagały niewielkiej ilości energii na ogrzewanie i były w głównej mierze uzależnione od dostępu promieni słonecznych, które były także jedynym źródłem światła. W miarę upływu czasu i postępu technologicznego, ludzie wprowadzali nowe rozwiązania, takie jak piece opalane drewnem, które zwiększały wygodę i komfort mieszkańców. Zapotrzebowanie na energię w gruncie rzeczy nie zmieniało się gwałtownie przez setki lat, gdyż jedynym jej wykorzystaniem było dostarczanie ciepła realizowane poprzez spalanie paliw i biopaliw, głównie drewna (ilustracja 9)

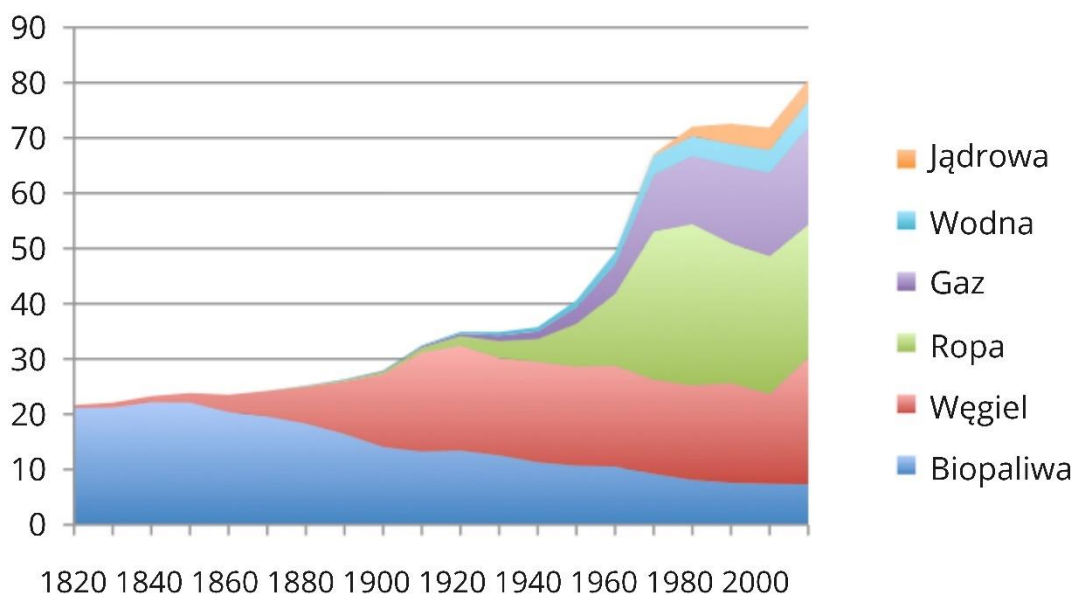


Ilustracja 8. Światowe zużycie energii według źródła.  
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Tverberg,2012)

Analizując wykres (ilustracja 10) do końca XIX w. zużycie energii na mieszkańca nie wzrosło zbyt wiele z dodaniem energii z węgla, co sugeruje, że wczesne wykorzystanie węgla głównie rekompensowało inne zastosowania paliw lub pozwalało na utrzymywanie większych rodzin.

Wraz z wynalezieniem elektryczności, pojawiła się kolejna forma instalacji do zasilania – oświetlenie. Dzięki postępowi technologicznemu zaczęto używać również urządzeń gospodarstwa domowego i innych elektrycznych udogodnień. Masowa elektryfikacja w latach 80. XIX w. Stanach Zjednoczonych a później i innych krajach doprowadziła do pierwszego skoku zużycia energii na mieszkańca, który został zahamowany wyraźnie w okresie I i II wojny światowej.

## Światowe zużycie energii na osobę [GJ]

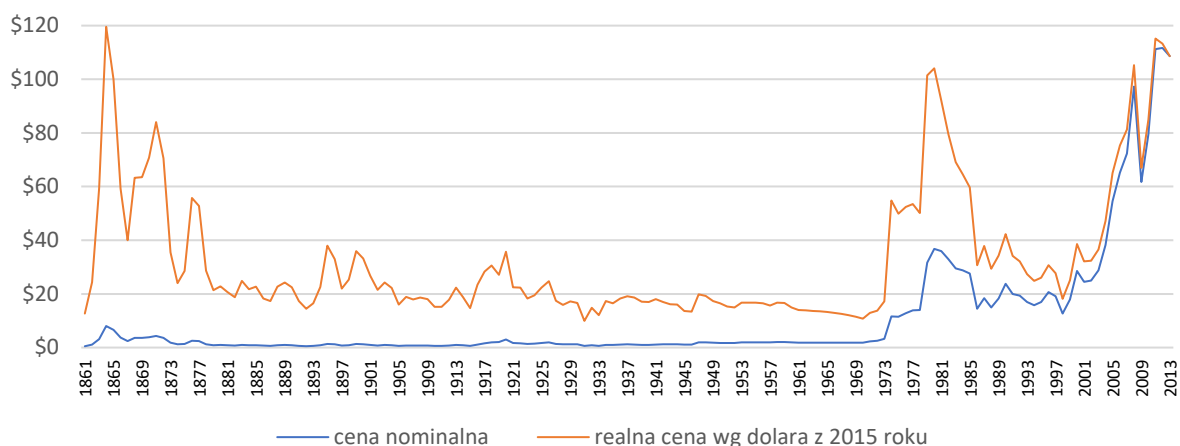


Ilustracja 9. Światowe zużycie energii na mieszkańca, obliczone przez podzielenie światowego zużycia energii zobrazowanego na ilustracji 9 przez szacunkową liczbę ludności.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Tverberg, 2012)

W okresie powojennym nastąpił prawdziwy boom w zakresie zużycia energii. Taki stan rzeczy spowodowany był przede wszystkim dwoma czynnikami- dążeniem do odbudowania strat poniesionych w trakcie dwóch wojen światowych i gwałtownym wzrostem przemysłu naftowego, który zdefiniował kształt ówczesnej energetyki, a ropa naftowa pozostaje do dziś paliwem kopalnym z największym udziałem w konsumpcji. Trend wzrostowy postępował bez przeszkód aż do lat 70. XX wieku, powodując podwojenie zużywanej energii per capita w porównaniu do okresu II wojny światowej. Ważnym czynnikiem powstrzymującym tę tendencję był kryzys naftowy, który rozpoczął się w roku 1973, obejmując swoim zasięgiem wszystkie wysoko rozwinięte kraje oraz sektory gospodarki ściśle uzależnione od ropy. Wydarzenie to stanowiło punkt zwrotny w globalnym kontekście energetycznym i gospodarczym. Przełomowy charakter kryzysu naftowego polegał na tym, że stał się on wyraźnym sygnałem dla całego świata, że ludzka egzystencja jest w dużej mierze uzależniona od nieodnawialnych źródeł energii, zwłaszcza ropy naftowej. Skala i zasięgiem objął on niemal wszystkie dziedziny gospodarki światowej, od przemysłu po transport, od produkcji energii elektrycznej po globalne łańcuchy dostaw.

Rozpoczęcie kryzysu można przypisać szeregowi zdarzeń, a w szczególności embargu na eksport ropy naftowej przez państwa OAPEK (Organizacja Arabskich Krajów Eksportujących Ropę Naftową) oraz wybuchowi wojny między Izraelem a Egiptem, zwanej wojną Jom Kipur. W trakcie jej trwania arabskie kraje należące do OPEC (Organizacja Krajów Eksportujących Ropę Naftową) wstrzymały handel z krajami popierającymi Izrael w tym konflikcie, czyli szeroko pojętymi krajami zachodu. To embargo połączone z faktem, że w okresie poprzedzającym wojnę produkcja ropy naftowej ledwo nadążała za popytem spowodowało gigantyczny wzrost cen ropy- cena baryłki wzrosła w krótkim czasie o 600% i wyniosła 35 dolarów. Dla porównania w roku 1970 cena wynosiła ok. 2 dolary za baryłkę (ilustracja 11). Zmiany te dotknęły kraje zależne od dostaw ropy arabskiej, takie jak USA, Japonia i państwa Europy Zachodniej, jednocześnie kończąc okres beztroskiej konsumpcji taniej ropy naftowej, która była strategicznym surowcem dostępnym za niską cenę. Ten szok, wywołany nagłym wzrostem cen, skłonił rządzących w wielu krajach do wprowadzenia daleko idących zmian w swojej polityce energetycznej.



Ilustracja 10. Cena baryłki ropy naftowej w dolarach od 1861.

Źródło: opracowanie własne na podstawie <http://chartsbin.com/view/oau>

Wydarzenia te nie były jednak odizolowanym przypadkiem. W kolejnych latach następowały kolejne kryzysy. Kształtowanie polityka na Bliskim Wschodzie zyskiwała coraz większą sprawczość w dziedzinie światowej gospodarki. Rewolucja irańska doprowadziła do drugiego kryzysu w latach 1979-1982. W efekcie tego wydarzenia, cena ropy naftowej wzrosła do 30 dolarów za baryłkę w roku 1980. Jednak w kolejnych latach krajom Zachodu udało się zredukować swoją zależność od dostaw ropy z krajów OPEC, głównie dzięki eksploatacji bogatych złóż w Morzu Północnym i na Alasce. Dywersyfikacja dostaw odebrała krajom OPEC zdolność narzucania światowych cen ropy, ale kryzys naftowy dobitnie ujawnił wrażliwość Zachodu na dostawy energii oraz jego ekonomiczną niestabilność. Wzrost cen przyczynił się do znacznego wzbogacenia się państw posiadających duże zasoby ropy.

Kryzysy naftowe miały bezpośredni wpływ na światowy system walutowy i spowodowały kryzys gospodarczy, który łączył recesję z inflacją. Ceny ropy naftowej nierozdzielnie połączyły się z globalną sytuacją geopolityczną, stając się jednym z najważniejszych wskaźników ekonomicznych na świecie.

W 1990 roku, w trakcie wojny w Zatoce Perskiej, cena ropy znów znacząco wzrosła, osiągając 45 dolarów za baryłkę. W latach 1998-1999 ceny ropy spadły do kilkunastu dolarów za baryłkę, ale od tego czasu zaczęły rosnąć. W październiku 2004 roku cena przekroczyła 50 dolarów za baryłkę, a huragan Katrina 29 sierpnia 2005 roku doprowadził do osiągnięcia rekordowej ceny ropy na poziomie 70,85 dolara za baryłkę. W lipcu 2006 roku cena sięgnęła kolejnych rekordowych poziomów, przekraczając 75 dolarów za baryłkę. 2 stycznia 2008 roku na giełdzie towarowej NYMEX w Nowym Jorku cena ropy osiągnęła poziom 100 dolarów za baryłkę. Najwyższą cenę ropy naftowej w historii, 147,16 dolara za baryłkę, odnotowano 11 lipca 2008 roku.

Kryzysy energetyczne zmusiły do poszukiwań nowych źródeł oraz inwestycji w alternatywne źródła energii, takie jak energia jądrowa czy niekonwencjonalne źródła energii. Doprowadziły również do rozszerzenia debaty publicznej na tematy energetyczne i znacznej popularyzacji tematu. Jedno z podejść dążących do rozwiązania kryzysu energetycznego jest zwiększanie efektywności zamiast zwiększania produkcji energii. Za jednego z twórców tego podejścia uważa się fizyka Amory'ego Lovinsa, który w 1976 stworzył termin "miękką ścieżka energetyczna", aby opisać wizję alternatywnej przyszłości, w której efektywność energetyczna oraz zrównoważone odnawialne źródła energii stopniowo zastępują scentralizowany system energetyczny oparty głównie na paliwach kopalnych i energii jądrowej (Lovins, 1977).

### 2.3.3 Przyczyny wzrostu konsumpcji energii w sektorze budowlanym - nowe technologie, pojawienie się instalacji

Światowa tendencja XX w. do zwiększania zużycia energii miała również odzwierciedlenie w przemyśle budowlanym i użytkowaniu budynków. Elektryfikacja z powodzeniem obejmowała coraz większe połacie zamieszkałych terenów, co przekładało się na popularyzację urządzeń AGD i doprowadziło do wytworzenia standardu współczesnego mieszkania wyposażonego w lodówkę, pralkę, kuchenkę, itd., oraz uzbrojonego w instalacje – zestawy urządzeń służących do przesyłania i dystrybucji mediów, takich jak – zasilanie w wodę, prąd elektryczny, kanalizacja sanitarna i deszczowa.

Wprowadzono również systemy rozprowadzania ciepła za pomocą czynnika grzewczego, zastępując tradycyjne pojedyncze źródła ciepła, takie jak kominek czy piec. Idea centralnego ogrzewania nie była w XX wieku nowością, ponieważ podobne rozwiązania istniały już w starożytności, np. Hypocaustum używane od IV wieku p.n.e. Samo wynalezienie grzejnika datuje się na połowę XIX wieku (Górka, 2000).



Zdjęcie 1 Rzymski system centralnego ogrzewania – Hypocaustum w termach Konstantyna. Autor: Jerry Everard.

Źródło: [https://thefogwatch.com/wp-content/uploads/2015/09/MG\\_2583.jpg](https://thefogwatch.com/wp-content/uploads/2015/09/MG_2583.jpg)

W niektórych miejscach na świecie powstawały instalacje centralnego ogrzewania obejmujące całe dzielnice bądź miasta jak np. w USA New York Steam Company rozpoczęła świadczenie usług na dolnym Manhattanie 3 marca 1882 r. i po fuzji z Consolidated Edison 8 marca 1954 r. działa do dzisiaj i obsługuje największy komercyjny system parowy na świecie (większy niż dziewięć kolejnych razem wziętych). Jednak dopiero w latach powojennych centralne ogrzewanie na bazie kotłów na paliwo stałe (węgiel, drewno) oraz nowe formy ogrzewania gazowego i olejowego stały się standardem w budynkach, do którego dążyły państwa rozwinięte i rozwijające się.

Kolejnymi składowymi instalacji w budynkach jest wentylacja mechaniczna i klimatyzacja. Podobnie jak z centralnym ogrzewaniem, pomimo pionierskich zastosowań w XIX w. i protoplastach datowanych na czasy starożytne rozwój technologii klimatyzacji przyspieszył w pierwszej połowie XX wieku. W 1902 roku Willis Haviland Carrier opatentował pierwszy system klimatyzacji, który był używany w przemyśle drukarskim. W latach 20. pojawiły się pierwsze domowe systemy klimatyzacyjne, choć były one drogie i niezbyt powszechne. Klimatyzacja była bardziej popularna w miejscach użyteczności publicznej takich jak: kina, hotele i sklepy. Innowacje w drugiej połowie XX wieku pozwoliły na znacznie bardziej powszechne wykorzystanie klimatyzatorów. W 1945 roku Robert Sherman z Lynn w stanie Massachusetts wynalazł przenośny klimatyzator okienny, który chłodził, ogrzewał, nawilżał, osuszał i filtrował powietrze. Dziś klimatyzacja jest standardowym wyposażeniem wielu budynków mieszkalnych i komercyjnych na całym świecie i stanowi wraz z centralnym ogrzewaniem i wentylacją główny środek pozwalający na osiągnięcie komfortu cieplnego.

Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) rzuca światło na niektóre martwe punkty polityki energetycznej- kwestie, którym nie poświęca się zbyt wiele uwagi, a które mają kluczowe znaczenie. Takim martwym punktem jest wzrost globalnego zapotrzebowania na chłodzenie pomieszczeń: jest to

jedna z najbardziej krytycznych, ale często pomijanych kwestii energetycznych naszych czasów. Jeśli nie zostanie to powstrzymane, zapotrzebowanie na energię z klimatyzatorów wzrośnie ponad trzykrotnie do 2050 r. i będzie równe dzisiejszemu zapotrzebowaniu Chin na energię elektryczną (IEA, 2023a).

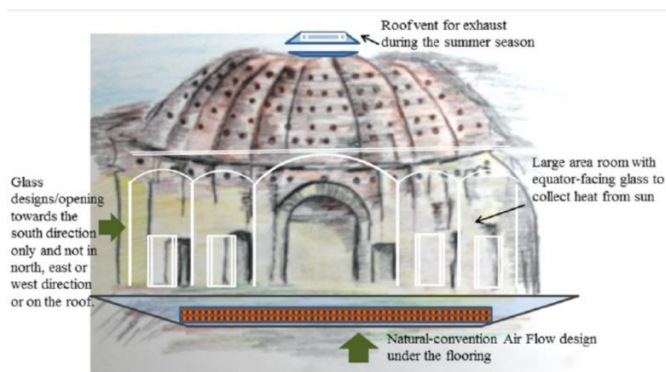
## 2.4 Geneza optymalizacji energetycznej

Aby opracować nowe technologie i strategie poprawy efektywności energetycznej w budynkach, należy poznać ich ewolucję na przestrzeni dziejów. Nowe koncepcje i rozwiązania mające na celu zmniejszenie zużycia energii powinny brać pod uwagę wcześniejsze doświadczenia i napotkane bariery energooszczędnych budynków. Efektywność energetyczna budynku jest związana głównie z dwoma komponentami: właściwościami pasywnymi - nadawanymi przez izolację termiczną, wychwytywane promieniowanie słoneczne, naturalną wentylację, zacienienie; oraz właściwościami aktywnymi nadawanymi przez urządzenia do wychwytywania, konwersji i wykorzystania energii (energia odnawialna). W związku z tym należy wyjaśnić trendy w projektowaniu i jego użyteczność jako komfort i koszt dla ludzi, którzy z niego korzystają.

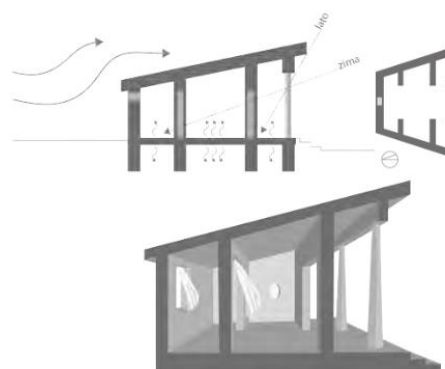
Od czasów prehistorycznych ludzie znajdowali sposoby, aby wykorzystać naturalne procesy fizyczne do poprawy warunków życiowych w swoich siedzibach. Pomimo iż termin efektywności energetycznej został opracowany w wieku XIX, budowniczowie w mniej lub bardziej instynktowny sposób stosowali dobrą praktykę, przekazywaną z pokolenia na pokolenie.

Każda epoka wprowadzała nowe innowacje lub doskonaliła istniejące technologie, ale fascynującym jest fakt, że współczesne systemy oparte na odnawialnych źródłach energii mają swoje korzenie w starożytnych rozwiązaniach. Odkrycia wskazują, że już około 5500 r. p.n.e. w rejonie Karpat ludzie budowali domy częściowo zagłębione w ziemi, co pozwalało na utrzymanie stabilnej temperatury wewnątrz. Rozwój technologii grzewczych i chłodzących na przestrzeni wieków pokazuje, jak innowacyjne podejście do architektury i inżynierii pozwalało ludziom na dostosowanie się do warunków klimatycznych. Właściwości termiczne gruntu były później wykorzystywane przez Kapadoczczyków, społeczności esseńskie na Bliskim Wschodzie oraz rdzennych Amerykanów, co pokazuje, że nawet bez zaawansowanej technologii nasi przodkowie potrafili efektywnie zarządzać temperaturą w budynkach. Przykładem rozwoju tych koncepcji jest perska "badghir" (wieża wiatrowa), która korzystała z energii wiatru i gruntu do zapewnienia komfortu cieplnego. Te starożytne rozwiązania były nie tylko funkcjonalne, ale również zrównoważone, korzystając z naturalnych zasobów dostępnych na miejscu. W Egipcie stosowano podobne rozwiązanie w postaci "malqaf" (łapaczy wiatru), które opierały się wyłącznie na wykorzystaniu energii wiatru. Współczesne systemy odnawialnych źródeł energii czerpią z tych dawnych mądrości, udoskonalając je z pomocą nowoczesnej technologii. Z kolei Egipcjanie wprowadzili grube ceglane ściany i płytki, które nie tylko poprawiały komfort cieplny, ale także miały właściwości akustyczne (Ionescu i in., 2015).

Grecy i Rzymianie rozwijali te pomysły, tworząc ściany szczelinowe oraz wspomniane wcześniej Hypocaustum. Obserwując ewolucję tych technologii, możemy lepiej zrozumieć, jak istotne jest wykorzystanie zasobów naturalnych w sposób, który minimalizuje nasz wpływ na środowisko, jednocześnie zapewniając komfort i bezpieczeństwo mieszkańcom. Okna pokryte miką były kolejnym innowacyjnym sposobem na kontrolowanie temperatury wewnętrznej poprzez blokowanie promieniowania słonecznego, co w Imperium Rzymskim zaowocowało powstaniem specjalnych pomieszczeń znanych jako "Heliocaminus". Były to przestrzenie o koncentrycznym kształcie i miało za zadanie akumulowanie ciepła słonecznego. Ciepłe powietrze było rozprowadzane przewodami hypokaustycznymi do sąsiednich pomieszczeń.



Ilustracja 11 Heliocaminus – pomieszczenie akumulujące ciepło słoneczne  
Źródło: (Mahato i in., 2015)



Ilustracja 12 Schemat działania antycznego budynku solarnego - tzw. Domu Sokratesa.  
Źródło: (Bać, 2020b)

W czasach starożytnych nie sposób pominąć greckich i rzymskich rezydencji atrialnych oraz często przywoływanego w literaturze przedmiotu Domu Sokratesa (Bać, 2020b). Okres ten przyniósł prawdziwe korzyści sektorowi budynków, natomiast kolejny wielki krok w zakresie budownictwa energooszczędnego nastąpił dopiero w wieku XIX. Naukowcy nie tylko zmaterializowali innowacje techniczne, ale także stworzyli fundamentalną bazę naukową poprzez różne traktaty, książki, rozprawy itp. W ostatniej dekadzie XIX wieku prace naukowe w dziedzinie budownictwa obejmowały badania efektu izolacji termicznej w dziedzinie wymiany ciepła, powstawania i transportu wilgoci w ścianach, wielowarstwowych konfiguracji okien itp. W tym czasie powszechną metodą stało się wstępne podgrzewanie powietrza w pomieszczeniu usługowym znajdującym się w piwnicy. W ten sposób proces wentylacji był inicjowany przez konwekcyjną cyrkulację powietrza w kierunku górnych pięter.

W latach 40. XX wieku, w Stanach Zjednoczonych rozpoczęto pionierskie eksperymenty z budownictwem energooszczędnym, które miały na celu odpowiedź na wyzwania związane z rosnącymi kosztami energii, niedoborami surowców oraz potrzebą oszczędności. Te eksperymenty stały się fundamentalnym elementem kształtowania nowoczesnej architektury mieszkaniowej, szczególnie w kontekście dynamicznego rozwoju przedmieść po II wojnie światowej. Jednym z najbardziej przełomowych podejść było projektowanie domów z pasywnym ogrzewaniem słonecznym. Koncepcja ta opierała się na wykorzystaniu naturalnej energii słonecznej do ogrzewania budynków poprzez strategiczne umiejscowienie przeszkleń i zastosowanie odpowiednich materiałów. Wiodącą rolę w tych innowacjach odegrały takie technologie jak Thermopane – izolowane panele szklane, które pozwalały na maksymalizację zatrzymywania ciepła słonecznego wewnątrz budynków. Były one protoplastą współczesnych okien z szybami zespolonymi. Domy te charakteryzowały się długimi, wąskimi bryłami z dużymi, południowo zorientowanymi oknami, które umożliwiały głęboką penetrację światła słonecznego do wnętrza budynku. Przykładem takich innowacji był "House of Tomorrow" Freda Kecka (zdjęcie 3), który zadebiutował w 1939 roku i stał się wzorem dla przyszłych projektów domów solarnych (Barber, 2014). Równolegle eksperymenty z energią słoneczną prowadzono na MIT wraz z utworzeniem Funduszu Energetyki Słonecznej. Badania pod przewodnictwem Hoyta C. Hottela doprowadziły do budowy budynku 34, który testował systemy ogrzewania słonecznego. Choć system był skuteczny, jego koszty były trzykrotnie wyższe niż tradycyjnych systemów, co ujawniło wyzwania związane z magazynowaniem ciepła i optymalnym kątem kolektora (Barber, 2008).





Zdjęcie 2. Pierwszy dom w USA ogrzewany energią słoneczną - MIT Solar House 1 (1939).  
Źródło: materiały MIT News Office, MIT Museum,  
<https://web.mit.edu/solardecathlon/images/solarhouse1.jpg>



Zdjęcie 3. Dom przyszłości (House of Tomorrow) projektu G.F. Kecka  
Źródło: materiały Chicago History Museum,  
<https://www.indianalandmarks.org/wp-content/uploads/2016/10/House-of-Tomorrow-1933.jpg>

Projektowanie termiczne komponentów i urządzeń, takich jak kolektory słoneczne, było pionierskim rozwiązaniem tych budynków. W następujących latach liczba rozwiązań technicznych została zwiększona i poprawa izolacji termicznej stała się podstawową zasadą w dziedzinie poprawy energooszczędności.

W latach 60. pojawił się entuzjazm związany z przetwarzaniem danych obciążenia cieplnego za pomocą komputera, co stało się bardzo przydatną metodą oceny charakterystyki energetycznej budynków. Jest to czas, w którym metody szacowania obciążenia energetycznego budynków zaczęły być weryfikowane, naukowcy opracowali m.in. metodę stopniodni. Wspomniane prace Ole Fanger'a miały ogromny wkład w usystematyzowanie pojęcia komfortu cieplnego, który jest czynnikiem decydującym o obciążeniu cieplnym.

W historii budownictwa XX wieku pod względem energii wyróżnia się jeszcze trzy kluczowe momenty: lata 70., kiedy kryzys naftowy zintensyfikował poszukiwania sposobów na zwiększenie efektywności energetycznej budynków, promując superizolację, odzysk ciepła, szczelność budynków i wykorzystanie energii słonecznej; budowę pasywnego domu "Kranichstein" w Darmstadt w Niemczech w 1990 roku (zdjęcie 4) oraz założenie Instytutu Passivhaus w 1996 roku; oraz budowę w 1992 roku przez Instytut Fraunhofera domu słonecznego w Freiburgu, zdolnego do produkcji większej ilości energii niż zużywa (Ionescu i in., 2015).

Celem projektu demonstracyjnego pasywnego domu w Darmstadt-Kranichstein było udowodnienie, że przy użyciu dostępnych podówczas technologii można zredukować zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych do jednej trzeciej w porównaniu z podobnymi gospodarstwami, przy jednoczesnym wzroście zużycia gazu do celów grzewczych o mniej niż 15%. Wyniki pomiarów potwierdziły oczekiwania: modelowe gospodarstwo domowe zużywało o 65% mniej energii elektrycznej, 61% mniej energii pierwotnej i generowało o 61% mniej emisji CO<sub>2</sub>.

Oszczędności te osiągnięto dzięki inwestycjom w systemy oszczędzające energię elektryczną, które były testowane w normalnych warunkach użytkowania. Wyniki projektu, w odróżnieniu do wcześniejszych budynków eksperymentalnych miały uniwersalne zastosowanie: pokazują, jak może wyglądać efektywne wykorzystanie energii elektrycznej w każdym gospodarstwie domowym po całkowitej wymianie mniej efektywnych urządzeń na najefektywniejsze dostępne modele na rynku (Feist i Ebel, 1998).



Zdjęcie 4. "Pierwszy dom pasywny" w Darmstadt-Kranichstein, Niemcy.

Źródło: materiały Passive House Institute



Zdjęcie 5. Heliotrope - budynek podążający za słońcem. Proj. Rolf Disch.

Źródło: materiały Rolf Disch

W 1994 r. uruchomiono również pierwszy budynek plusenergetyczny (plusenergiehaus) o nazwie Heliotrope (zdjęcie 5). Dom zbudowany we Fryburgu został zaprojektowany przez architekta Rolfa Discha. Był to pierwszy dom, w którym ilość produkowanej energii była większa niż zużywana. Technologie zastosowane w budynku wykorzystywały energię w całości pochodzącą ze źródeł odnawialnych

Postępy technologiczne, które są również obecne w technice budowlanej, pozwalają na zintegrowanie energooszczędnych idei z projektem budynku w celu poprawy komfortu, efektywności energetycznej, użyteczności, a nawet estetyki. W ostatnich dziesięcioleciach naukowcy zajmujący się projektowaniem domów niskoenergetycznych nieustannie opracowywali rozwiązania i zasady projektowania termicznego. Podczas gdy konkretne opcje i styl mogą się różnić, domy energooszczędne mają pewne podstawowe elementy wspólne, wynikające z ustalonego wzorca projektowania: coraz lepsza izolacja ścian, okien i drzwi, złożoną konfiguracją i szczelność przegród zewnętrznych, wentylację z odzyskiem ciepła, wysokowydajne systemy ogrzewania i chłodzenia, sprzęt solarny i energooszczędne urządzenia.

## 2.5 Komfort cieplny – ograniczenie optymalizacji

Jak wynika z gromadzonych danych, instalacje HVAC mają największy udział w zużyciu energii końcowej w użytkowanych budynkach, z tego powodu zagadnienie regulacji temperatury stanowi jeden z najbardziej istotnych celów optymalizacji zużycia energii, ale również jedno z najważniejszych ograniczeń i uwarunkowań. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie użytkownikom komfortu cieplnego, który jest niezbędnym elementem ogólnej satysfakcji, dobrego samopoczucia i produktywności w środowiskach wewnętrznych. Powszechnie stosowana definicja brzmi: "Komfort cieplny to stan umysłu wyrażający zadowolenie ze środowiska termicznego" (ASHRAE, 2016). Zapewnienie komfortu termicznego użytkowników jest jednym z podstawowych zadań każdego budynku.

Ten stan wynika z harmonijnego zrównoważenia pomiędzy produkcją ciepła wewnętrznego przez organizm poprzez procesy metaboliczne a utratą ciepła z ciała do otoczenia (Fanger, 1970). Niemniej jednak, ze względu na różnice indywidualne wynikające z czynników biologicznych, niemożliwe jest zapewnienie komfortu termicznego wszystkim osobom w danym pomieszczeniu. Podstawowym czynnikiem kształtującym mikroklimat we wnętrzach są procesy wymiany ciepła między ciałem ludzkim a jego otoczeniem. Wynika ona z interakcji wielu czynników, które wpływają na bilans cieplny organizmu człowieka, a jego głównym celem jest utrzymanie stałej temperatury wewnętrznej ciała. Czynniki obejmują temperaturę powietrza, wydatek energetyczny, prędkość powietrza, opór przewodzenia ciepła przez odzież, średnia temperatura promieniowania oraz ciśnienie cząstkowe pary wodnej (Sudoł-Szopińska i Chojnacka, 2007). Wszystkie te elementy są uwzględniane w równaniu bilansu cieplnego stworzonego przez Ole Fagnera w 1970 r.

Głównym celem Fangera było zapewnienie inżynierom zajmującym się ogrzewaniem i klimatyzacją metody przewidywania dla różnych czynności i wyborów odzieży, kombinacji czynników termicznych, które zmaksymalizowałyby komfort termiczny dla danej grupy ludzi. Zwieńczeniem jego przełomowych prac był model PMV (*Predicted Mean Vote*), który od tego czasu stał się jednym ze standardów oceny przewidywanej średniej percepcji termicznej osób przebywających w budynku.

PMV, zgodnie z definicją z 1970 roku, reprezentuje średnie odczucie termiczne w znormalizowanej skali dla dużej grupy osób w różnych zmiennych środowiskowych, poziomach aktywności i wyborze odzieży. Opiera się na równaniu komfortu Fangera, w którym spełnienie równania komfortu jest warunkiem wstępnym optymalnego komfortu termicznego wśród większości osób. Co więcej, PMV odgrywa kluczową rolę w określaniu przewidywanego odsetka niezadowolonych (PPD), oferując wgląd w prawdopodobieństwo niezadowolenia użytkownika z warunków termicznych.

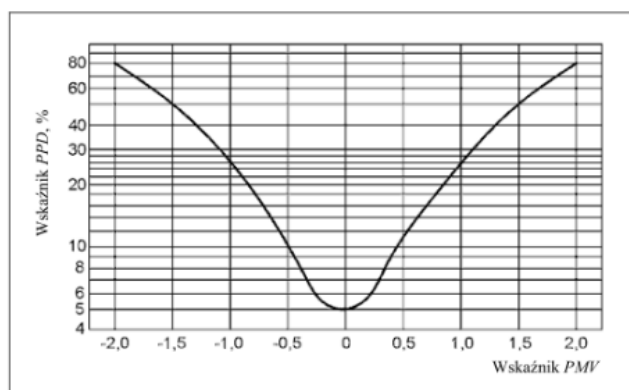
Przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego jest odniesiona do nierówności pomiędzy ciepłem oddawanym przez człowieka i odbieranym przez otaczające go środowisko a optymalną ilością ciepła przekazywaną do otoczenia, która zapewniałaby mu warunki komfortu przy danej aktywności fizycznej. Zakłada się, że wartość  $PMV = 0$  opisuje idealny stan komfortu cieplnego (tabela 1), natomiast dopuszczalny stan komfortu cieplnego określa wartość w granicach  $-0,5 < PMV < +0,5$ ; co oznacza, że odsetek osób niezadowolonych z warunków termicznych (PPD) nie przekroczy 10%. Strefa umiarkowanego ciepła (akceptowanego) środowiska zawiera się w przedziale  $-1,0 < PMV < +1,0$ . Wartości PMV powyżej +2 i poniżej -2 odnoszą się do środowiska wyraźnie nieakceptowanego przez większość przebywających w nim osób. (Lis, 2016).

Tabela 1. Skala zmienności komfortu cieplnego (PMV).

Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 7730, 2006

PMV	ocena komfortu cieplnego
+3	gorąco
+2	ciepło
+1	umiarkowanie ciepło
0	neutralnie
-1	umiarkowanie chłodno
-2	chłodno
-3	zimno

Analityczny związek pomiędzy odsetkiem osób niezadowolonych PPD a PMV przedstawiono na ilustracji 14. Na jej podstawie można stwierdzić, że gdy 90% osób przebywających w pomieszczeniu ocenia środowisko jako komfortowe, dla pozostałych 10% jest ono zimne (5%) lub gorące (5%). (Lis, 2016)



Ilustracja 13 Przewidywany procent niezadowolonych PPD w funkcji przewidywanej oceny średniej komfortu cieplnego PMV.

Źródło: Fanger, 1970

Składowe brane pod uwagę przy wyliczaniu wskaźnika PMV można podzielić na czynniki mikroklimatyczne oraz indywidualne dla każdego użytkownika (Sudoł-Szopińska i Chojnacka, 2007).

#### **Czynniki mikroklimatyczne:**

- temperatura powietrza [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- średnia temperatura promieniowania [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu [Pa],
- prędkość przepływu powietrza [m/s].

#### **Czynniki o charakterze jednostkowym:**

- ilość ciepła wewnętrznego wytwarzanego przez organizm w odniesieniu do jednostki pola powierzchni ciała nieokrytego odzieżą [met],
- opór przewodzenia odzieży [clo].

Zależności te traktowane łącznie wpływają na odczucia cieplne człowieka (Hamdi i in., 1999; Nicol i Humphreys, 1998). Nie wszystkie z nich mają jednak równy wpływ na postrzeganie mikroklimatu wnętrza. W pomieszczeniach z naturalną wentylacją prędkości powietrza są tak niskie, że ich wpływ na komfort cieplny można uznać za nieistotny (Górka, 2000). W typowych polskich mieszkaniach z wentylacją grawitacyjną mamy do czynienia z niewielką i w miarę stałą prędkością ruchu powietrza w ciągu dnia. W budynkach mieszkalnych poddanych termomodernizacji w ciągu dnia wilgotność względna powietrza wykazuje wahania w granicach 10-15%. Temperatura i wilgotność względna powietrza ulegają zwykle w ciągu dnia licznym krótkotrwałym wahaniom związanym z czynnościami eksploatacyjnymi (Lis, 2007). Bernd Glück i Klaus Windich również sugerują, aby zignorować wpływ wilgotności względnej na komfort cieplny, gdyż nawet znaczne jej zmiany mają minimalny wpływ na odczucie ciepła. W rezultacie, na komfort cieplny w pomieszczeniu kluczowy wpływ mają jedynie dwa czynniki środowiskowe: temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania (Glück i Windisch, 1982).

### **2.5.1 Temperatura powietrza**

Przy optymalnych warunkach, temperatura wewnętrzna zdrowego człowieka utrzymuje się stale na poziomie ok.  $37^{\circ}\text{C}$ , przy czym temperatura na powierzchni skóry oscyluje w przedziale  $32\text{--}34^{\circ}\text{C}$ . W przypadku obniżenia temperatury skóry poniżej  $32^{\circ}\text{C}$  odczuwamy zimno, przy przekroczeniu  $37^{\circ}\text{C}$  zaczynamy się pocić w celu oddania ciepła (Nazar i Kozłowski, 1984). Są to wartości, które są zazwyczaj wyższe od temperatury otaczającego powietrza i przegród budowlanych; natomiast to właśnie one decydują o indywidualnym odczuciu ciepła lub zimna, a także o kierunku wymiany ciepła między człowiekiem i jego najbliższym otoczeniem. Ze względu na indywidualne odczucia poziom komfortu termicznego jest rzeczą subiektywną, niemniej można posłużyć się uogólnionymi ramami w kwestii dostosowywania temperatury powietrza w pomieszczeniu z uwzględnieniem stopnia ubrania użytkowników i ich zachowania np. tymi zawartymi w Normie (PN-B-03421, 1978):

- Mała aktywność fizyczna – dla ludzi, wykonujących lekką pracę lub pozostających w stanie spoczynku, temperatura powietrza w strefie przebywania ludzi wynosi:
  - w zimie  $20^{\circ}\text{C} \div 22^{\circ}\text{C}$
  - w lecie  $23^{\circ}\text{C} \div 27^{\circ}\text{C}$
- Średnia aktywność fizyczna – przy średnim tempie metabolizmu (np. praca biurowa) zalecana temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosi odpowiednio:
  - w zimie  $18^{\circ}\text{C} \div 20^{\circ}\text{C}$
  - w lecie  $21^{\circ}\text{C} \div 25^{\circ}\text{C}$
- Duża aktywność fizyczna – przy dużym tempie metabolizmu (np. ciężka praca fizyczna) zalecana temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosi odpowiednio:
  - w zimie  $15^{\circ}\text{C} \div 18^{\circ}\text{C}$
  - w lecie  $18^{\circ}\text{C} \div 23^{\circ}\text{C}$

Warto zauważyć, że kolejnym czynnikiem, który ma wpływ na odczuwanie temperatury przez użytkowników jest pora roku, w której się znajdują.

### 2.5.2 Średnia temperatura promieniowania

Kluczowym czynnikiem wpływającym na odczucie ciepła w ogrzewanym pomieszczeniu jest średnia temperatura promieniowania. Jest to temperatura, która odpowiadałaby jednolitej temperaturze pomieszczenia, w którym osoba wymieniłaby przez promieniowanie taką samą ilość ciepła, jak w rzeczywistości w pomieszczeniu o zróżnicowanej temperaturze. Mówiąc inaczej, jest to średnia ważona temperatur wszystkich odsłoniętych przegród budowlanych w pomieszczeniu. Zasadniczy wpływ na rozkład temperatury wewnętrznych powierzchni przegród budowlanych mają cechy przegród budowlanych oraz rodzaj zastosowanego ogrzewania (Plutecki, 2011). Wpływ temperatury powietrza oraz średniej temperatury promieniowania może być wyrażony także jako temperatura odczuwalna, jako średnia arytmetyczna tych dwóch wartości (Glück, 1993). Znamienny jest fakt, że średnia temperatura promieniowania jest równie ważnym jak temperatura powietrza parametrem komfortu cieplnego. Podczas wymiany ciepła przez promieniowanie w pomieszczeniu zazwyczaj tylko niektóre przegrody biorą w niej aktywny udział. To prowadzi do asymetrii temperatury promieniowania, co mimo utrzymania właściwej temperatury odczuwalnej, uniemożliwia osiągnięcie pełnego komfortu cieplnego (Górka, 2000). Sytuacja taka może prowadzić do odczuwania zimna lub dyskomfortu w określonych częściach ciała, takich jak stopy lub głowa. Pozostałe części ciała mogą jednocześnie doświadczać komfortowych warunków cieplnych w danym pomieszczeniu (Sudoł-Szopińska i Chojnacka, 2007).

Aby zapewnić optymalne warunki komfortu cieplnego, ważne jest, aby asymetria promieniowania cieplnego, czyli różnica w promieniowaniu cieplnym emitowanym przez różne powierzchnie w pomieszczeniu, nie przekraczała 10°C. Ponadto temperatura podłogi powinna utrzymywać się na poziomie 24°C. Niewłaściwie dobrana temperatura podłogi może prowadzić do miejscowego rozszerzenia naczyń krwionośnych w stopach, co może skutkować obrzękami stóp, a nawet zaburzeniami w systemie termoregulacji organizmu, manifestującymi się naprzemiennymi uczuciami zimna i nadmiernym poceniem się (Śliwowski, 1999). Na podstawie przeprowadzonych badań dla grzejnych i chłodzących systemów płaszczyznowych Fanger przedstawił zależność przewidywanego procentu niezadowolonych. Wynika z niego, że człowiekowi najmniej przeszkadza asymetria promieniowania spowodowana przez ściany grzejne. Nawet stosunkowo wysokie temperatury ścian nie pogarszają komfortu cieplnego w pomieszczeniu (Fanger, 1970). Systemy grzewcze z popularnymi grzejnikami płytowymi umożliwiają regulację głównie temperatury powietrza, ponieważ oddają ok. 70% ciepła przez konwekcję (Chrapka, 2010), dlatego systemy ogrzewania płaszczyznowego stanowią uzasadnioną alternatywę, ponieważ w większym stopniu pozwalają kontrolować jednocześnie temperaturę powietrza i przegród budowlanych.

### 2.5.3 Wilgotność względna powietrza

Wilgotność powietrza może być charakteryzowana na różne sposoby i jednym z nich jest używany w określeniu PMV parametr ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu, określany również jako prężność pary wodnej. Jednak najbardziej popularnym sposobem określania wilgotności jest pojęcie wilgotności względnej, czyli procentowego stosunku ciśnienia cząstkowego pary wodnej zawartej w powietrzu do ciśnienia pary nasyconej, która jest wielkością fizyczną przyjmowaną dla poszczególnych temperatur (PN-EN ISO 13788, 2013). Wilgotność względna powietrza ma wpływ na sposób, w jaki organizm ludzki odprowadza ciepło poprzez proces parowania potu. W środowiskach o umiarkowanych warunkach termicznych, takich jak temperatura między 15°C a 27°C, zmiany wilgotności nie są zazwyczaj odczuwane przez ludzi, nawet w stosunkowo szerokim zakresie od 25% do 75% (Śliwowski, 1999). Jednakże, gdy wilgotność względna osiąga wysoki poziom i jest połączona z wysoką temperaturą powietrza, może to prowadzić do uczucia dyskomfortu cieplnego. W takich warunkach, zwykle można złagodzić dyskomfort poprzez nieznaczne obniżenie temperatury (Lis, 2007). Mimo że wilgotność powietrza może mieć ograniczony wpływ na komfort cieplny w środowiskach umiarkowanych, jest to czynnik, który warto uwzględnić, szczególnie w przypadku ekstremalnych warunków wilgotności i temperatury, mogących znacząco wpłynąć na samopoczucie i komfort ludzi w danym otoczeniu.

#### 2.5.4 Prędkość przepływu powietrza

Subiektywna percepcja prędkości poruszającego się powietrza jest uzależniona od kilku czynników, w tym od temperatury wewnątrz pomieszczenia oraz różnicy między temperaturą przepływającego strumienia powietrza a temperaturą otoczenia. W przypadku znacznie niższej temperatury napływającego powietrza lub znacznej prędkości przepływu, możemy odczuć to jako nieprzyjemny przeciąg, co negatywnie wpływa na komfort cieplny. Natomiast ruch powietrza o umiarkowanej prędkości, nie przekraczającej zazwyczaj 0,20 m/s, jest zazwyczaj odbierany jako przyjemny i wspomaga nasze dobre samopoczucie. (Lis, 2007) Warto zaznaczyć, że dla małych prędkości przepływu powietrza, temperatura, przy której osiągamy komfort cieplny, nie jest znacząco zależna od prędkości. Oznacza to, że wzrost prędkości przepływu powietrza może być skompensowany przez zwiększenie temperatury powietrza, aby zachować poziom komfortu termicznego.

#### 2.5.5 Izolacyjność odzieży

Najważniejszą indywidualną składową odczuwania komfortu termicznego jest izolacyjność odzieży każdego z użytkowników. Wpływ na komfort cieplny jest istotnie determinowany przez właściwości izolacyjne odzieży stosowanej w miejscu przebywania, szczególnie odzieży o charakterze ochronnym, jak na przykład odzieży barierowej, która znacząco ogranicza wymianę ciepła między ciałem ludzkim a otoczeniem. Iloraz ciepła przewodzonego przez odzież jest zależny od kilku czynników, w tym od powierzchni odzieży, różnicy temperatury pomiędzy skórą a zewnętrzną stroną materiału oraz od właściwości przewodzenia ciepłego zastosowanych materiałów (Sudoł-Szopińska i Chojnacka, 2007).

Do określenia właściwości izolacyjnych odzieży stosuje się jednostkę clo, która opisuje opór cieplny odzieży. Jednostka ta jest specyficznie przeznaczona do charakteryzowania izolacyjności cieplnej odzieży. Przyjmuje się, że 1 clo odpowiada izolacji termicznej odzieży, która jest wystarczająca do utrzymania standardowej osoby w komforcie termicznym w pomieszczeniu o temperaturze powietrza wynoszącej 21°C, wilgotności 50%, oraz prędkości przepływu powietrza na poziomie 0,01 m/s. W układzie SI, 1 clo odpowiada oporowi cieplnemu wynoszącemu 0,155 m<sup>2</sup>·K/W. Przykładowo, letnia odzież posiada izolację na poziomie około 0,5 clo, podczas gdy odzież zimowa osiąga poziom 1 clo. Izolacyjność odzieży jest kluczowym czynnikiem wpływającym na komfort termiczny użytkowników, szczególnie w zróżnicowanych warunkach środowiskowych (PN-EN ISO 7730, 2006).

Tabela 2. Wartości oporów cieplnych typowych zestawów odzieży.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wiśniewski, 2014

Zestaw odzieży	[m <sup>2</sup> ·K/W]	[clo]
typowy zestaw odzieży tropikalnej	0,045	0,3
lekka odzież letnia	0,03	0,5
lekka odzież robocza	0,11	0,7
zestaw typowej odzieży zimowej noszonej w domu	0,16	1,0
tradycyjna odzież noszona do pracy	0,23	1,5

#### 2.6 Wnioski i dyskusja

Utrzymanie komfortu cieplnego stanowi jedno z głównych wyzwań, któremu sprostać musi każdy budynek. Na osiągnięcie tego efektu składa się sporo części składowych budynku jak i decyzji podejmowanych na etapie projektowym:

- odpowiednia orientacja budynku względem stron świata może pomóc w wykorzystaniu energii słonecznej w celu ogrzewania lub chłodzenia budynku,

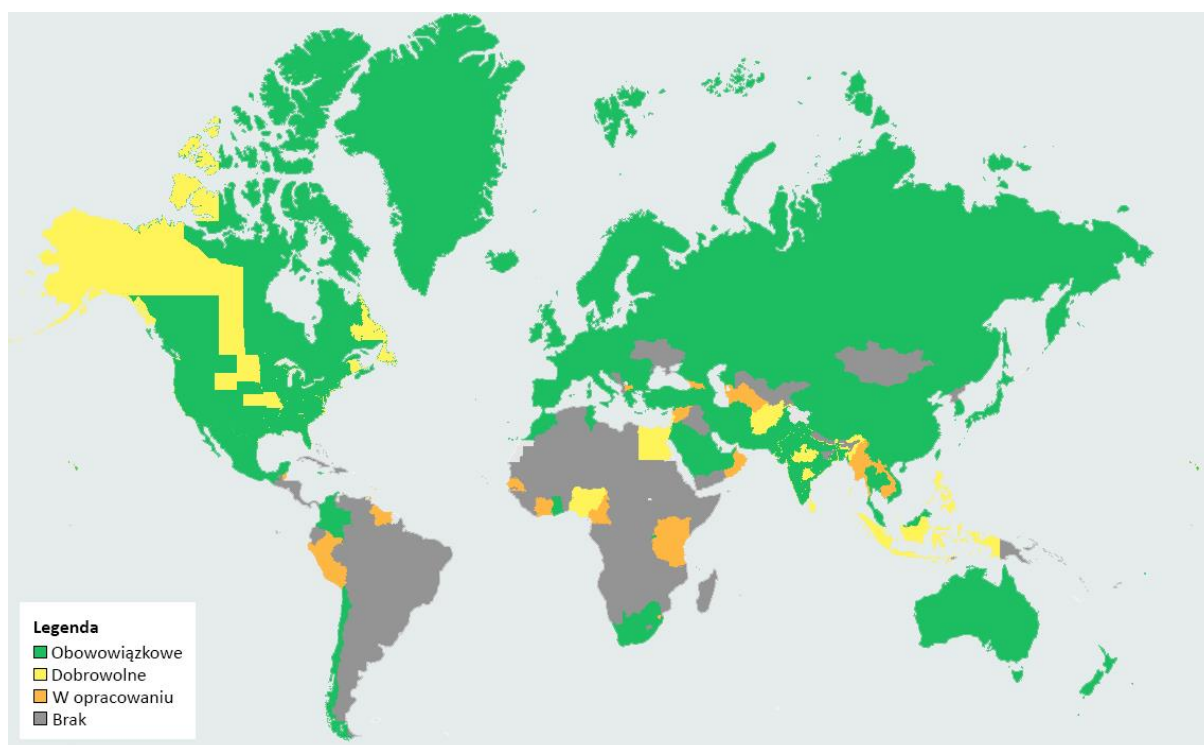
- regulacja zysków energii słonecznej poprzez odpowiednie stosowanie elementów przeziernych, stosowanie magazynów akumulujących ciepło, jak również stosowanie środków przeciwdziałających nadmiernemu nagrzewaniu się pomieszczeń,
- stosowanie materiałów budowlanych dobranych do zamierzonego efektu, posiadających dużą lub małą pojemność cieplną,
- przemyślany system izolacji obejmujący wszystkie elementy budynku- zarówno przegrody, jak i instalacje,
- unikanie występowania mostków cieplnych na etapie projektowym i wykonawczym, które punktowo zaburzają założenia cieplne pomieszczeń,
- odpowiednie projektowanie instalacji HVAC jako głównego aktywnego środka regulacji mikroklimatu wnętrza,
- stosowanie regulatorów i sterowników pozwalających na odpowiednią adaptację budynku do rodzaju i intensywności użytkowania - jest to szczególnie ważny aspekt z punktu widzenia eksploatacji

Aktywne środki regulacji mikroklimatu wewnątrz budynku są odpowiedzialne za zdecydowaną większość całkowitej energii końcowej, dlatego optymalizacja obiektów pod tym względem jest kluczowym elementem, który należy osiągnąć w celu obniżenia zużycia energii. Pojawiają się także analizy, które podważają przyjęte standardy komfortu cieplnego i wskazują konieczność zmian, na przykład w raporcie IEA dotyczącym zmian nawyków mieszkańców (IEA, 2022a), czytamy: Kluczowym globalnym celem zmiany zachowań w sektorze budowlanym w ramach scenariusza osiągnięcia zerowej emisji netto do 2050 roku (scenariusz NZE- Net Zero Emissions by 2050 Scenario) jest ograniczenie temperatur ogrzewania pomieszczeń do 19°C-20°C oraz temperatur chłodzenia do 24°C-25°C do 2030 roku, wraz z obniżeniem temperatury wody użytkowej. Niezależnie od konkretnych wartości i rozwiązań, kwestia zachowania komfortu termicznego użytkowników jest jedną z najważniejszych funkcji budynków, natomiast osiągnięcie go obecnie wiąże się ze znacznymi wydatkami energetycznymi, które stanowią kluczowe pole optymalizacji efektywności energetycznej.

## ROZDZIAŁ 3. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA W PROCESIE PROJEKTOWYM

### 3.1 Wprowadzenie

W związku z tym, że efektywność energetyczna jest jednym z kluczowych zagadnień związanych z budownictwem, wiele krajów wprowadziło przepisy, które mają na celu zmniejszenie zużycia energii i promowanie niskoemisyjnych źródeł energii. Kodeksy te są regularnie aktualizowane, aby uwzględnić nowe technologie i plany budowlane, z myślą o przybliżeniu standardowych praktyk budowlanych do osiągnięcia neutralności węglowej. W niektórych krajach, gdzie obowiązuje system federalny, przyjmowanie tych przepisów odbywa się na poziomie stanowym lub prowincjonalnym, co można zaobserwować na poniższej ilustracji.



Ilustracja 14. Stosowanie regulacji formalno-prawnych dotyczących optymalizacji energetycznej w państwach świata.  
Źródło: IEA, 2022b

Początki formalnoprawnych regulacji w obszarze optymalizacji energetycznej można odnaleźć w globalnych i regionalnych inicjatywach mających na celu ochronę środowiska oraz poprawę efektywności energetycznej. Przełomowym momentem było podpisanie Protokołu z Kioto w 1997 roku, który nałożył na kraje rozwinięte obowiązek redukcji emisji gazów cieplarnianych. W odpowiedzi na to, wiele państw zaczęło wprowadzać przepisy mające na celu nie tylko redukcję emisji, ale również promowanie odnawialnych źródeł energii i poprawę efektywności energetycznej.

Organizacja Narodów Zjednoczonych (ONZ) opracowała kilka kluczowych dokumentów dotyczących zrównoważonego budownictwa, które mają na celu promowanie praktyk budowlanych minimalizujących negatywny wpływ na środowisko, poprawiających efektywność energetyczną i wspierających zrównoważony rozwój. Do najważniejszych dokumentów należą:

1. **Agenda 21** (United Nations, 1992): Dokument przyjęty na Szczycie Ziemi w Rio de Janeiro w 1992 roku, który stanowi kompleksowy plan działań na rzecz zrównoważonego rozwoju na poziomie globalnym, narodowym i lokalnym. W części dotyczącej budownictwa, promuje praktyki zrównoważonego zarządzania zasobami i energią w sektorze budowlanym.



2. **Program ONZ na rzecz Osiedli Ludzkich (UN-Habitat):** UN-Habitat opracowuje wytyczne i raporty dotyczące zrównoważonego budownictwa, urbanistyki i poprawy warunków życia w miastach. Kluczowe dokumenty to m.in. "New Urban Agenda"(United Nations, 2016), przyjęta podczas Habitat III w 2016 roku, która podkreśla znaczenie zrównoważonego rozwoju miast i osiedli ludzkich.
3. **Cele Zrównoważonego Rozwoju** (Sustainable Development Goals, SDGs, Agenda 2030) (United Nations, 2015a): W 2015 roku ONZ przyjęła 17 celów zrównoważonego rozwoju, z których kilka bezpośrednio odnosi się do budownictwa, w tym:
  - Cel 11: Zrównoważone miasta i społeczności – promowanie inkluzywnych, bezpiecznych, odpornych i zrównoważonych miast.
  - Cel 7: Czysta i dostępna energia – zapewnienie dostępu do przystępnej cenowo, niezawodnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii dla wszystkich.
  - Cel 13: Działania na rzecz klimatu – podjęcie pilnych działań w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom.
4. **Deklaracja z konferencji Rio +20** ("The Future We Want") (United Nations, 2012): Dokument przyjęty podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych w sprawie Zrównoważonego Rozwoju w 2012 roku, który wzywa do przyjęcia zrównoważonych praktyk we wszystkich sektorach, w tym w budownictwie.
5. **Porozumienie paryskie** (United Nations, 2015b): Choć nie jest to dokument wyłącznie dotyczący budownictwa, porozumienie przyjęte w 2015 roku ma na celu ograniczenie globalnego ocieplenia poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych, co wymaga m.in. zwiększenia efektywności energetycznej budynków.

Te dokumenty tworzą ramy i wytyczne dla krajów członkowskich ONZ (United Nations – UN) w dążeniu do zrównoważonego budownictwa, promując praktyki budowlane, które są korzystne dla środowiska i społeczeństwa.

## 3.2 Uwarunkowania formalnoprawne w Unii Europejskiej

Unia Europejska, jako jeden z liderów w dziedzinie ochrony środowiska, odegrała kluczową rolę w kształtowaniu formalnoprawnych ram dla optymalizacji energetycznej. Dyrektywy i regulacje w sprawie efektywności energetycznej, narzuciły państwom członkowskim obowiązek wdrożenia konkretnych działań mających na celu poprawę efektywności energetycznej oraz rozwój technologii niskoemisyjnych. Te prawne uwarunkowania stały się podstawą do tworzenia krajowych planów działania w zakresie energii i klimatu, które określają cele i środki prowadzące do zrównoważonego rozwoju energetycznego.

Na poziomie krajowym, rozwój formalnoprawnych regulacji był często motywowany nie tylko zobowiązaniami międzynarodowymi, ale również potrzebą poprawy bezpieczeństwa energetycznego i konkurencyjności gospodarki. Przepisy dotyczące efektywności energetycznej budynków, standardów technicznych dla urządzeń i instalacji oraz systemów zarządzania energią stały się integralną częścią polityki energetycznej wielu krajów.

### Dyrektywa 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej- Energy Efficiency Directive- EED

Dyrektywa ta stanowi kluczowy akt prawny w zakresie efektywności energetycznej w Unii Europejskiej. Nakłada ona na państwa członkowskie obowiązek wdrożenia środków mających na celu osiągnięcie unijnego celu w zakresie efektywności energetycznej, czyli poprawę o 20% do 2020 roku i 32,5% do 2030 roku. W ramach dyrektywy państwa członkowskie zobowiązane są do:

- Opracowania krajowych planów działań w zakresie efektywności energetycznej.
- Wprowadzenia systemów audytów energetycznych dla dużych przedsiębiorstw.
- Zobowiązania dostawców energii do osiągnięcia oszczędności energii u odbiorców końcowych.

## Dyrektywa 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków - Energy Performance of Buildings Directive- EPBD

Dyrektywa ta ma na celu poprawę efektywności energetycznej budynków w Unii Europejskiej. Kluczowe elementy dyrektywy to:

- Ustanowienie minimalnych wymagań dotyczących charakterystyki energetycznej budynków.
- Obowiązek sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej dla budynków.
- Wprowadzenie obowiązkowych inspekcji systemów grzewczych i klimatyzacyjnych.
- Promowanie budynków o niemal zerowym zużyciu energii (NZEB) od 2020 roku.

## Dyrektywa 2018/844/UE zmieniająca dyrektywy 2010/31/UE i 2012/27/UE Energy Performance of Buildings Directive Amendment

Zmiany wprowadzone w 2018 roku mają na celu dalsze wzmocnienie polityki w zakresie efektywności energetycznej budynków i obejmują:

- Wprowadzenie wymogu opracowania długoterminowych strategii renowacji budynków.
- Ułatwienia dla instalacji infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych w budynkach.
- Promowanie inteligentnych technologii i rozwiązań w zakresie zarządzania energią w budynkach.

## Dyrektywa 2009/125/WE w sprawie ekoprojektu dla produktów związanych z energią - Ecodesign Directive

Dyrektywa ta ustanawia zasady określania wymagań dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią. W ramach dyrektywy:

- Ustanawia się minimalne wymagania dotyczące efektywności energetycznej i wpływu na środowisko dla produktów, takich jak sprzęt AGD, oświetlenie, urządzenia grzewcze i klimatyzacyjne.
- Produkty niespełniające tych wymagań nie mogą być wprowadzane na rynek Unii Europejskiej.

## Dyrektywa 2018/2002/UE zmieniająca dyrektywę 2012/27/UE - Energy Efficiency Directive Amendment

Zmiany te wprowadzają dodatkowe cele i wymagania w zakresie efektywności energetycznej, mające na celu:

- Zwiększenie celu poprawy efektywności energetycznej do 32,5% do 2030 roku.
- Zwiększenie wsparcia dla efektywności energetycznej w sektorze przemysłowym, budynków i transportu.
- Promowanie systemów zarządzania energią i inteligentnych technologii.

## Dyrektywa 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych Renewable Energy Directive- RED

Chociaż dyrektywa ta skupia się głównie na promowaniu odnawialnych źródeł energii, ma ona również znaczenie dla optymalizacji energetycznej poprzez:

- Ustanowienie krajowych celów w zakresie udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii.
- Promowanie stosowania energii odnawialnej w sektorze transportu, ogrzewania i chłodzenia.

## Dyrektywa 2024/1275 w sprawie charakterystyki energetycznej budynków

Dotyczy zasad zrównoważonego rozwoju energetycznego i wprowadza nowe wymogi dotyczące efektywności energetycznej oraz redukcji emisji w sektorze budownictwa, transportu i przemysłu.

- Dyrektywa wprowadza obowiązek modernizacji budynków publicznych oraz prywatnych w celu poprawy ich efektywności energetycznej.

- Wymaga wprowadzenia systemów inteligentnego zarządzania energią w budynkach, takich jak automatyczne systemy monitorowania i regulacji zużycia energii.

Dyrektywa 2024/1275/UE wprowadza również mechanizmy monitorowania i egzekwowania nowych wymogów:

- **Krajowe Plany Działania:** Każde państwo członkowskie musi opracować i przedłożyć Komisji Europejskiej krajowy plan działania, który będzie zawierał szczegółowe kroki w celu osiągnięcia założonych celów.
- **Raportowanie Postępów:** Państwa członkowskie zobowiązane są do regularnego raportowania postępów w implementacji dyrektywy, w tym danych dotyczących zużycia energii, emisji gazów cieplarnianych oraz wdrożonych środków zarządzania energią.
- **Sankcje za Niewywiązywanie się z Obowiązków:** Dyrektywa przewiduje sankcje dla państw członkowskich, które nie spełnią określonych wymogów lub nie osiągną założonych celów.

Wszystkie te dyrektywy razem tworzą kompleksowe ramy prawne, które mają na celu poprawę efektywności energetycznej i promowanie zrównoważonego rozwoju energetycznego w Unii Europejskiej.

### 3.3 Uwarunkowania formalnoprawne w prawodawstwie polskim

W Polsce wdrożenie unijnych dyrektyw przełożyło się na szereg ustaw i rozporządzeń, które regulują m.in. audyty energetyczne, certyfikację energetyczną budynków oraz wsparcie finansowe dla inwestycji w efektywność energetyczną. Te regulacje tworzą ramy prawne, w których przedsiębiorstwa i instytucje publiczne muszą funkcjonować, a jednocześnie stwarzają możliwości dla innowacji i rozwoju technologicznego w sektorze energetycznym.

Zmiany w legislacji są bezpośrednim następstwem wprowadzenia krajowych planów działań dotyczących efektywności energetycznej. Powstały cztery takie dokumenty, których sporządzenie wynika ze wspomnianych wcześniej dyrektyw UE. Plany, opracowywane kolejno w latach 2007, 2012, 2014 i 2017. Kolejne sprawozdania są częścią Krajowego Planu w zakresie energii i klimatu na lata 2021-2030 (*Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030, 2024*).

Kluczowe akty prawne, zmodyfikowane bądź stworzone w ramach wdrażania polityki zrównoważonego rozwoju w zakresie efektywności energetycznej to:

**Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane (PB) wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny- Dz. U. z 2024 r. poz. 725, 834)**

Ustawa reguluje zasady projektowania i budowania budynków, z uwzględnieniem wymogów dotyczących efektywności energetycznej, między innymi:

- Wymaga minimalizacji zużycia energii w budynkach, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.
- Określa obowiązek uzyskania pozwolenia na budowę w przypadku działań wpływających na charakterystykę energetyczną budynku.

**Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (WT) wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny Dz.U. 2024 poz. 474)**

Rozporządzenie to określa techniczne wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków poprzez:

- Ustalenie minimalnej wartości izolacyjności cieplnej dla przegród budowlanych.
- Nałożenie obowiązku spełnienia określonych wartości współczynnika U (przenikania ciepła) dla elementów budynku.
- Określenie szczegółowych wymagań dotyczących granicznych wartości wskaźnika EP (energii pierwotnej).

### Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 11 września 2020 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny Dz.U. 2023 poz. 2405)

Rozporządzenie określa szczegółowy zakres i formę projektu budowlanego, w tym wymagania dotyczące dokumentacji technicznej i planistycznej, a także:

- Nakłada obowiązek dołączenia wyników sporządzonych analiz minimalizujących zapotrzebowanie na energię.
- Wymaga przedstawienia rozwiązań zapewniających oszczędność energii i odpowiednią izolacyjność cieplną budynku, jako część dokumentu charakterystyki energetycznej.

### Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny Dz. U. z 2024 r. poz. 101)

Ustawa reguluje obowiązek stosowania świadectw charakterystyki energetycznej dla budynków oraz lokali mieszkalnych i użytkowych poprzez:

- Wprowadzenie obowiązku sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej dla nowych i modernizowanych budynków.
- Określenie wymagań dotyczących przeprowadzania okresowych kontroli systemów ogrzewania i klimatyzacji.
- Wprowadza obowiązek informowania o sprawności energetycznej także przy sprzedaży i wynajmie budynków i lokali.

### Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny Dz.U. 2023 poz. 697)

Rozporządzenie definiuje metodologię sporządzania charakterystyki energetycznej obejmującą:

- Sposób obliczania wskaźników energetycznych budynków, takich jak energia końcowa, użytkowa i pierwotna.
- Wymaganie uwzględnienia wszystkich czynników wpływających na zużycie energii, takich jak izolacyjność cieplna i sprawność systemów grzewczych.

### Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej wraz z późniejszymi zmianami (stan aktualny Dz. U. 2024 r. poz. 1047)

Ustawa określa krajowe cele w zakresie efektywności energetycznej oraz środki mające na celu ich osiągnięcie. Na sektor budowlany wpływa poprzez:

- Wprowadzenie systemu białych certyfikatów jako mechanizmu wsparcia dla inwestycji w efektywność energetyczną.
- Nałożenie obowiązku przeprowadzania audytów energetycznych przez przedsiębiorstwa w celu identyfikacji możliwości zwiększenia efektywności.
- Określenie wymagań dotyczących realizacji i raportowania działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej.

Są to akty prawne, które, w ocenie autora, stanowią podstawę wytycznych dotyczących energetyki budynków, które wpisują się w działania i drogowskazy organizacji międzynarodowych. Dokumenty te mają największy bezpośredni wpływ na proces projektowy i praktykę budowlaną.

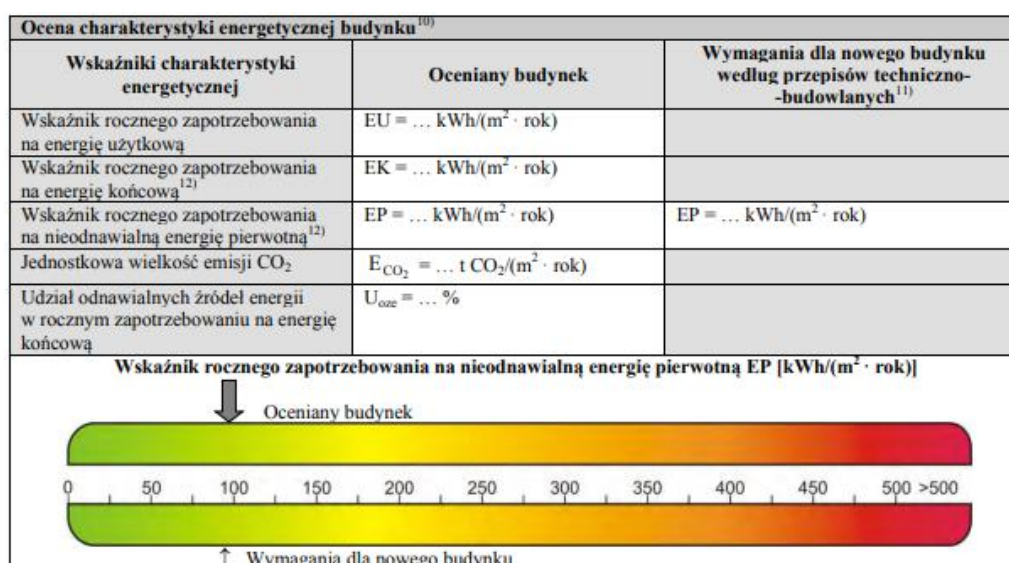
### 3.4 Charakterystyka energetyczna

Niektóre z rozwiązań stosowanych wcześniej prototypowo oraz na lokalną skalę stało się częścią wspomnianych globalnych i krajowych polityk kształtujących budownictwo. Jednym z takich rozwiązań jest certyfikacja energetyczna, której przeprowadzenie stało się niezbędne w każdym projekcie budowlanym. Efektem procesu jest sporządzenie świadectwa charakterystyki energetycznej, który zawiera pakiet kluczowych informacji: przewidywaną ilość energii na potrzeby ogrzewania, wentylacji, ciepłej wody użytkowej, energię pomocniczą oraz na potrzeby chłodzenia – jeśli występuje. Charakterystyka energetyczna jest więc dokumentem informującym o jakości energetycznej budynku i możliwościach poprawy istniejącego stanu (Pogorzelski, 2007). Obowiązek certyfikowania został wprowadzony przy pomocy wymienionych wyżej dokumentów (*Dyrektywa 2002/91/WE*, 2002; *Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414*, 1994; *Dz.U. 2014 poz. 1200*, 2014). Założeniem i głównym celem certyfikowania budynków jest poprawa jakości termicznej budynków i obniżenia emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery na skutek spalania paliw na cele regulacji temperatury. Aby zrealizować ten cel, obliczane są wskaźniki, które informują o ilości energii zużywanej przez budynek.

Charakterystyka energetyczna (ilustracja 16) budynku musi zawierać szereg parametrów, które opisują jego efektywność energetyczną. Poniżej znajdują się kluczowe parametry, które powinny być uwzględnione:

- **Podstawowe parametry budynku**- takie jak: rodzaj budynku, jego przeznaczenie, informacja o metodzie sporządzenia (obliczeniowa/zużyciowa), powierzchnia, kubatura, adres, informacje klimatyczne
- **Zapotrzebowanie na energię użytkową (EU)**- [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)]
- **Zapotrzebowanie na energię końcową (EK)**- [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)]
- **Zapotrzebowanie na energię pierwotną (EP)**- [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)]
- **Wskaźniki emisji CO<sub>2</sub>**- [t CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·rok)]
- **Udział odnawialnych źródeł energii [%]**
- **Obliczeniowa roczna ilość zużywanego nośnika energii** przez budynek - z podziałem na poszczególne systemy
- **Zestawienie przegród budynku**- z określeniem współczynnika przenikania ciepła przegrody U

Efektywność systemów technicznych- grzewczych, chłodniczych, wentylacyjnych, oświetleniowych oraz systemów dostarczania ciepłej wody użytkowej (*Dz.U. 2023 poz. 697*, 2023)

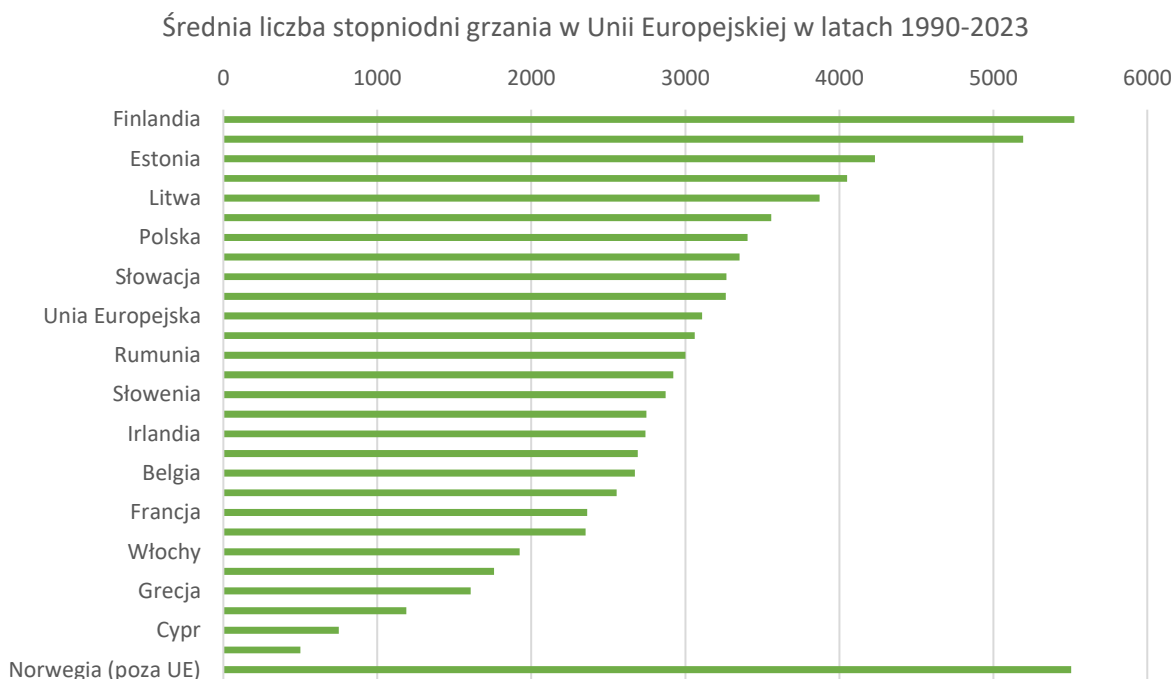


Ilustracja 15. Kryteria charakterystyki energetycznej budynku.

Źródło: *Dz.U. 2023 poz. 697*, 2023

### 3.4.1 Charakterystyka klimatu w Polsce

Polski klimat odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu strategii efektywności energetycznej budynków. Charakteryzuje się on umiarkowanymi zimami i gorącymi latami, co stawia specyficzne wyzwania dla projektantów budynków energooszczędnych. W tym kontekście stopniodni to jednostka miary używana do oceny zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia budynku. Oblicza się je na podstawie różnicy między średnią dzienną temperaturą zewnętrzną a ustaloną temperaturą komfortu wewnętrznego. Z poniższego wykresu można wywnioskować, że Polska, pod względem liczby stopniodni grzania plasuje się miejscu 7 w Unii Europejskiej, jednocześnie będąc powyżej średniej dla całej UE. Krajami o podobnym w tym względzie klimacie są Austria i Czechy.



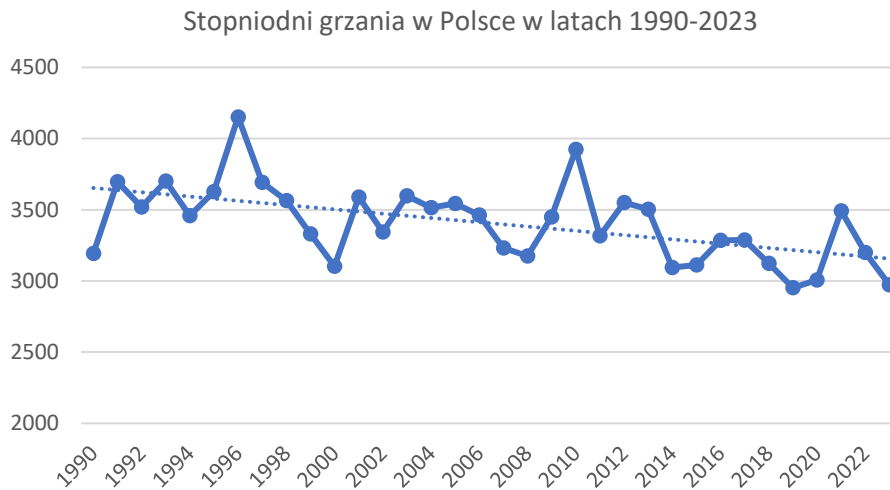
Ilustracja 16 Średnia liczba stopniodni grzania w Unii Europejskiej w latach 1990-2023.

Źródło: opracowanie własne na podstawie

[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_chdd\\_a/default/table?lang=en&category=nrg.nrg\\_chdd](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_chdd_a/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_chdd)

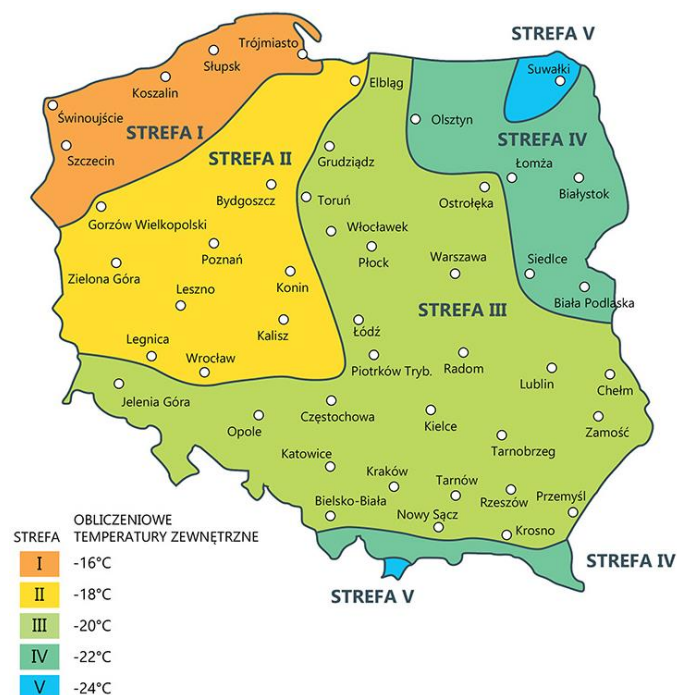
Należy jednak zauważyć (ilustracja 18), że pomimo miejscami dość znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi latami, linia trendu jest malejąca. Jednocześnie, liczba stopniodni chłodzenia ma trend rosnący, w czym należy upatrywać jeden z powodów popularyzacji klimatyzacji w indywidualnych gospodarstwach domowych, zarówno w domach jednorodzinnych, jak i mieszkaniach.

Im większa różnica temperatur, tym więcej energii potrzeba do utrzymania komfortu cieplnego w budynku. W metodologii uproszczonej, stosowanej np. w USA jako temperaturę bazową przyjmuje się  $65^{\circ}\text{F} = 18,3^{\circ}\text{C}$ . Jeżeli ogrzewanie od ludzi i urządzeń w domu wraz z energią od promieniowania słonecznego może podwyższyć temperaturę o  $3^{\circ}\text{C}$ , to wystarczy, aby przy temperaturze zewnętrznej  $18^{\circ}\text{C}$  zapewnić temperaturę  $21^{\circ}\text{C}$  w mieszkaniu bez ogrzewania. Jeżeli temperatura zewnętrzna powietrza jest niższa niż  $18^{\circ}\text{C}$ , to wtedy ogrzewanie jest niezbędne do zapewnienia temperatury wewnętrznej  $21^{\circ}\text{C}$ . Za dni grzewcze przyjmuje się dni, w których średnia dzienna temperatura zewnętrzna jest niższa niż temperatura bazowa. Dla temperatury bazowej  $18^{\circ}\text{C}$  i średniej dziennej temperaturze  $t_{sr}=10^{\circ}\text{C}$  dzienna liczba stopniodni grzania wynosi  $(t_b - t_{sr}) \cdot 1 \text{ dzień} = (18^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}) \cdot 1 \text{ dzień} = 8^{\circ}\text{C}$  dni. W metodzie obliczeniowej przyjętej przez Eurostat występuje dodatkowa zmienna temperatury granicznej  $t_{gr}$ , co lepiej opisuje zapotrzebowanie na energię na ogrzewanie. Eliminuje bowiem z liczby stopniodni wartości obliczone dla dni pierwszych (wrzesień) i ostatnich (czerwiec) miesięcy sezonu grzewczego oraz miesięcy poza sezonem grzewczym, w których nie ogrzewa się mieszkań (Dopke, 2010).



Ilustracja 17 Ilość stopniodni grzania w Polsce w latach 1990-2023.  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EUROSTAT

Liczba stopniodni zmienia się w różnych regionach, dlatego Polska, wg normy (PN-EN 12831, 2017) jest podzielona na pięć stref klimatycznych (ilustracja 19), które różnią się pod względem średnich temperatur, opadów i innych warunków atmosferycznych. Każda strefa wymaga specyficznego podejścia do projektowania budynków, aby zoptymalizować ich efektywność energetyczną. Przede wszystkim decyduje o dobraniu obliczeniowej temperatury zewnętrznej na potrzeby charakterystyki.



Ilustracja 18. Obliczeniowe temperatury zewnętrzne przyjmowane w Polsce.  
 Źródło: PN-EN 12831, 2017

W każdej z tych stref działają stacje pogodowe, które zbierają dane meteorologiczne niezbędne do analiz klimatycznych. Dane te są kluczowe dla dokładnego określenia stopniodni, co z kolei wpływa na projektowanie systemów grzewczych i chłodniczych w budynkach. Stacje pogodowe monitorują temperatury, opady, wilgotność, prędkość wiatru i nasłonecznienie, co pozwala na precyzyjne modelowanie warunków klimatycznych i optymalizację energetyczną budynków w różnych regionach kraju (Żurawski, 2013)

### 3.4.2 Energia pierwotna (EP)

Najważniejszym elementem dokumentu charakterystyki energetycznej z formalnego punktu widzenia jest wskaźnik zużycia energii pierwotnej- EP. Jest miarą całkowitej ilości energii zużywanej przez budynek, uwzględniającą zarówno energię końcową dostarczaną do budynku, jak i dodatkowe nakłady energii nieodnawialnej związane z jej wytworzeniem, przetworzeniem i dostarczeniem. Jest to więc wskaźnik bardzo uniwersalny o szerokim zakresie, który bierze pod uwagę:

- sprawność energetyczną budynku, ilość faktycznej energii, która zostanie wykorzystana w trakcie jego eksploatacji,
- energię wyprodukowaną na miejscu przez systemy powiązane z budynkiem i bilans jej ilości wyeksportowanej do sieci w porównaniu do energii dostarczonej,
- rodzaj nośnika dostarczonej energii, sprawność jej pozyskiwania, straty przesyłowe, rodzaj źródła (indywidualne/miejskie) i inne aspekty, liczone za pomocą odpowiednich współczynników.

Zakres wskaźnika EP nie odnosi się jedynie do budynku, którego dotyczy, gdyż wynika bezpośrednio z krajowych uwarunkowań polityki energetycznej m.in udziału OZE w ogólnym bilansie, jakości infrastruktury oraz panującego klimatu. Odnosi się do energii pierwotnej w przeliczeniu na m<sup>2</sup> w ujęciu rocznym. Z uwagi na te aspekty, wskaźnik EP odnosi się do tego, jakie obciążenie dla środowiska naturalnego stanowi budynek i w odróżnieniu od EU i EK niesie różne informacje od siebie niezależne. (Sadowska, 2015)

Pojęcie energii pierwotnej zostało wprowadzone w realia gospodarki Unii Europejskiej w 2006 r. (Dyrektywa 2006/32/WE, 2006) natomiast jest stosowane jako wyznacznik energooszczędności od 1991, kiedy w instytucie PHI w Darmstadt opracowano pod kierownictwem dr W. Feista pierwszy standard budynku definiujący zużycie EP przez budynek w ujęciu rocznym na 120 kWh/(m<sup>2</sup> · rok) (Szczechowiak, 2015).

Tabela 3. Wskaźnik energii pierwotnej według standardów certyfikacji PHI.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Furtak i in., 2021

nazwa	podstawowa klasyfikacja	nowa klasyfikacja		
	the classic dom klasyczny	the passive classic dom klasyczny	the passive house plus dom pasywny plus	the premium house dom premium
jednostka	[kWh/m <sup>2</sup> · rok]	[kWh/m <sup>2</sup> · rok]		
wskaźnik energii pierwotnej (EP)	120	60	45	30

Jeszcze bardziej restrykcyjna wielkość wskaźnika EP jest wymagana przy certyfikacji budynków zero energetycznych i wynosi 0 (Sowa i in., 2017). Nie musi to oznaczać, że żadna energia nie jest wprowadzana do budynku i jest on samowystarczalny, ale jego bilans w ujęciu rocznym, między energią wprowadzoną a wyprodukowaną na miejscu jest zerowy. Budynek poprzez swoje systemy techniczne może produkować energię, wykorzystując zasoby źródeł odnawialnych, najczęściej w postaci ciepła i energii elektrycznej, która jest sprzedawana do sieci zewnętrznej. W przypadku przewyższenia ilości energii produkowanej przez budynek w stosunku do zużywanej, można mówić o budynku plusenergetycznym (Szczechowiak, 2015).

Wskaźnik EP jest również kluczowy w definicji budynku o niskim zużyciu energii zawartym w warunkach technicznych (WT), który jest efektem wdrożenia w Polsce dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej (Dyrektywa 2010/31/UE, 2010) definiującej budynki „o niemal zerowym zużyciu energii”. Według Artykułu 2 Dyrektywy jest to budynek: „o bardzo wysokiej charakterystyce energetycznej określonej zgodnie z załącznikiem I. Niemal zerowa lub bardzo niska ilość wymaganej energii powinna pochodzić w bardzo wysokim stopniu z energii ze źródeł odnawialnych, w tym energii ze źródeł odnawialnych wytwarzanej na miejscu lub w pobliżu”.



Wśród zapisów dyrektywy znalazła się także obligacja państw członkowskich do opracowania krajowych planów mających na celu zwiększenie liczby budynków o niemal zerowym zużyciu energii. Jedną z podstaw tych planów było opracowanie praktycznej definicji budynku o niemal zerowym zużyciu energii i wdrożeniu jej w oparciu o schemat dojścia do obecnego poziomu wymagań. (Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030, 2024)

W Polsce wyznacznikiem spełnienia definicji zawartej w Dyrektywie jest zachowanie określonego poziomu wskaźnika EP, którego wyliczenie stanowi podsumowanie każdej sporządzonej CE. Maksymalną wartość rocznego obliczeniowego zapotrzebowania budynku na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia, przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz oświetlenia oblicza się zgodnie z poniższym wzorem:

$$EP = E_{PH+W} + \Delta EP_C + \Delta EP_L \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{rok)]}$$

gdzie:

$E_{PH+W}$  - częściowa wartość wskaźnika EP na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej (określone w rozporządzeniu),

$\Delta EP_C$  - częściowa wartość wskaźnika EP na potrzeby chłodzenia (określone w rozporządzeniu),

$\Delta EP_L$  - częściowa wartość wskaźnika EP na potrzeby oświetlenia (określone w rozporządzeniu).

Obliczony w ten sposób wskaźnik, w zależności od rodzaju budynku i lat otrzymania pozwolenia na budowę musi być niższy niż podany w tabeli:

Tabela 4. Częstkowe wartości wskaźnika zapotrzebowania energii pierwotnej (EP) na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej.

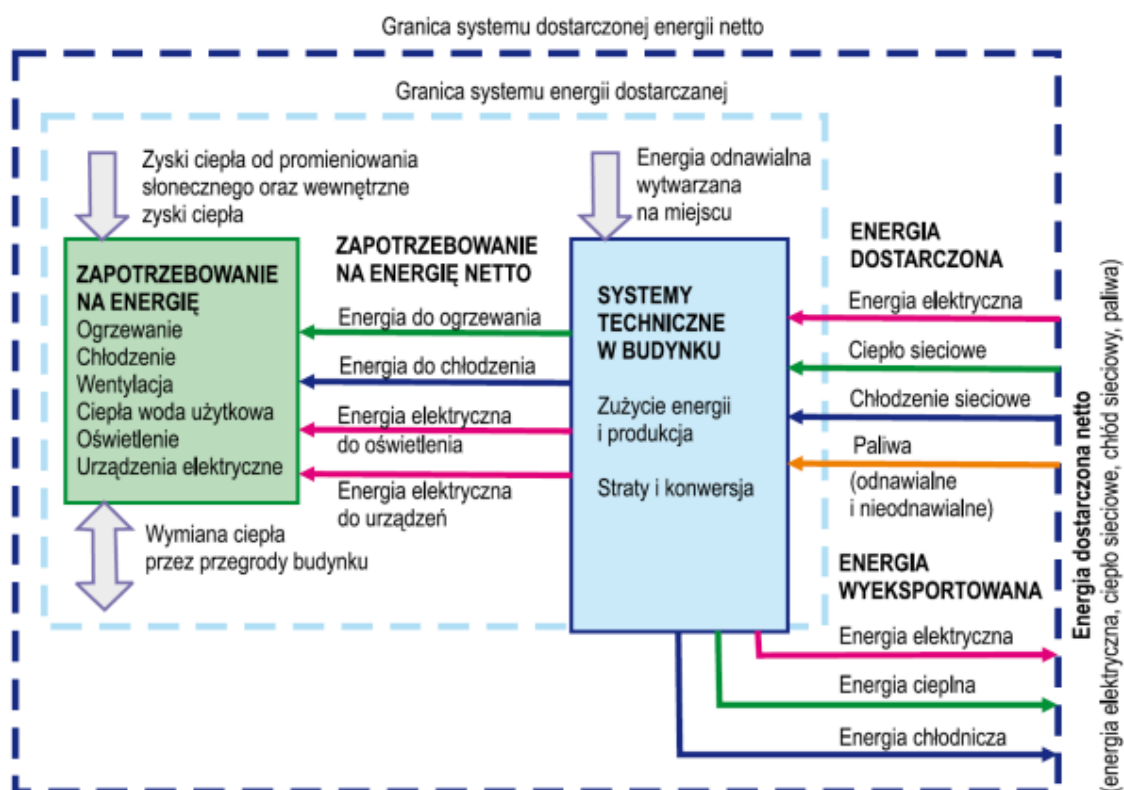
Źródło: Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, 2002

Rodzaj budynku	Częstkowe wartości wskaźnika zapotrzebowania energii pierwotnej EP na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej $E_{PH+W}$ [kWh/(m <sup>2</sup> · rok)]		
	od 1 stycznia 2014 r.	od 1 stycznia 2017 r.	od 31 grudnia 2020 r.
Budynek mieszkalny:			
a) jednorodzinny	120	95	70
b) wielorodzinny	105	85	65
Budynek zamieszkania zbiorowego	95	85	75
Budynek użyteczności publicznej:			
a) opieki zdrowotnej	390	290	190
b) pozostałe	65	60	45
Budynek gospodarczy, magazynowy i produkcyjny	110	90	70

Stopniowe zaostrzenie przepisów od roku 2014 bez wątpienia zwiększyło świadomość wszystkich uczestników procesu budowlanego w zakresie zużycia energii, ale przez swój szeroki zakres wskaźnik EP praktycznie przestaje informować o faktycznym zużyciu energii przez budynek, a zaczyna być wskaźnikiem mówiącym o obciążeniu, jakie rozpatrywany budynek stanowi dla środowiska naturalnego (Sadowska, 2015). Warto zauważyć, że sposób interpretacji dyrektyw jest zróżnicowany w krajach UE, co powoduje, że wdrażanie wymagań dotyczących zużycia energii pierwotnej zależy od prawodawstwa krajowego. Dla porównania, w Danii od roku 2020 maksymalny EP dla budynków mieszkalnych to  $30 + 1000/A$  kWh/(m<sup>2</sup> · rok), gdzie A = powierzchnia budynku ogrzewanego. W Szwecji, w zależności od regionu, wskaźnik ten waha się między 45 a 115 kWh/(m<sup>2</sup> · rok), przy czym, ocena nie jest dokonywana metodami obliczeniowo-symulacyjnymi, ale na podstawie pomiarów in-situ po pierwszym roku funkcjonowania (Østergård i in., 2019).

### 3.4.3 Energia końcowa (EK) i Energia użytkowa (EU)

W przyjętej metodologii sporządzania świadectwa charakterystyki energetycznej budynku do obliczenia EP niezbędne jest wyznaczenie dwóch pomocniczych współczynników – energii końcowej (EK) i energii użytkowej (EU). Zasadniczą różnicą między nimi jest branie pod uwagę innych zmiennych, zależnych od granicy bilansowania. Według definicji amerykańskiego departamentu stanu (U.S. Department of Energy, 2015) jest ona funkcjonalnie związana z budynkiem i w przypadku pojedynczych budynków zazwyczaj pokrywa się z granicą posesji (ilustracja 20). Powinna także obejmować punkt styku z mediami oraz źródła energii odnawialnej wykorzystywanej w ramach nieruchomości. Zapisy te są zgodne z dokumentami europejskimi. Według dyrektywy EPBD (*Dyrektywa 2010/31/UE*, 2010) energia wytwarzana na miejscu nie jest traktowana jako energia dostarczona do budynku, a jej pozytywny wpływ należy uwzględnić w ocenie budynku. Bilans między energią dostarczoną a wyeksportowaną w tej granicy jest odzwierciedlony we współczynniku energii końcowej (EK), który niesie najpełniejszą informację na temat bilansu energetycznego przeprowadzonego na granicy sieci energetycznej i docelowego obszaru. Jest to czytelna informacja, jaka ilość energii w przeliczeniu na m<sup>2</sup> zostaje w ujęciu rocznym dostarczona do budynku i jaki stopień sprawności osiągają zastosowane instalacje.

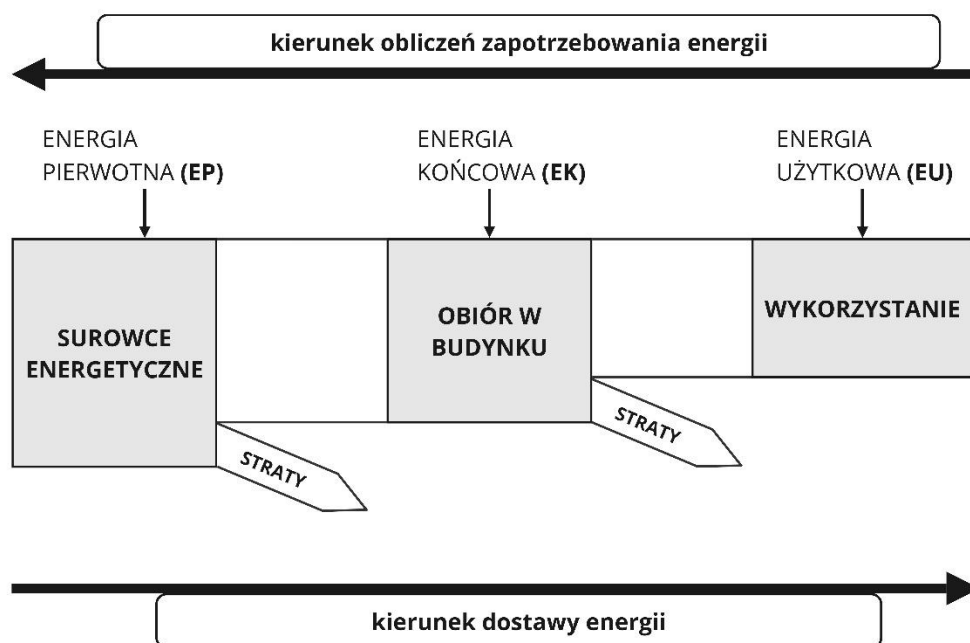


Ilustracja 19. Granice bilansowania energii.  
Źródło: Żurawski, 2013

Najwęższa granica bilansowania jest związana bezpośrednio z budynkiem i energią dostarczaną na cele użytkowe. Obejmuje ilość energii potrzebną do ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, przygotowania ciepłej wody użytkowej, oświetlenia i całej reszty wyposażenia jak również straty energii cieplnej i elektrycznej.

Na tej granicy posługujemy się współczynnikiem Energii (EU), który określa roczną ilość energii dla ogrzewania (ewentualnie chłodzenia), wentylacji i przygotowania ciepłej wody użytkowej (ilustracja 21). Jest obliczany dla standardowych warunków klimatycznych i standardowych warunków użytkowania i jest miarą efektywności energetycznej budynku. Jest to energia, jaka jest potrzebna do zrównoważenia wszystkich strat ciepła przez przegrody i wentylację pomniejszona o zyski. Jest to wskaźnik, który nadaje się do bezpośredniego porównania obiektów i oceny efektywności energetycznej budynku (Borowska i

Kulczewska, 2016). Współczynnik EU mierzy ilość energii faktycznie zużywanej na cele, które bezpośrednio wpływają na komfort użytkowników budynku, takie jak ogrzewanie, chłodzenie, oświetlenie i wentylacja. Dzięki temu można lepiej ocenić, jak efektywnie budynek spełnia swoje funkcje użytkowe, poprzez porównanie jakości obudowy budynku.



Ilustracja 20. Zależności pomiędzy energią pierwotną (EP), końcową (EK) i użytkową (EU)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Borowska & Kulczewska, 2016

Ze względu na swoją precyzję i koncentrację na rzeczywistych warunkach użytkowania wskaźnik EU jest powszechnie używany w wielu systemach certyfikowania budynków. Używany jest między innymi jako wskaźnik pomocniczy, przy certyfikacji budownictwa pasywnego przez wspomniany poprzednio instytut PHI w Darmstadt. Według ich wytycznych, oprócz szeregu innych uwarunkowań, w tym współczynnika EP, budynek pasywny może zużywać maksymalnie  $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$  na cele ogrzewania, chłodzenia i wentylacji. Aby osiągnąć tak niski poziom zużycia energii przez system HVAC, konieczne jest stosowanie naturalnych i pasywnych rozwiązań architektonicznych oraz działań zapewniających komfort przy minimalnym zapotrzebowaniu na energię użytkową, bez użycia prądu. Dotyczy to głównie naturalnego ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia oraz zachowania energii. Obejmuje to także planowanie funkcjonalnego układu budynku, kształtowanie jego bryły i elewacji, wykorzystanie zysków solarnych oraz ochronę przed nadmiernym nasłonecznieniem (Bać, 2020b).

### 3.4.4 Współczynnik przenikania ciepła (U)

Jak zostało wcześniej wspomniane, Polska należy do zimnych krajów Europy, wobec czego wydatki na ogrzewnictwo są podstawą kształtowania polityki energetycznej. Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania stanowi różnicę pomiędzy stratami ciepła a zyskami od promieniowania słonecznego, urządzeń, oświetlenia, użytkowników itd. Stąd właśnie wynikają dwie podstawowe strategie budownictwa pasywnego - minimalizacja strat poprzez zwiększenie izolacyjności oraz maksymalizacja zysków słonecznych. Izolacyjność przegród jest jednym z podstawowych parametrów branych pod uwagę przy wszelkiego rodzaju certyfikacji budynków i jest określana przy pomocy współczynnika przenikania ciepła (U). Wyraża on ilość ciepła, jaka przenika przez 1 metr kwadratowy przegrody w ciągu jednej sekundy przy różnicy temperatur wynoszącej 1 stopień Kelvina [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ].

Im niższa wartość współczynnika U, tym lepsze właściwości izolacyjne ma przegroda, co przekłada się na mniejsze straty ciepła i wyższe oszczędności energetyczne.

Współczynnik U wyrażony jest przez wzór zdefiniowany w normie (PN-EN ISO 6946:2017):

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{R_T} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

gdzie

$R_{si}, R_{se}$  – jednostkowe opory przyjmowania ciepła napływu i odpływu [ $m^2 \cdot K/W$ ]

$R$  – jednostkowy opór cieplny przegrody budowlanej [ $m^2 \cdot K/W$ ]

$R_T$  – całkowity opór cieplny przegrody budowlanej [ $m^2 \cdot K/W$ ]

Wymagania prawne dotyczące wartości współczynnika U, podobnie jak EP ewoluowały w czasie, stając się coraz bardziej restrykcyjne w odpowiedzi na rosnące potrzeby ochrony środowiska oraz oszczędzania energii (tabela 5). Początkowo, parametr ten był określany jedynie w normach, przywołanych w rozporządzeniu (WT), a jego wartość była relatywnie wysoka. Z biegiem czasu nastąpiły zmiany, obniżające wartość współczynnika, które odzwierciedlały stopniowe wdrażanie bardziej efektywnych technologii izolacyjnych oraz rosnące zrozumienie korzyści wynikających z lepszej izolacyjności budynków. Zgodnie z definicją przyjętą w polskim ustawodawstwie, obecnie obowiązujące, docelowe wymagania dotyczące izolacyjności termicznej stanowią podstawę dla standardów, które muszą spełniać budynki „o niskim zużyciu energii”, czyli budynki nZEB. Jest to jeden z filarów wdrażania europejskiej dyrektywy EPBD w Polsce.

Tabela 5. Zestawienie maksymalnego współczynnika przenikania ciepła dla wybranych przegród budowlanych na przestrzeni lat.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Firląg i Staniszek, 2015, Finansowanie poprawy efektywności energetycznej budynków w Polsce, BPIE

Okres	Podstawa Prawna	Ściana zewnętrzna	Dach	Strop nad nieogrzewaną piwnicą	Strop nad nieogrzewanym poddaszem
		$U_{C(max)}$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]			
1957 – 1964	PN-57/B-024051	1,16; 1,42	0,87	1,16	1,04; 1,16
1964 – 1974	PN-64/B-034041	1,16	0,87	1,16	1,04; 1,16
1974 – 1982	PN-74/B-034042	1,16	0,70	1,16	0,93
1982 – 1991	PN-82/B-020202	0,75	0,45	1,16	0,40
1991 – 2002	PN-91/B-020202	0,55; 0,70	0,30	0,60	0,30
2002 – 2008	Dz. U. 2002 poz. 690	0,30; 0,50	0,30	0,60	0,30
2009 – 2013	Dz. U. 2008 poz. 1238	0,30	0,25	0,45	0,25
2014 – 2016	Dz. U. 2013 poz. 926	0,25	0,20	0,25	0,20
2017 – 2020		0,23	0,18	0,25	0,18
od 2021		0,20	0,15	0,25	0,15

Wartości współczynnika U określone w WT dla nowych budynków pomimo stopniowego zaostrzenia w porównaniu ze standardami budownictwa pasywnego są w dalszym ciągu dość wysokie. Dobrym przykładem może być w tej sytuacji standard NF40 i NF15, w ramach którego wymagania były bardziej zaostrzone (tabela 6).

Tabela 6. Wartości współczynnika U określone w WT.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Dz. U. 2022, poz. 1225 i Jadwiszczak 2013

Rodzaj przegrody	Współczynnik przenikania ciepła $U_{C(max)}$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]		
	WT	NF40	NF15
Ściany zewnętrzne w I, II i III strefie klimatycznej w IV i V strefie klimatycznej	0,20	0,15 0,12	0,10 0,08
Dachy, stropodachy w I, II i III strefie klimatycznej w IV i V strefie klimatycznej	0,15	0,12 0,10	0,10 0,08
Podłogi na gruncie w I, II i III strefie klimatycznej w IV i V strefie klimatycznej	0,15	0,20 0,15	0,12 0,10
Okna, okna połaciowe, drzwi balkonowe w I, II i III strefie klimatycznej w IV i V strefie klimatycznej	0,9	1,0 0,8	0,8 0,7
Drzwi zewnętrzne w I, II i III strefie klimatycznej w IV i V strefie klimatycznej	1,5	1,3	0,8 0,7

Mimo swojej istotności, współczynnik przenikania ciepła posiada pewne ograniczenia. Przede wszystkim nie uwzględnia on wszystkich aspektów komfortu termicznego, takich jak wpływ mostków cieplnych, które mogą znacząco zwiększać straty ciepła w praktyce. Ponadto, wartości współczynnika nie odzwierciedlają dynamicznych zjawisk termicznych, jak np. zdolność materiałów do magazynowania ciepła, co jest szczególnie ważne w przypadku budynków pasywnych. Dlatego mimo że jest to jeden z podstawowych wskaźników związanych z efektywnością energetyczną budynków, nie powinien być jedynym kryterium brany pod uwagę przy projektowaniu i ocenie budynków energooszczędnych.

### 3.4.5 Pozostałe parametry mogące wpływać na efektywność energetyczną budynku

Przy ocenie efektywności energetycznej budynku, poza klasycznymi wskaźnikami takimi jak: EP (energia pierwotna), EU (energia użytkowa), EK (energia końcowa) oraz U (współczynnik przenikania ciepła), można brać pod uwagę także inne parametry, które mogą wpływać na całkowitą efektywność energetyczną budynku oraz jego oddziaływanie na środowisko. Jednym z nich jest szczelność budynku. Szczelność powietrzna, wyrażana najczęściej jako współczynnik  $n_{50}$ , określa ilość powietrza, które w ciągu godziny przedostaje się przez nieszczelności w przegrodach budowlanych przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa. Wysoka szczelność jest kluczowa dla minimalizacji strat ciepła i poprawy komfortu termicznego wewnątrz budynku. Nieszczelności mogą prowadzić do niekontrolowanego przepływu powietrza, co z kolei zwiększa zapotrzebowanie na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Szczelność przegród zewnętrznych może być weryfikowana za pomocą prób ciśnieniowych. Wskaźnik ten jest brany pod uwagę jako jedno z wymagań szczegółowych przy certyfikacji domów pasywnych według PHI i nie powinien przekraczać  $n_{50} = 0,6/h$  (Szczechowiak, 2022). W prawie polskim (WT), konkretne poziomy szczelności są jedynie zalecane, pomimo opracowań, dowodzących ich wpływu na zużycie energii pierwotnej nawet na poziomie 15% (Nowak i Nowak-Dzieszko, 2014).

Kolejnym wskaźnikiem, mającym znaczenie dla gospodarki energetycznej jest współczynnik przepuszczalności promieniowania (g) dla przegród umożliwiających przenikanie energii słonecznej do wnętrza. Parametr ten jest kluczowy dla budynków z dużymi powierzchniami przeszklonymi, gdzie nadmierne nasłonecznienie może prowadzić do przegrzewania się wewnątrz i zwiększonego zapotrzebowania na klimatyzację. Odpowiednie zarządzanie promieniowaniem słonecznym może znacząco poprawić efektywność energetyczną, zwłaszcza w budynkach pasywnych.

Przy ocenie budynków brane są także pod uwagę parametry dotyczące instalacji takie jak: wydajność systemów wentylacji i klimatyzacji, zapotrzebowanie na energię do podgrzewania ciepłej wody użytkowej, wskaźnik efektywności oświetlenia, odzysk energii, zastosowanie odnawialnych źródeł energii.

### 3.5 Inne standardy energetyczne

Choć prawo polskie oraz regulacje Unii Europejskiej narzucają określone kryteria i metody oceny, istnieje wiele innych systemów i norm stosowanych na świecie, które oferują alternatywne podejścia do oceny zużycia energii i wpływu budynków na środowisko. Poznanie niektórych z tych standardów pozwoli na lepsze zrozumienie globalnych trendów oraz wyzwań związanych z wdrażaniem efektywności energetycznej w budownictwie.

#### 3.5.1 Klasy energetyczne

Jak wspomniano wcześniej, idea klasyfikacji energetycznej jest wspólna dla większości krajów, ale sposób jej realizacji oraz dokładność i metody oceny mogą się znacząco różnić, od prostych klasyfikacji po zaawansowane narzędzia obliczeniowe, co odzwierciedla lokalne priorytety i uwarunkowania budowlane. Podejście, które zostało zastosowane w polskim prawie, należy do rzadszych rozwiązań, gdyż większość krajów Wspólnoty zdecydowała się na stosowanie klas efektywności energetycznej (tabela 7), analogicznie do oznaczeń znanych np. ze sprzętów AGD. Przy klasyfikacji jest brana pod uwagę najczęściej ilość zużywanej energii pierwotnej, ale również inne czynniki, razem bądź każdy z osobna.

Tabela 7. Metody prezentacji wydajności energetycznej w Państwach Unii Europejskiej.  
Źródło: opracowanie własne na podstawie Kwiatkowski, Rucińska, 2020

państwo	metody prezentacji wydajności energetycznej
 Austria	Klasy od A++ do G (zapotrzebowanie na energię na ogrzewanie, energia pierwotna, emisje CO <sub>2</sub> , współczynnik efektywności energetycznej)
 Belgia (Flandria)	Skala ciągła (energia pierwotna)
 Belgia (Walonia, Bruksela)	Klasy od A++ do G (energia pierwotna)
 Chorwacja	Klasy od A+ do G (budynki mieszkalne- zapotrzebowanie na energię na ogrzewanie; budynki niemieszkalne- stosunek zapotrzebowania na energię na ogrzewanie ocenianego budynku do wartości referencyjnej)
 Czechy	Klasy od A+ do G (energia dostarczona, nieodnawialna energia pierwotna)
 Dania	Klasy od A do G (energia pierwotna)
 Francja	Klasy od A do G (energia pierwotna, emisje gazów cieplarnianych)
 Niemcy	Skala ciągła (energia pierwotna)
 Irlandia	Klasy od A+ do G (energia pierwotna) Skala ciągła (emisje CO <sub>2</sub> )
 Włochy	Klasy od A+ do G (energia pierwotna) Skala ciągła (energia pierwotna na ogrzewanie, chłodzenie i przygotowanie C.W.U)
 Malta	Skala ciągła (energia dostarczona, emisje CO <sub>2</sub> )
 Norwegia (poza UE)	Klasy od A do G (energia dostarczona)
 Polska	Skala ciągła (energia pierwotna)
 Rumunia	Klasy od A do G (energia dostarczona)
 Słowacja	Klasy od A0 do G (energia pierwotna, energia dostarczona) Skala ciągła (emisje CO <sub>2</sub> )
 Słowenia	Klasy od A1 do G (zapotrzebowanie na energię na ogrzewanie) Skala ciągła (energia pierwotna, energia dostarczona, emisje CO <sub>2</sub> )

Kolejne badania, jak piszą Jerzy Kwiatkowski i Joanna Rucińska, pokazują zalety stosowania etykiet energetycznych (Kwiatkowski i Rucińska, 2020). Według badania przeprowadzonego przez Xaveira Garcíę Casals, budynek, który charakteryzuje się jakimkolwiek rodzajem oceny energetycznej (czy to certyfikatem, czy etykietą), może wyróżniać się na tle innych budynków, co może zwiększyć jego wartość rynkową (Casals, 2006). Badanie przeprowadzone przez Hermanna Amecke w Niemczech wykazało, że większość nabywców budynków była świadoma istnienia certyfikatów charakterystyki energetycznej i korzystała z nich podczas procesu poszukiwań, jednakże certyfikaty te miały ograniczony wpływ na ich ostateczne decyzje zakupowe (Amecke, 2012). Podobne wyniki uzyskała Lorraine Murphy w oparciu o ankietę przeprowadzoną w Holandii (Murphy, 2014). Chociaż większość respondentów była świadoma informacji dotyczących charakterystyki energetycznej budynków, niewielu z nich korzystało z tych informacji przy wyborze nieruchomości.

W przeciwieństwie do badań Amecke i Murphy, badanie przeprowadzone przez Dirka Brounena i Nilsa Koka wykazało związek między wynikiem na etykiecie a cenami nieruchomości (Brounen i Kok, 2011). Sugerowali oni, że 4 na 17 nabywców byłoby skłonnych zapłacić wyższą kwotę za mieszkania charakteryzujące się wyższą klasą efektywności energetycznej na etykiecie. Podobne wyniki uzyskał Franz Fuerst z zespołem w przypadku budynków mieszkalnych w Anglii, gdzie ceny transakcyjne mieszkań ocenianych na A lub B są o 5% wyższe w porównaniu do mieszkań ocenianych na D (Fuerst i in., 2015). Dla mieszkań ocenianych na E i F stwierdzono negatywny związek między oceną energetyczną a ceną sprzedaży. Ponadto analiza holenderskiego rynku biurowego wykazała, że dla budynku o niższej klasie energetycznej, co oznacza, że jest on mniej efektywny energetycznie, koszty wynajmu są o 6 procent niższe w porównaniu z biurami o wyższych klasach energetycznych (Kok i Jennen, 2012).

Z analizy tych przypadków nasuwa się wniosek, że system ocen w określonej skali dla konsumentów w większości niedysponujących specjalistyczną wiedzą na temat energochłonności budynków jest przejrzysty i czytelny, co z pewnością spełnia założenie dyrektywy EPBD, jakim jest informatywny charakter certyfikacji energetycznej. Występują także głosy jednoznacznie uznające wyższość etykiet nad skalą ciągłą: *Wprowadzenie świadectw energetycznych przyczyniło się do zwiększenia wiedzy na temat jakości energetycznej certyfikowanych budynków. Niestety rezygnując z określania klasy energetycznej budynku i decydując o oparciu oceny na niejednoznacznych i nie do końca zrozumiałych wskaźnikach – dostęp do tej wiedzy bardzo utrudniono* (Sadowska, 2015).

### 3.5.2 Standard NF15 i NF40

W kontekście polskich standardów energetycznych warto wspomnieć o programie „Efektywne wykorzystanie energii. Dopłaty do kredytów na budowę domów energooszczędnych” prowadzonym przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) w latach 2014-2018. Program ten miał na celu wspieranie finansowe budowy i zakupu domów o wysokiej efektywności energetycznej, promując tym samym budownictwo energooszczędne w Polsce. Udzielane w ramach programu dopłaty do kredytów hipotecznych miały zachęcić inwestorów do stosowania technologii i rozwiązań, które ograniczają zużycie energii. Aby budynki mogły kwalifikować się do wsparcia finansowego, musiały spełniać szereg określonych wymagań. Przede wszystkim, musiały one osiągać standardy energetyczne NF40 lub NF15, co oznaczało, że zużycie energii na ogrzewanie, wentylację i przygotowanie ciepłej wody użytkowej nie mogło przekraczać odpowiednio  $40 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$  oraz  $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ . Projekty budowlane musiały być opracowane przez certyfikowanych specjalistów i spełniać surowe normy techniczne dotyczące efektywności energetycznej, a samo wykonanie budynków miało być zgodne z zatwierdzonymi projektami oraz standardami budowlanymi w zakresie energooszczędności. Kluczowym wymaganiem była również wysoka izolacyjność termiczna wszystkich elementów budynku, w tym ścian, dachów, podłóg oraz okien i drzwi, z określonymi maksymalnymi wartościami współczynnika przenikania ciepła (tabela 6).

Ważnym elementem była także szczelność powietrzna budynku, potwierdzana testem szczelności. Wartości graniczne wynosiły  $n_{50} = 1,0/\text{h}$  dla NF40 i  $n_{50} = 0,6/\text{h}$  dla NF15, co stanowi poziom budynku

pasywnego. Program promował również stosowanie nowoczesnych, wysokowydajnych systemów grzewczych i wentylacyjnych, często opartych na odnawialnych źródłach energii, takich jak pompy ciepła, panele słoneczne czy rekuperatory. Dodatkowo, wymagane było przeprowadzenie audytu energetycznego zarówno przed rozpoczęciem budowy, jak i po jej zakończeniu, aby potwierdzić zgodność budynku z wymogami programu. Inwestorzy byli zobowiązani do dostarczenia pełnej dokumentacji, w tym projektu budowlanego, świadectwa charakterystyki energetycznej oraz raportu z testu szczelności. Program preferował także stosowanie ekologicznych materiałów budowlanych, charakteryzujących się niskim śladem węglowym i wspierających zdrowe środowisko wewnętrzne budynków (Jadwiszczak, 2013). Wysokość dopłaty zależała od osiągniętego standardu i wynosiła:

- 30 tys. zł brutto dla budynków jednorodzinnych o standardzie NF40 ( $EU_{CO} \leq 40 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ ),
- 50 tys. zł brutto dla budynków jednorodzinnych o standardzie NF15 ( $EU_{CO} \leq 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ ),
- 11 tys. zł brutto dla mieszkań o standardzie NF40 ( $EU_{CO} \leq 40 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ ),
- 16 tys. zł brutto dla mieszkań o standardzie NF15 ( $EU_{CO} \leq 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ ).

Program został zakończony już w lipcu 2016, a w jego ramach wykorzystano poniżej 2% środków, które miały być na niego przeznaczone. Za jedną z przyczyn podawana jest zbyt mała wysokość dopłat w stosunku do wyznaczonych celów. Mimo niepowodzenia programu, założenia opracowane na jego potrzeby stanowią jedną z istotnych wytycznych energooszczędności budynków w polskim prawodawstwie.

### 3.5.3 Certyfikacja komercyjna na podstawie systemów wielokryterialnej oceny budynków

Omawiając systemy certyfikacji budynków, nie sposób pominąć komercyjnych systemów oceny jakości, które odgrywają dużą rolę na rynku nieruchomości (Promińska, 2021). Najpopularniejsze z nich, obok omówionego systemu certyfikacji budownictwa pasywnego PHI w Darmstadt to:

- **LEED** (Leadership in Energy and Environmental Design), stworzony przez U.S. Green Building Council, działa od 1998 roku i jest jednym z najbardziej rozpoznawalnych systemów certyfikacji na świecie. Początkowo rozwijany w USA, obecnie jest szeroko stosowany również w Europie, Azji i Ameryce Południowej. LEED znajduje zastosowanie w różnych segmentach budownictwa, w tym w budynkach komercyjnych, mieszkalnych, biurowych, a także w budynkach użyteczności publicznej. System ten ocenia budynki pod kątem zrównoważonego rozwoju, efektywności energetycznej, gospodarki wodnej, a także jakości środowiska wewnętrznego (Wodo, 2015).
- **BREEAM** (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), stworzony przez brytyjską organizację Building Research Establishment, jest najstarszym systemem oceny budynków, wprowadzonym w 1990 roku. BREEAM jest szeroko stosowany w Europie, zwłaszcza w Wielkiej Brytanii, ale zyskał również popularność w innych częściach świata, takich jak Bliski Wschód, Azja i Australia. W 2020 r. był najczęściej stosowanym systemem certyfikacji (899 projektów) (Kuczera, 2020). System uwzględnia kryteria takie jak efektywność energetyczna, zarządzanie odpadami, zdrowie i dobrostan użytkowników, a także innowacyjność. BREEAM jest szczególnie popularny w segmencie budynków biurowych, komercyjnych oraz budynków użyteczności publicznej, ale znajduje również zastosowanie w budownictwie mieszkaniowym.
- **WELL** Building Standard, stworzony przez International WELL Building Institute (IWBI) mający siedzibę w Nowym Jorku, został wprowadzony na rynek w 2014 roku i koncentruje się na ocenie budynków pod kątem zdrowia i dobrostanu ich użytkowników. WELL jest unikalny w tym, że skupia się głównie na aspektach związanych z komfortem, zdrowiem psychicznym i fizycznym, jakością powietrza, dostępem do światła naturalnego, wodą, odżywianiem oraz innymi czynnikami wpływającymi na zdrowie osób przebywających w budynku (Promińska, 2021). System ten jest szczególnie popularny w segmencie budynków biurowych, ale zyskuje na znaczeniu również w innych typach budynków, takich jak mieszkalne i edukacyjne.



W ostatnich latach w Polsce zdobywa popularność również Certyfikat Zielony Dom. Jako pierwsze kryterium stawia sobie „zastosowanie różnego rodzaju rozwiązań służących optymalizacji zużycia energii, co przełoży się na niższe miesięczne rachunki” (Franke i Kuczera, 2024).

Komercyjne systemy certyfikacji mają swoje niewątpliwe zalety, takie jak promocja zrównoważonych praktyk budowlanych, minimalizacja wpływu na środowisko oraz koncentracja na zdrowiu i dobrobycie użytkowników. Dają też wymierne korzyści bezpośrednio dla inwestorów, którymi są budowa prestiżu i reputacji firm dbających o środowisko, poprawa wartości rynkowej wznoszonych obiektów oraz uzyskiwanie korzystniejszych warunków finansowania. Nie należy jednak zapominać o wadach i ryzykach, które ze sobą niosą. Systemy certyfikacji opracowane w jednym kraju mogą nie w pełni odpowiadać specyficznym warunkom klimatycznym, kulturowym czy prawnym w innych regionach, co może ograniczać ich skuteczność i adekwatność. Ponadto, proces uzyskania certyfikatu może być kosztowny, obejmując opłaty za audyty, dokumentację oraz implementację wymaganych standardów, co może stanowić barierę dla mniejszych firm.

Jednak największym ryzykiem jest zjawisko „greenwashingu” polegające na tym, że niektóre projekty mogą otrzymywać certyfikaty w wyniku spełnienia formalnych wymogów, niż rzeczywistego wpływu na środowisko. Krytycy zwracają uwagę na niedostateczne realizowanie założeń projektowych oraz nieprawidłową eksploatacją zielonych budynków, połączone z nadmierną kapitalizacją zysków płynących z nadania certyfikatu (Schoeman i Gunter, 2018). Inni zwracają uwagę, że wiele praktyk, takich jak narzędzia do oceny zrównoważonego rozwoju, zyskało na tyle dużą sławę w branży, że samo przeprowadzenie procesu certyfikacji przynosi wymierne korzyści bez zagłębiania się w faktyczne wyniki i uzyskaną ocenę (Simó Miñana, 2024). Na problemy, jakimi jest fakt certyfikacji na podstawie projektu, a nie już funkcjonującego budynku oraz zjawiska „łapania punktów” za rozwiązania, które nie podnoszą rzeczywistej efektywności obiektu, zwraca także uwagę Anna Bać (Bać, 2014). Opisuje praktyki zdobywania punktów potrzebnych do uzyskania świadectw certyfikacyjnych uzyskiwane za pomocą działań pozornych lub mało znaczących, w zastępstwie podniesienia faktycznej efektywności energetycznej obiektów. Zaznacza jednak, że systemy certyfikacji podlegają ciągłej modyfikacji (Promińska, 2023), aby zapobiegać takim praktykom i osiągać lepszą skuteczność.

### 3.5.4 Inne opracowania

Cały czas podejmowane są próby adaptacji klas energetycznych stosowanych w wielu krajach Europy na polskie warunki. Jako przykład można przywołać niedawną propozycję, przedstawioną przez Krajową Agencję Poszanowania Energii (KAPE). Proponowana klasyfikacja jest oparta na wskaźniku EP i dotyczy budynków mieszkalnych jedno- i wielorodzinnych i jest przedstawiona w poniższej tabeli.

Tabela 8. Proponowane klasy energetyczne w Polsce dla budynków jednorodzinnych i wielorodzinnych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://kape.gov.pl/event/dyrektywa-epbd-propozycja-systemu-klas-energetycznych-dla-budynkow-w-polsce-60/register>

Klasa budynku jednorodzinnego		Klasa energetyczna budynku wielorodzinnego	
A+	EP < 0	A+	EP < 0
A	0 < EP < 63	A	0 < EP < 59
B	63 < EP < 157	B	59 < EP < 141
C	157 < EP < 250	C	141 < EP < 223
D	250 < EP < 344	D	223 < EP < 305
E	344 < EP < 438	E	305 < EP < 387
F	438 < EP < 531	F	387 < EP < 469
G	531 < EP	G	469 < EP

Należy zauważyć, że według propozycji wszystkie nowo budowane budynki mieszkalne byłyby zaklasyfikowane jako budynki klasy B, A lub A+, ze względu na maksymalne wartości EP wynoszące

odpowiednio 70 i 65 kWh/(m<sup>2</sup> · rok) dla domów jedno- i wielorodzinnych (tabela z rozdz. 3.2.2). Do tych samych kategorii zaliczone byłby także wszystkie budynki zbudowane po roku 2014. Proponowana skala objęłaby swoją użytecznością głównie budynki istniejące, w szczególności te wybudowane przed wprowadzeniem wymogów dotyczących maksymalnego zapotrzebowania na energię pierwotną. Implementacja takiej skali mogłaby potencjalnie stymulować poprawę efektywności energetycznej lokali na wtórnym rynku nieruchomości.

Jedną z ciekawszych prób podejścia do tematu klas energetycznych w Polsce są badania przeprowadzone przez Jerzego Kwiatkowskiego i Joannę Rucińską, które miały na celu oszacowanie limitów klas efektywności energetycznej oraz wskaźnika zapotrzebowania na energię dla budynków wielorodzinnych w Polsce (Kwiatkowski i Rucińska, 2020). Wykorzystano budynek referencyjny i opracowano 180 wariantów obliczeniowych, które uwzględniały następujące zmienne: 3 rodzaje danych klimatycznych, 4 wartości współczynników kształtu budynku, 3 rodzaje wentylacji, 3 standardy przenikalności cieplnej oraz 3 współczynniki powierzchni okien w stosunku do ściany zewnętrznej. W badaniu, kryterium determinującym konkretne kategorie efektywności jest energia użytkowa  $EU_c$  wymagana na cele ogrzewania. Bazowe modele zakładają wartości  $U$  jako zgodne z minimum określonym w WT (tabela 6, str. 45) z wariantami o 25% wyższym i niższym. Do przeprowadzenia ocen użyto metody obliczeniowej, zgodnej z ustawą o charakterystyce energetycznej, na podstawie normy (PN-EN ISO 52016, 2017). Metodologia (tabela 9) wyznaczenia wartości granicznych poszczególnych klas, opisana w normie (PN-EN ISO 52003, 2017) zakłada stosowanie do oceny wartości referencyjnych:

$R_r$  - reprezentująca wymagania dla nowych lub modernizowanych budynków. Jest to główny punkt odniesienia wykorzystywany do oceny charakterystyki energetycznej budynku

$R_s$  - reprezentujący średni stan zasobu budowlanego jako punkt odniesienia. Odpowiada on średniej efektywności energetycznej około 50% krajowego lub regionalnego zasobu (wartość mediany). Wartość ta może na przykład odnosić się do zapotrzebowania na energię, przenikalności cieplnej przegród lub całkowitej wydajności systemów technicznych i być określana dla różnych typów budynków.

Tabela 9. Klasy energetyczne określone w oparciu o wartości referencyjne wg wymogów prawnych i wg zasobu budowlanego.

Źródło: opracowanie (Kwiatkowski i Rucińska, 2020)

klasy energetyczne określone na bazie o wartości referencyjne			
wg wymogów prawnych	wg zasobu budowlanego		
A	$<0.71 \cdot R_r$	A	$<0.35 \cdot R_s$
B	$<1.00 \cdot R_r$	B	$<0.50 \cdot R_s$
C	$<1.41 \cdot R_r$	C	$<0.71 \cdot R_s$
D	$<2.00 \cdot R_r$	D	$<1.00 \cdot R_s$
E	$<2.83 \cdot R_r$	E	$<1.41 \cdot R_s$
F	$<4.00 \cdot R_r$	F	$<2.00 \cdot R_s$
G	$\geq 4.00 \cdot R_r$	G	$\geq 2.00 \cdot R_s$

Wartość współczynnika zgodnego z wymogami dla nowych i modernizowanych budynków stanowi dolną granicę klasy B, co jest sytuacją analogiczną do propozycji przedstawionej przez KAPE (tabela 8), natomiast wartość mediany efektywności energetycznej dla wszystkich budynków w Polsce stanowi dolną granicę klasy D. Wyniki wykazały, że największy wpływ na zapotrzebowanie na energię wykorzystywaną do ogrzewania miał rodzaj zastosowanej wentylacji i lokalny klimat. Uzyskane z 180 iteracji wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania wykorzystano do opracowania wartości granicznych klas efektywności energetycznej. Średnia wartość ze wszystkich wyników wskaźnika zapotrzebowania na energię grzewczą została wykorzystana jako wartość referencyjna  $R_r$ .

Głównym celem tego opracowania było ustalenie klas efektywności energetycznej dla wielorodzinnych budynków mieszkalnych w Polsce. Ze względu na brak danych o istniejących zasobach budowlanych, zastosowano metodę obliczeniową dla czterech reprezentatywnych budynków. Uwzględniono różne zmienne, takie jak dane klimatyczne, współczynnik kształtu budynku, system wentylacji, współczynnik przenikania ciepła oraz powierzchnię okien, co pozwoliło na zróżnicowanie bazy danych. Wyniki wykazały, że średni wskaźnik zapotrzebowania na energię wyniósł 65,91 kWh/(m<sup>2</sup> · rok), przy czym największy wpływ na wynik miała wentylacja, a najmniejszy- powierzchnia okien.

Zaproponowane limity klas efektywności energetycznej odpowiadają obecnym standardom, z możliwością dodania klasy A+ dla budynków pasywnych (tabela 10). W ocenie autora przeprowadzona próba wprowadza wartościowy wkład w dyskurs dotyczący etykiet energetycznych i przejrzystości informacji na ten temat, co jest jednym z głównych celów wprowadzanych od przeszło dwóch dekad przepisów. Duży nacisk położony na dostosowanie założeń do realiów polskich zarówno pod względem klimatycznym, prawnym i rynkowym, stanowi wartość i wykazuje potencjał wdrożeniowy. Ponadto, wybór współczynnika EU<sub>c</sub> skupia istotę opracowania w większej części na branży architektury niż instalacji, co jest spójne z założeniami niniejszej dysertacji.

*Tabela 10. Klasy energetyczne budynku.*

*Źródło: opracowanie (Kwiatkowski i Rucińska, 2020)*

Klasa energetyczna budynku		
A	0	< EU <sub>c</sub> < 45
B	45	< EU <sub>c</sub> < 65
C	65	< EU <sub>c</sub> < 95
D	95	< EU <sub>c</sub> < 130
E	130	< EU <sub>c</sub> < 185
F	185	< EU <sub>c</sub> < 265
G	265	< EU <sub>c</sub>

### 3.6 Wnioski i dyskusja

Wprowadzenie obowiązkowej certyfikacji budynków to z pewnością krok w kierunku przejrzystości sprawności energetycznej nowo powstających obiektów. Znajomość jakości energetycznej budynku (lub lokalu) powinna wpływać na odpowiednie dostosowanie cen zakupu lub wynajmu, zgodnie z zasadą, że lepsza jakość energetyczna oznacza niższe koszty eksploatacji, a tym samym wyższą cenę sprzedaży lub wynajmu. Aby cele certyfikacji zostały osiągnięte, wskaźniki używane w świadectwach muszą być jednoznaczne i zrozumiałe, najlepiej służąc celom, dla których zostały określone (Sadowska, 2015). Na podstawie wyników testów związanych z wdrażaniem dyrektywy EPBD, dotyczącej efektywności energetycznej budynków, przeprowadzonych w Polsce przez Dolnośląską Agencję Energii i Środowiska (dotyczących budynków mieszkalnych o łącznej powierzchni przekraczającej 150 tys. m<sup>2</sup>), stwierdzono, że informowanie kupujących o energochłonności budynku prowadzi do większego zainteresowania budynkami o wysokiej efektywności energetycznej (Amecke, 2012; Brounen i Kok, 2011; Casals, 2006; Murphy, 2014; Żurawski, 2009).

Charakterystyka energetyczna jest w swoim założeniu narzędziem do weryfikacji założeń projektowych i ma potencjał do sprawdzenia, czy dane rozwiązania nadają się do zastosowania w konkretnej lokalizacji i obiekcie. Obowiązująca legislacja zostawia w rękach projektantów kwestię podjęcia odpowiednich decyzji, narzucając jednak sztywne parametry w paru aspektach. W przypadku skomplikowanych struktur budynków lub zaawansowanych systemów instalacyjnych, które są bardziej podatne na błędy w obliczeniach metodą bilansową miesięczną, optymalnych rozwiązań poszukuje się przy użyciu dynamicznych modeli energetycznych w narzędziach symulacyjnych (Nowak, 2020).

Wprowadzenie dodatkowych wymagań częściowych, dotyczących współczynnika U stwarza także zagrożenie podejścia do projektowania zakładającego, że w przypadku zapewnienia odpowiedniej

izolacyjności przegród bilans EP będzie także spełniał wymagania. Ponadto, intencją zawartą w dyrektywie, jest stworzenie jasnej i przejrzystej informacji o energochłonności budynków i lokali w celu oszacowania kosztów utrzymania, które są jednym z kluczowych aspektów przy ocenie wartości rynkowej. Jednak rozłożenie energochłonności nie jest równomierne, ale świadectwo charakterystyki w przypadku nowo powstających struktur sporządza się ogólnie dla całego obiektu, co w przypadku budynków mieszkalnych wielorodzinnych stanowi duże uproszczenie i może wprowadzać w błąd. Dla przykładu, w symulacji przeprowadzonej przez J. Żurawskiego ilość energii potrzebna na cele ogrzewania i wentylację lokali o powierzchni 50 m<sup>2</sup> położonych w różnych częściach budynku waha się od 61 do 131 kWh/(m<sup>2</sup> · rok), co stanowi różnicę na poziomie 75% w stosunku do całego budynku (Żurawski, 2009).

Tabela 11. Zestawienie wyników obliczeń na zapotrzebowanie na EK dla różnie zlokalizowanych mieszkań i całego budynku.

Źródło: (Żurawski, 2009)

położenie mieszkania	powierzchnia	kubatura	straty ciepła	sprawność CO	energia końcowa EK	Rozrzut EK
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	GJ	%	kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)	%
mieszkanie w środku, międzykondygnacyjne	50,00	150,00	9,40	0,86	60,91	- 35 %
mieszkanie nad piwnicą, przy ścianie szczytowej	50,00	150,00	20,20	0,86	130,89	40 %
mieszkanie na ostatniej kondygnacji, przy ścianie szczytowej	50,00	150,00	18,60	0,86	120,52	29 %
cały budynek, 2 klatki 4 kondygnacje, 24 mieszkania	1200,00	3600,00	345,60	0,86	93,31	0 %

Wymóg sporządzania certyfikatów spotkał się z mieszanym odbiorem, podkreślając potrzebę dalszej dyskusji i ewentualnych modyfikacji w systemie oceny. Źródła krytyki obejmują różne obszary i wskazują na ważne merytoryczne aspekty, które obnażają słabości systemu sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej. Przede wszystkim, w większości przypadków certyfikacja nie jest procesem optymalizacyjnym, prowadzonym równocześnie w projekcie od samego jego początku. Opracowanie świadectwa energetycznego następuje często na podstawie zaawansowanej dokumentacji technicznej budynku lub inwentaryzacji techniczno-budowlanej. Certyfikat taki stanowi więc rodzaj ekspertyzy dokonywanej przez podmiot uprawniony do jego wydania (Chruściel, 2023). Henryk Kwapisz podaje 3 kolejne przyczyny, z powodu których system certyfikacji w Polsce nie działa tak jak powinien.

Jako pierwszy powód wskazuje nieczytelną formę świadectw, która nie generuje poprawy efektywności energetycznej budynków, ale kreuje je jako niezrozumiały obowiązek formalny. Ponadto, wg ustawy o charakterystyce energetycznej budynków (*Dz.U. 2014 poz. 1200*, 2014), urzędy publiczne powinny w swoich budynkach umieszczać w widocznym miejscu świadectwo, natomiast deweloper w reklamie swojej inwestycji powinien informować o charakterystyce energetycznej oferowanego obiektu. Ani jeden, ani drugi zapis nie jest respektowany, z powodu nieegzekwowania tego prawa przez odpowiednie władze.

Drugą przyczyną jest ukazywanie świadectw jako narzucone przez UE zbędne wymaganie, które prowadzi do wzrostu kosztów inwestycji. Tymczasem nikt nie informuje, że jest to narzędzie, które umożliwia kupującemu wybór, np. mieszkania, przez porównanie odpowiednich wskaźników określających, jakie jest zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, przygotowania ciepłej wody i oświetlenia.

Trzecim problemem jest zawiły charakter współczynnika EP, który nie pozwala oszacować kosztów eksploatacji obiektu, a taka informacja jest zazwyczaj jedną z najbardziej istotnych dla potencjalnego nabywcy. Najbardziej istotne dla przeciętnego użytkownika są: energia końcowa EK – bo jako wartość zaprojektowanej ilości energii dostarczanej do budynku, dzięki pomnożeniu przez cenę danego nośnika, pozwoli uzyskać koszt, jaki zostanie poniesiony na energię, energia użytkowa EU – bo pokazuje, jak dobrze zaprojektowany jest budynek (Kwapisz, 2020).

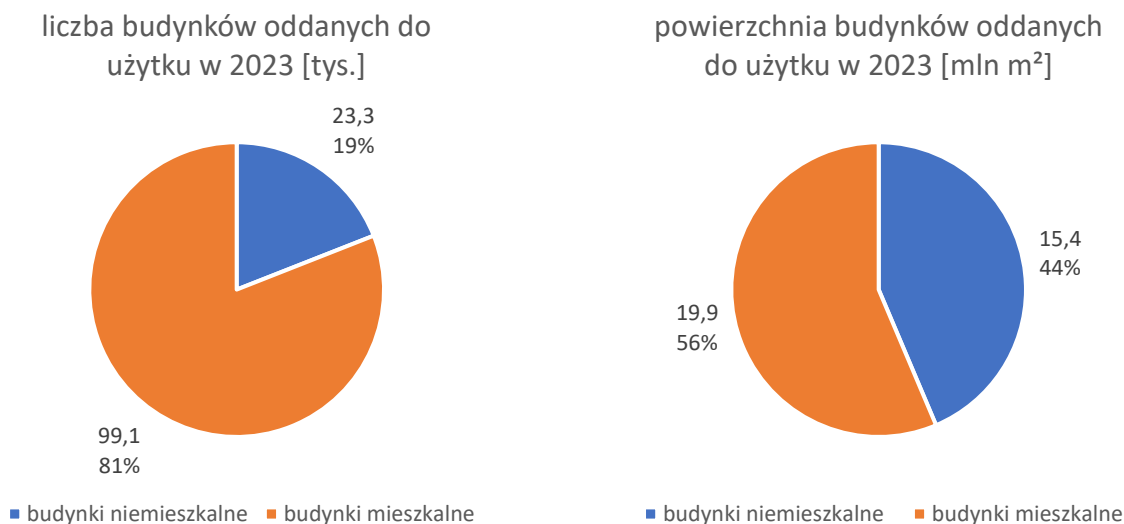
## ROZDZIAŁ 4. PRAKTYKA PROJEKTOWA A TECHNOLOGIA BIM

### 4.1 Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale zaprezentowano charakterystykę praktyki architektonicznej w Polsce. Projekty budynków mieszkalnych stanowią przeważający udział we współczesnym projektowaniu (co poparto danymi statystycznymi). Wynika to z zapotrzebowania na komercyjnym rynku mieszkaniowym. Na tym tle omówiono metody optymalizacji energetycznej i potencjał ich wykorzystania na poszczególnych etapach procesu projektowo-budowlanego. Zagadnienie zostało następnie przeanalizowane w kontekście technologii BIM, używanej przy ich zastosowaniu.

### 4.2 Charakterystyka polskiego zasobu mieszkaniowego

Od wprowadzenia pierwszej unijnej dyrektywy EPBD minęło ponad 20 lat. Jej założenia były implementowane w prawo polskie, dlatego wskazana jest analiza obecnego stanu rynku. W roku 2023 do użytkowania oddano 23,3 tys. nowych budynków niemieszkalnych o łącznej powierzchni 15,4 mln m<sup>2</sup> oraz 99,1 tys. nowych budynków mieszkalnych o łącznej powierzchni 19,9 mln m<sup>2</sup> (ilustracje 21 i 23).



Ilustracja 21. Liczba budynków oddanych do użytku w 2023 roku [tys].

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

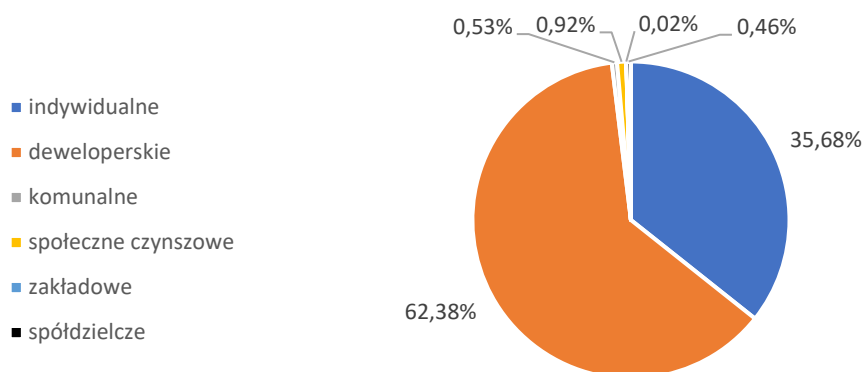
Ilustracja 22. Powierzchnia budynków oddanych do użytku w 2023 roku [mln m<sup>2</sup>].

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

Z obu wykresów wynika, że budownictwo mieszkaniowe jest obecnie dominującą formą na rynku. Biorąc pod uwagę okres pięcioletni, należy zauważyć, że rok 2023 był pierwszym, w którym odnotowano spadek liczby i powierzchni użytkowej mieszkań przekazanych do eksploatacji. Spadek ten był na tyle znaczący, że w efekcie zarówno liczba, jak i powierzchnia mieszkań odnotowana w 2023 r. były niższe niż średnia pięcioletnia dla każdej z kategorii danych. Dane z jednego roku to zbyt mało, by mówić o odwróceniu trendu wzrostowego dla budownictwa mieszkaniowego, ale na pewno mamy do czynienia z jego wyhamowaniem. Charakter oddanych mieszkań rozdzielił się mniej więcej po połowie, między budynki jednorodzinne i wielorodzinne, z delikatną przewagą tych drugich (51,6%).

Należy także podkreślić fakt, że wśród omawianych gospodarstw domowych ponad 62% zostało zrealizowane jako przeznaczone na sprzedaż lub wynajem, co wskazuje na absolutną dominację budownictwa deweloperskiego w Polsce (ilustracja 24). Analizując lata 2019-2023, deweloperzy wybudowali średniorocznie 140 tys. lokali. Znamienne dla krajowej sytuacji mieszkaniowej jest to, że liczba mieszkań zrealizowanych w pozostałych formach budownictwa – społecznym, spółdzielczym, komunalnym i zakładowym, jest marginalna, a sytuacja ta nie zmieniła się w ciągu ostatnich lat. Łączne udziały tych form budownictwa wyniosły od 1,6% (2022 r.) do 3,3% (2019 r.).

### mieszkania oddane do użytku w 2023 wg formy budownictwa

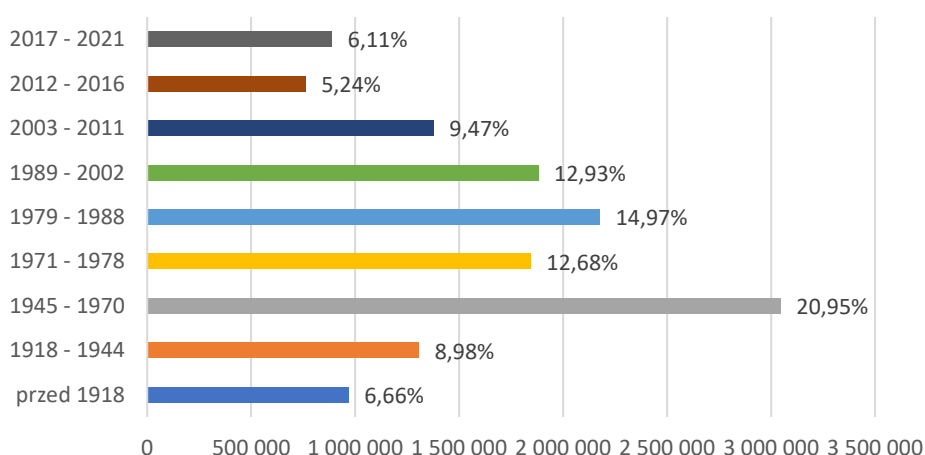


Ilustracja 23. Mieszkania oddane do użytku w 2023 wg formy budownictwa.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

Analizując aktualny stan rynkowy, należy wziąć także pod uwagę istniejący zasób mieszkaniowy. Dane pozyskane w narodowym spisie powszechnym pokazują strukturę wiekową lokali istniejących (ilustracja 25). Ze zgromadzonych danych wynika, że prawie połowę polskiego zasobu stanowią mieszkania wybudowane w okresie PRL (48,59%), a przed końcem II wojny światowej powstało ok. 15% zamieszkałych lokali. Pokazuje to, jak istotny wpływ na łączną ilość energii konsumowanej w mieszkalnictwie może mieć proces termomodernizacji budynków istniejących, ponieważ restrukturyzacja prawa budowlanego w zakresie wymagań dla powstających obiektów, miała wpływ na ok 10% budynków, bez uwzględnienia modernizacji istniejących. Potwierdzają to Anna Lis i Piotr Lis, w badaniach, przeprowadzonych na podstawie danych statystycznych, jednocześnie szacując, że doprowadzenie wszystkich budynków do aktualnych wymogów prawnych stawianych nowym budynkom, mogłoby zredukować ilość energii zużywanej do ogrzewania budynków mieszkalnych o 67,5%. Szacowana oszczędność energii stanowi 23% całkowitego zużycia energii w Polsce (Lis i Lis, 2018).

### Polski zasób mieszkaniowy wg roku budowy



Ilustracja 24. Polski zasób mieszkaniowy wg roku budowy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

Warto także zauważyć, że w ostatnich latach tempo powstawania nowych mieszkań jest najwyższe od lat 80. ubiegłego wieku, co wykazuje potencjał we wprowadzaniu kolejnych regulacji i udoskonalaniu procesu certyfikacji energetycznej. Dla pełnego obrazu sytuacji, należy dodać, że w 2021, nieco ponad 40% mieszkań znajdowało się w budynkach jednorodzinnych, co oznacza, że większość populacji zamieszkuje budynki wielorodzinne (GUS, 2024b).

### 4.3 Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych

Efektywność energetyczna w Polsce stale, na przestrzeni lat się polepsza, czego przyczyny należy upatrywać w sukcesywnej realizacji polityki klimatycznej. Dla przykładu, efektywność w 2022 r. wzrosła o 0,9% w stosunku do 2021, a energochłonność finalna PKB spadła o 2,4% (GUS, 2024c). Należy się jednak przyjrzeć, jak rozkłada się zużycie energii na poszczególne cele, aby wyciągnąć wnioski, które wydatki wynikają z kształtowania architektury budynków i są bezpośrednim następstwem konkretnych decyzji projektowych.

Jak podaje GUS, udział procentowy energii zużywanej w gospodarstwach domowych wygląda następująco:

Tabela 12. Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych wg kierunków użytkowania [%].

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ogółem	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ogrzewanie pomieszczeń	66,1	68,5	66,4	66,1	65,4	62,6
Ogrzewanie wody	16,2	15,5	16,1	16,3	17,1	18,7
Gotowanie posiłków	8,0	7,4	8,1	8,1	8,3	9,0
Oświetlenie i urządzenia elektryczne	9,7	8,7	9,3	9,5	9,2	9,6

Biorąc pod uwagę, że wydatki dotyczące gotowania posiłków, oświetlenia i urządzeń elektrycznych pozostają na podobnym poziomie, można zauważyć spadek ilości energii zużywanej na cele ogrzewania pomieszczeń z ok. 190 kWh/(m<sup>2</sup> · rok) w 2018 do ok 157 kWh/(m<sup>2</sup> · rok) w roku 2022 (wartości przeliczone z kgoe/m<sup>2</sup> z danych GUS, uwzględniających korektę klimatyczną stopniodni grzania). Należy jednak zauważyć, że pomimo procentowego spadku, ogrzewanie pomieszczeń w dalszym ciągu jest odpowiedzialne za konsumpcję ponad połowy energii w gospodarstwach domowych. Jest to jednak wartość średnia, dotycząca wszystkich mieszkań w Polsce, które w znacznej większości powstawały przed rokiem 2003.

Inaczej sytuacja wygląda w nowo powstających budynkach wielorodzinnych, które realizowane są w oparciu o najnowsze wytyczne. W tym przypadku, udział energii potrzebnej na ogrzewanie i wentylację często jest porównywalny z energią potrzebną do przygotowania ciepłej wody użytkowej, a czasem wręcz dużo niższy, co ukazane jest w poniższej tabeli, dla przykładowego budynku.

Tabela 13. Zapotrzebowanie energetyczne dla budynku spełniającego szczegółowe wymagania WT 2021.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Trząski 2021)

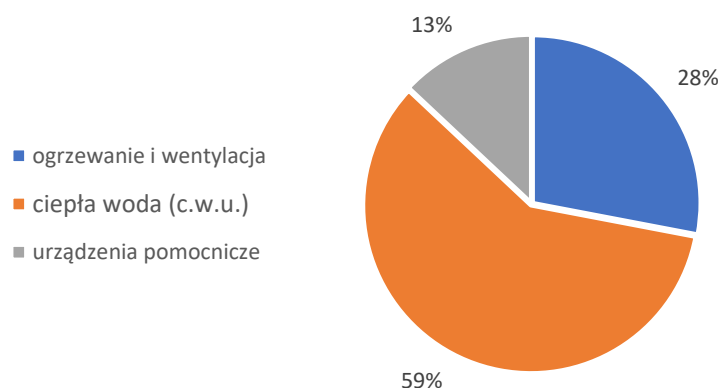
cel	jednostka	EU	EK	EP
ogrzewanie i wentylacja	kWh/(m <sup>2</sup> · rok)	17,9	22,3	24,5
ciepła woda		24,1	46,0	50,6
urządzenia pomocnicze		3,6	3,6	10,7
suma		45,6	71,9	85,8

Taki rozkład zużycia energii można zaobserwować w analizie hipotetycznego budynku mieszkaniowego spełniającego wymagania zwarte w WT od początku 2021. Analizowany przykład opisany jest szerzej w podrozdziale 5.2.1 (Trząski, 2021). W celach porównawczych energia zużywana na gotowanie, oświetlenie i urządzania może być pominięta, gdyż jej wartość jest rezultatem zachowań poszczególnych użytkowników i nie jest bezpośrednio związana z okresem budowy mieszkania.

Rezultat obliczeń pokazuje, że największy udział w konsumpcji energii ma instalacja ciepłej wody użytkowej, co mocno odbiega od krajowej średniej struktury zużycia energii na poszczególne cele. Także w budynkach energooszczędnych i pasywnych podstawową pozycją bilansu energetycznego staje się

zapotrzebowanie ciepła na podgrzewanie wody. Obserwacje te są zbieżne z badaniami przeprowadzonych przez M. Kasperkiewicza, opisanych szczegółowo w podrozdziale 5.2.2 (Kasperkiewicz, 2007).

Struktura zapotrzebowania na EP [%]



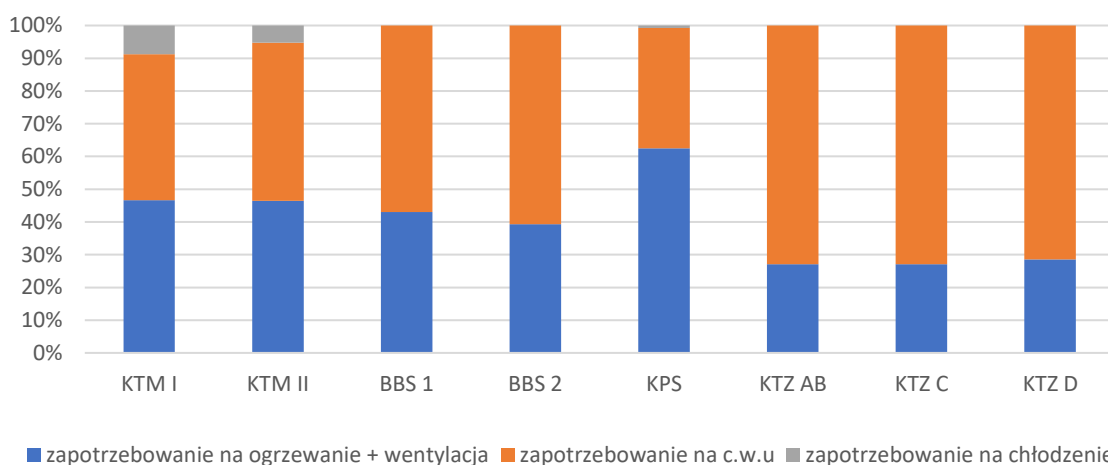
Ilustracja 25. EP - struktura zapotrzebowania.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kasperkiewicz, 2007)

W celach porównawczych analizie poddano także dane ze świadectw charakterystyki energetycznej sporządzonych dla 8 projektów budynków mieszkalnych wielorodzinnych o powierzchniach powyżej 6000m<sup>2</sup>, w tworzenie których autor był bezpośrednio zaangażowany w trakcie praktyki zawodowej. Budynki były realizowane w Polsce w latach 2018 – 2024, w oparciu o obowiązujące przepisy.

Z wykresu (ilustracja 27) wynika, że zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzewania i wentylacji nie jest w większości przypadków dominujące, co jest spowodowane stosowaniem coraz bardziej wydajnych systemów wentylacyjnych oraz skuteczniejszej izolacji przegród zewnętrznych. Drugim wnioskiem jest wzrost udziału energii potrzebnej do ogrzewania ciepłej wody w energetycznym bilansie budynku, powodując, że jego efektywność energetyczna zależy w dużej mierze od efektywności samych systemów, zmieniając proporcję w tym zakresie między architekturą a branżami instalacyjnymi.

Porównanie zużycia energii na poszczególne cele (EK)



Ilustracja 26. Porównanie zużycia energii na poszczególne cele (EK).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z charakterystyk energetycznych projektowanych obiektów



## 4.4 Metody optymalizacji energetycznej

Znając rozłożenie zapotrzebowania energetycznego w budynkach, należy przeanalizować metody, którymi może zostać ono zmniejszone. Optymalizacja zużycia energii polega na uzyskaniu jak największej efektywności energetycznej, czyli zmniejszenia ilości energii potrzebnej do osiągnięcia założonych celów dzięki stosowaniu odpowiednich strategii. W zależności od wybranego kryterium, można je podzielić na pasywne i aktywne, high-tech i low-tech lub na rozwiązania architektoniczne, budowlane, instalacyjne i technologiczne. Wykorzystanie wszystkich tych metod służy ograniczeniu kosztów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych wydatkowanych na energię związaną z funkcjonowaniem obiektów w całym cyklu życia, natomiast aktywne rozwiązania pełnią rolę wsparcia dla systemów pasywnych, służąc poprawie i regulacji komfortu użytkownika budynków. Ponadto, rozwiązania materiałowe oraz eksploatacja obiektów w całym cyklu życia nie powinny pogarszać środowiska do życia (ludzi i ekosystemów) obecnie i w przyszłości, a wszystkie rozwiązania powinny stanowić kompromis między spełnianiem oczekiwań wszystkich jej interesariuszy, wymagań prawa, budżetu i zapewnieniem funkcjonowania na racjonalnie niskim poziomie (Bać, 2020b).

W sektorze mieszkaniowym wielkość i lokalizacja są kluczowymi czynnikami wpływającymi na zużycie energii. Małe mieszkania potrzebują mniej energii, ponieważ mają mniejszą powierzchnię regulacji temperatury, mniejszą powierzchnię przenikania, a także mniej mieszkańców. Ilość i rodzaj energii zużywanej w mieszkaniach są głównie związane z pogodą, projektem architektonicznym, systemami energetycznymi i poziomem ekonomicznym mieszkańców (Pérez-Lombard i in., 2008).

W ujęciu architektonicznym Katarzyna Zielonko-Jung dzieli strategie optymalizacyjne na pięć grup (Zielonko-Jung, 2013). Są to:

- otoczenie budynku,
- forma,
- rozplanowanie funkcji,
- rozwiązania przestrzenne wnętrza,
- obudowa zewnętrzna.

Proponowane metody leżą w zakresie kompetencji architekta i dotyczą różnych etapów projektowania, od ogólnych koncepcji po ustalanie szczegółów dotyczących konkretnych parametrów technicznych. Spośród pięciu wymienionych wyżej grup rozwiązań pierwsze cztery bezpośrednio dotyczą fazy koncepcyjnej jako tej, w której zapadają najważniejsze decyzje projektowe. Kwestie związane z elewacją autorka opisuje jako szczególnie istotne, ale przez to wymagające dużego uszczegółowienia. Jednocześnie zwraca uwagę na fakt, że często jest to jedyny element architektoniczny, który można poddać optymalizacji ze względu na ograniczenia wynikające z charakteru inwestycji, funkcji, zakresu czy uwarunkowań lokalnych. Wskazuje, że decyzje projektowe powinny zmierzać do maksymalnego wykorzystania lokalnych warunków klimatycznych w celu pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł. Priorytetem jest pasywne pozyskiwanie energii, takie jak korzystanie z promieniowania słonecznego do oświetlania wnętrz światłem dziennym oraz ogrzewania pomieszczeń w okresach zimowych i przejściowych, a także wykorzystanie wiatru do naturalnej wentylacji (Zielonko-Jung, 2020).

Działania związane z otoczeniem budynku to przede wszystkim wykorzystywanie lub redukcja wpływu promieni słonecznych i wiatru, w zależności od potrzeb konkretnej przestrzeni. Elementy, które mogą służyć tym działaniom, to ukształtowanie terenu, zbiorniki wodne, zieleń wysoka i niska, rodzaj nawierzchni oraz zabudowa sąsiadująca.

Grupa rozwiązań związanych z formą to przede wszystkim dążenie do zwartości formy, powiększanie lub pomniejszanie ekspozycji słonecznej w zależności od potrzeb oraz optymalizacja układów aerodynamicznych. Dzięki odpowiedniemu kształtowaniu bryły możliwa jest minimalizacja strat ciepła, otwarcie lub ochrona przed zyskami energii oraz wykorzystanie lub ochrona przed wiatrem. W polskim klimacie wskazane jest dążenie do większej zwartości bryły i maksymalizacja zysków słonecznych, należy jednak pamiętać o ryzyku przegrzewania, przy którym konieczne są zabiegi odwrotne.

Rozplanowanie funkcji mieszkaniowych jest podporządkowane konieczności doprowadzenia wystarczającej ilości światła dziennego do pomieszczeń dziennych, co raczej wymusza stosowanie płytkich traktów. Pomieszczenia takie jak: sanitariaty, klatki schodowe, pomieszczenia magazynowe i gospodarcze, światła nie wymagają, natomiast bardzo ważny jest rozdział na strefy według pory zapotrzebowania na dostęp światła. Efektywność energetyczna może być wspomagana poprzez ułatwienie naturalnej wymiany powietrza pomiędzy przeciwległymi elewacjami a także ochronę przeciwsłoneczną elewacji południowych.

Kształtowanie przestrzeni wewnętrznej budynku jest powiązane z rozplanowaniem funkcji, ale możliwe jest także wprowadzanie elementów szklarniowych lub kominowych. Poprzez stosowanie ogrodów zimowych, atriów, loggii, możliwe jest wykorzystanie tych przestrzeni jako kolektorów bądź buforów termicznych, a także wspomaganie wentylacji naturalnej.

Obudowa zewnętrzna budynku ma bardzo duże znaczenie energetyczne a zarazem stanowi jedyny element architektoniczno-materiałowy budynku, którego wybrane parametry bezpośrednio związane z kwestiami energooszczędności są regulowane przez obowiązujące przepisy. Kluczowe zagadnienia związane z projektowaniem przegród zewnętrznych to dobór właściwości materiałów pod względem izolacyjności termicznej i akumulacji ciepła, proporcje powierzchni pełnych i przeszklonych, parametry przenikania energii słonecznej do wnętrza przez szklenia i regulacja zacieniania elewacji. Dla budynków mieszkalnych o relatywnie niskich zyskach cieplnych wskazane jest wykorzystanie przeszkleń jako pasywnych kolektorów ciepła. Katarzyna Zielonko-Jung, na podstawie źródeł (Dulak i Żuchowski, 2013; Hausladen i in., 2008; Laskowski, 2008) wypracowała zalecenia dotyczące proporcji powierzchni przeszklonych do pełnych, przedstawione w poniższej tabeli.

*Tabela 14. Zalecenia dotyczące proporcji powierzchni przeszklonych do pełnych.*

*Źródło: opracowanie własne na podstawie na podstawie Zielonko-Jung oraz danych przywołanych w Dulak i Żuchowski, Hausladen i in, Laskowski.*

ELEWACJA	UDZIAŁ PRZESZKLEŃ	ROLA ENERGETYCZNA
południowa (S)	30- 50%	źródło pasywnych zysków cieplnych z energii słonecznej, oświetlenie wnętrz światłem dziennym
	50- 100%	jako pasywny kolektor ciepła (konieczne rozwiązania chroniące przed przegrzewaniem, np. możliwość intensyfikacji wentylowania latem, elementy akumulujące ciepło, zewnętrzne systemy zacieniające)
wschodnia (E) zachodnia (W)	20- 50%	pasywne zyski cieplne z energii słonecznej, oświetlenie wnętrz światłem dziennym
północna (N)	0- 30%	oświetlenie wnętrz światłem dziennym (możliwość braku okien w pomieszczeniach niewymagających oświetlenia naturalnego)

Należy jednak pamiętać, że w przypadku budynków mieszkalnych, dobieranie wielkości przeszkleń musi być traktowane wspólnie z rozplanowaniem wnętrza, ponieważ stosunek ich powierzchni do powierzchni podłogi pomieszczeń mieszkalnych musi wynosić min 1:8 (*Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, 2002*).

Na podstawie dalszych badań literaturowych (Jagiełło-Kowalczyk, 2017; Kaczmarzyk, 2017; Karimi i in., 2023; Kasperkiewicz, 2007; Kęskiewicz, 2020; La Roche i Milne, 2004; Nowak, 2020; Szczechowiak, 2022; Trząski, 2021; Żurawski, 2013) oraz własnego doświadczenia zawodowego autor proponuje podział wybranych metod optymalizacyjnych na obszary tematyczne, powiązane z branżami wiodącymi, wraz z oszacowaniem wymaganego stopnia uszczegółowienia projektu, dla metod, gdzie branżą wiodącą jest architektura. Podział został przedstawiony w tabeli 15.

Tabela 15. Podział metod optymalizacyjnych na obszary tematyczne powiązane z branżami wiodącymi wraz z oszacowaniem wymaganego stopnia uszczegółowienia projektu dla metod, gdzie wiodącą branżą jest architektura.

Źródło: opracowanie własne

	obszar tematyczny	działania	stan uszczegółowienia projektu
architektura	otoczenie zewnętrzne	wykorzystanie warunków zastanych na działce (zieleni, ukształtowanie terenu, istniejąca zabudowa)	początkowy
		orientacja budynku na działce	początkowy
		kształtowanie relacji między obiektami kubaturowymi	początkowy
		aranżowanie zieleni do sterowania mikroklimatem	średni
	geometria budynku	kontrola współczynnika zwartości formy A/V	początkowy
		dostosowanie proporcji elewacji	początkowy
		projektowanie układu budynku, rozmieszczenie funkcji	początkowy
		aranżacja pomieszczeń	początkowy
		rozmieszczenie i powierzchnia stolarki i ślusarki	średni
		zacienianie poprzez części budynku lub systemy	średni
	właściwości materiałowe	dobór izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych (U)	średni
		kontrola przepuszczalności energii słonecznej przez elementy przeziernie	średni
		założenie pojemności cieplna i efektywne zarządzanie akumulacją i oddawaniem ciepłą	średni
		optymalizacja parametrów izolacyjnych z uwzględnieniem trwałości rozwiązań	zaawansowany
	detale wykonawcze	minimalizacja mostków cieplnych	zaawansowany
		zapewnienie szczelności budynku	zaawansowany

technologie instalacyjne	<b>działania</b>
	wypracowanie standardu komfortu
	dobór głównego źródła energii
	wykorzystanie kogeneracji i trigeneracji
	stosowanie adekwatnych systemów instalacji CO, wentylacji, chłodzenia, oświetlenia
	integracja poszczególnych systemów
	zmniejszenie strat powstających przy wytwarzaniu ciepła w źródłach
	zmniejszenie strat powstających przy przesyłach
	wykorzystanie odzysku energii
	inteligentne zarządzanie energią i budynkiem
	wykorzystywanie energii z OZE
	stosowanie termostatów i systemów automatyki
	zarządzanie zużyciem wody
	wprowadzenie systemu indywidualnego rozliczania za ciepło w przypadku wielu użytkowników budynku
wykorzystanie naturalnych procesów jako wspomagające prace instalacji np. Free cooling, czyli wykorzystanie chłodnego powietrza zewnętrznego do schładzania budynku	

Działania, które mogą zostać podjęte na wczesnych etapach, odnoszą się do otoczenia i formy budynku. Dla umiejscowienia ich w tradycyjnym procesie budowlanym, dotyczą one działań przedprojektowych, badania chłonności działki, koncepcji i wczesnego projektu budowlanego. Decyzje podjęte na tym etapie w dużym stopniu definiują efekt finalny oraz są trudne (jeżeli nie niemożliwe) do zmiany w późniejszym czasie.

Metody, zakwalifikowane do średniego stanu uszczegółowienia wymagają mniejszej ingerencji w założenia bazowe i mogą być używane w zarówno na początku procesu projektowego, jak i w jego środku. W przypadku tradycyjnego modelu inwestycyjnego, limit czasowy przypadałby na opracowanie projektu budowlanego i wykonawczego. Oczywiście, działania te mogą być podjęte wcześniej, natomiast w tym czasie następuje ich weryfikacja i ostateczne potwierdzenie.

Ostatnią grupę stanowią metody związane głównie z etapem wykonawczym, a więc dla odniesienia, projektem wykonawczym, projektami warsztatowymi oraz prowadzeniem prac budowlanych. Strategie aktywne, powiązane z technologiami instalacyjnymi nie zostały zakwalifikowane do obszarów tematycznych i stanów zaawansowania projektu, ponieważ wykracza to poza zakres kompetencji architekta, które omawiane są w niniejszej pracy. Niemniej kwestie te są niezwykle istotne i wymagają zaangażowania całego zespołu projektowego. Im wcześniej ono nastąpi, tym lepiej i pełniej można przewidzieć kwestie energii w architekturze (Bać, 2020c). Zadaniem architekta jest takie sprecyzowanie przeznaczenia i związanych z tym wymogów eksploatacyjnych, aby umożliwić szczegółowe określenie parametrów wewnętrznych specjalistom z zakresu instalacji sanitarnych (Kęskiewicz, 2020). Poznanie i zrozumienie sposobów zwiększenia efektywności w systemach instalacyjnych pozwala na bardziej optymalne rozplanowanie poszczególnych elementów w budynku przez cały zespół projektowy.

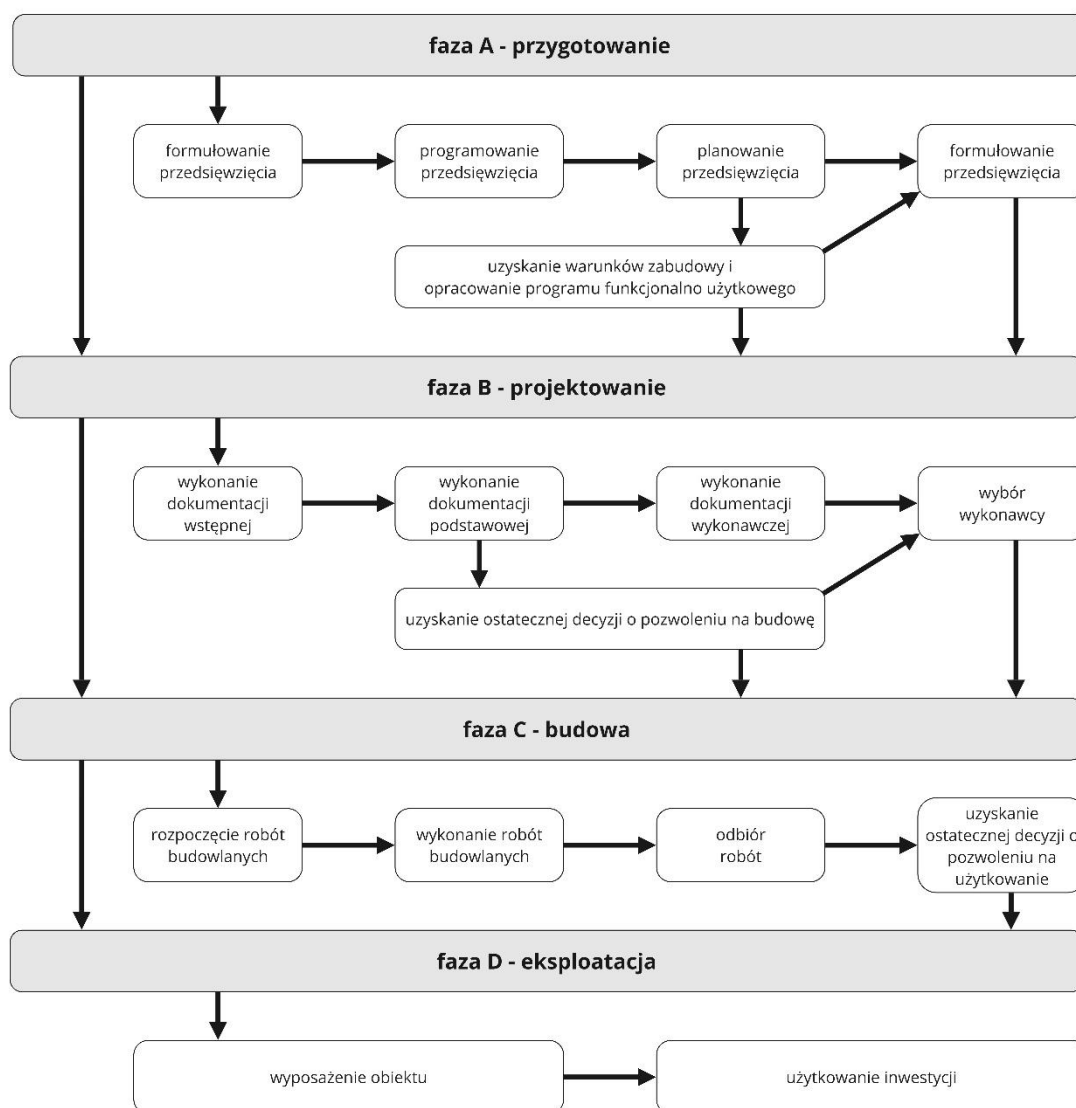
## 4.5 Specyfika procesu projektowego

Każdy obiekt budowlany to efekt pewnego złożonego procesu inwestycyjnego, na stałe wpisujący się w kontekst przestrzeni zurbanizowanej i trwale przekształcający przestrzeń naturalną. To również czynnik znacząco wpływający na presję antropogeniczną; teren raz zabudowany pozostaje bowiem trwale wyłączony z przestrzeni aktywnej biologicznie (Felski, 2019).

Omawiane wcześniej świadectwa charakterystyki energetycznej mogą być przydatnym narzędziem, jeżeli są efektem świadomego projektowania i współpracy międzybranżowej od wstępnych faz koncepcyjnych. W tradycyjnym modelu projektowania budynków cały proces jest podzielony na wiele etapów realizowanych przez różnych specjalistów (ilustracja 28). Na początku architekt definiuje kształt i funkcję budynku na podstawie wymagań inwestora. Kolejne etapy obejmują wybór materiałów, opracowanie założeń konstrukcyjnych, obliczenia dotyczące zapotrzebowania na energię, moc, wentylację, wodę, inne media i na tej podstawie opracowywany jest projekt instalacji. Metoda sekwencyjna może być problematyczna dla projektów energooszczędnych, ponieważ decyzje podjęte na wcześniejszych etapach mogą ograniczać możliwości wdrożenia optymalnych rozwiązań energetycznych.

Często w wyniku takiego podejścia dochodzi do czasochłonnych poprawek dokumentacji, która musi być korygowana przez niedostrzeżone w odpowiednim momencie problemy. Elementy instalacji, które są próbą naprawy decyzji podejmowanych osobno przez specjalistów z różnych dziedzin mogą wpływać także niekorzystnie na estetykę budynku. Kolejnym problemem jest ekonomia inwestycji, która często jest kluczowym czynnikiem podczas podejmowania decyzji (Fidorów-Kaprawy i in., 2017). Dlatego tak ważnym zagadnieniem jest opracowanie, a przede wszystkim wdrożenie i popularyzacja metodologii, które pozwalają na lepszą koordynację i antycypację problemów na wczesnym etapie projektowym.

Schemat struktury tradycyjnego procesu budowlano-inwestycyjnego

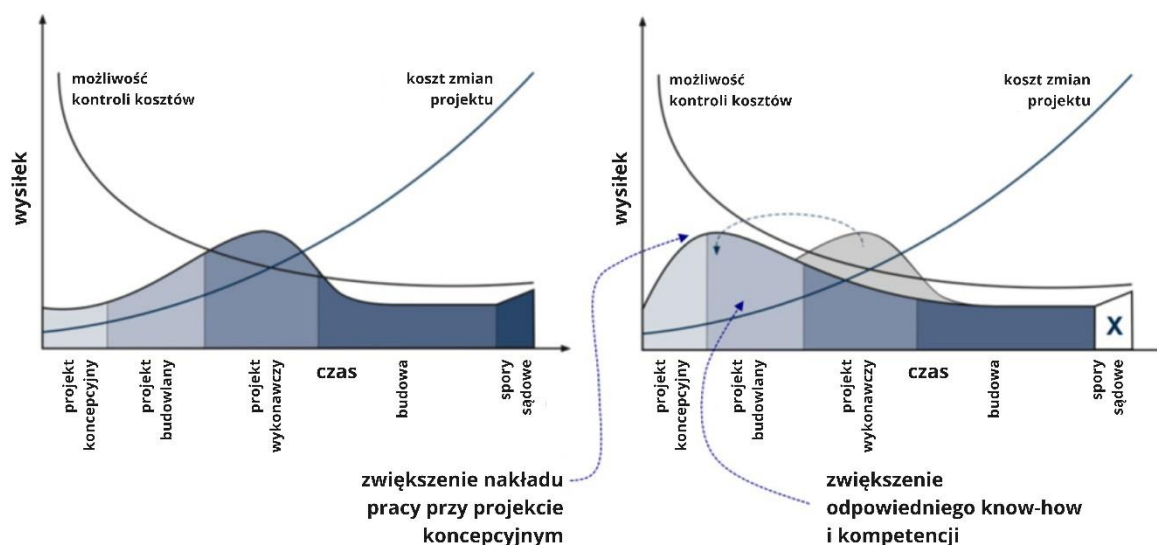


Ilustracja 27. Schemat struktury tradycyjnego procesu budowlano-inwestycyjnego  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie (Rogoża, 2014)

W trakcie tworzenia koncepcji w celu uwzględnienia ograniczenia zużycia energii przez budynek na wszystkich etapach cyklu życia niezbędna jest bardziej zintegrowane podejście. Większe zaangażowanie kluczowych branż na wczesnych etapach ma potencjał do tworzenia bardziej kompleksowych opracowań. Jednocześnie, jak zauważa dr hab. inż. arch. Beata Majerska-Pałubicka (Majerska-Pałubicka, 2014, 2013), architekt powinien dążyć do stworzenia projektu, który harmonijnie wpisuje się w otoczenie, a jednocześnie spełnia współczesne wymagania ekologiczne, ekonomiczne, społeczne i kulturowe. Aby osiągnąć ten cel, konieczna jest ścisła współpraca z ekspertami z różnych dziedzin, takich jak ekologia, energetyka, mikroklimat, technologia oraz ekonomia, co pozwoli na kompleksowe podejście do projektowania. Projektowanie zintegrowane jako alternatywa do tradycyjnego procesu, przede wszystkim zmienia proporcje zaangażowania i nakładów pracy w różnych fazach projektu.

W tradycyjnym modelu nakład czasu i zaangażowania wzrasta wraz z rozwojem projektu, osiągając punkt krytyczny w momencie przygotowania wykonawczej dokumentacji projektowej, kiedy możliwości dokonania zmian są coraz bardziej kosztowne. W przypadku podejścia zintegrowanego punkt ciężkości przesuwa się z etapu budowy na fazę projektową, co pozwala na bardziej efektywne zarządzanie

ryzykiem i kosztami jeszcze przed rozpoczęciem budowy (ilustracja 29). Zwiększenie zaangażowania na etapie koncepcji pozwala na większą kontrolę kosztów oraz zmniejszenie kosztów ewentualnych zmian projektowych w późniejszych etapach. Z tego wynika, że w zmodyfikowanym podejściu nacisk jest położony na zwiększenie kompetencji i know-how w początkowych fazach projektu, co przekłada się na lepsze zarządzanie projektem i bardziej efektywne wdrażanie zmian.



Ilustracja 28. Projektowanie zintegrowane.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Leutgöb, 2013)

Definicja wypracowana w trakcie projektu MaTrID (Market Transformation Towards Nearly Zero Energy Buildings Through Widespread Use of Integrated Energy Design), realizowanego w 2014 roku na zlecenie Komisji Europejskiej brzmi: Projektowanie zintegrowane to współpraca między zainteresowanymi stronami, takimi jak klient, architekt, konsultanci i użytkownicy, od początku procesu projektowania, z traktowaniem priorytetowym wdrażania zintegrowanych rozwiązań architektonicznych lub cech pasywnych w celu osiągnięcia wysokich ambicji energetycznych i środowiskowych, w stosunku do stosowania systemów aktywnych. W obliczu rosnących wymagań dotyczących energooszczędności implementacja idei projektowania zintegrowanego wydaje się naturalną ewolucją całego procesu (Markiewicz, 2016). Korzyści płynące z przeprowadzenia procesu budowlanego w ten sposób potencjalnie mogą być bardzo duże.

W tabeli 16, opracowanej w ramach projektu MaTrID można zauważyć, że koszty ponoszone w głównej fazie życia budynku mogą zostać drastycznie zmniejszone. Należy natomiast podkreślić, że początkowy wkład ulega zwiększeniu, co w niektórych przypadkach stanowi przeszkodę i większe ryzyko.

Tabela 16. Zestawienie kosztów wynikających z zaadaptowania projektowania zintegrowanego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Leutgöb, 2013)

ZADANIA	KOSZTY W STOSUNKU DO TRADYCYJNEGO PODEJŚCIA	KOMENTARZE
Koncepcja i wstępny projekt	5- 10% więcej	Na podstawie doświadczenia
Szczegółowe projektowanie	< 5% więcej przy pierwszych projektach 5-10% mniej przy kolejnych projektach	Na podstawie doświadczenia – płynniejszy proces dzięki bardziej szczegółowemu projektowi koncepcyjnemu
Koszty budowy	5- 10% więcej	3-6% więcej w przypadku budynków pasywnych
Koszty operacyjne	40- 90% mniej	Na podstawie doświadczenia
Błędy budowlane	10- 30% mniej	Dzięki lepszemu planowaniu i lepszemu nadzorowi w trakcie budowy

Jednym z kroków w przeprowadzeniu optymalnego procesu projektowego jest korzystanie z narzędzi, które pozwalają na bieżącą weryfikację założeń i zrozumienie konsekwencji podejmowanych działań. Dzięki temu czas pracy może zostać skrócony, pozwalając na skupienie działań na najistotniejszych aspektach dla testowanego rozwiązania (Majerska-Paľubicka, 2014). Na pierwszym miejscu wśród tego typu narzędzi znajdują się programy pozwalające na projektowanie w formie przestrzennej 3D w środowisku BIM. Dodatkowo, możliwe jest prowadzenie uzgodnień jednocześnie przez wszystkie zaangażowane osoby, co znacznie skraca potrzebny na ustalenia czas, w stosunku do tradycyjnego obiegu elementów zindeksowanych w kolejne wersje i rewizje. W każdej fazie procesu projektowego istnieje możliwość generowania z modelu różnych rysunków, ich fragmentów oraz przekrojów w formie płaskiej, a także dowolnych widoków przestrzennych. W związku z tym dokumentacja papierowa jest ograniczona do wydruków, które służą do dokumentowania i archiwizowania poszczególnych etapów projektu oraz kluczowych ustaleń (Janota-Bzowski, 2015).

Od 1 lipca 2021 r. projekt budowlany, który zawiera opinie rzeczoznawców oraz wszelkie uzgodnienia może być dostarczony w formie cyfrowej do właściwego organu administracji budowlanej.

## 4.6 BIM – modelowanie informacji o budynku

### 4.6.1 Narzędzie cyfrowe stosowane w architekturze

W inżynierii, zwłaszcza w architekturze, urbanistyce i budownictwie, informacje mają specyficzny charakter. Łączą różne sposoby opisu rzeczywistości, takie jak tekst, rysunki, rzuty płaskie i przestrzenne, filmy oraz modele. Ostatnia z tych metod, czyli modelowanie, jest najbardziej precyzyjna i efektywna, choć w tradycyjnych warsztatach najtrudniejsza do pełnego wdrożenia. Przejście architektury do świata cyfrowego odbywało się stopniowo, zgodnie z przyzwyczajeniami wynikającymi z wieloletniej praktyki. Na początku skomputeryzowano dokumentację i narzędzia służące do jej tworzenia, takie jak stół kreślarski, przykładnica czy cyrkiel.

Cyfrowy model budynku pojawił się później, ale szybko stał się dominującym narzędziem. Wirtualna reprezentacja budowli jest obecnie kluczowa w procesie tworzenia koncepcji oraz współpracy międzybranżowej. Do geometrycznych elementów budynku, takich jak ściany czy stropy, dodawane są wszystkie inne informacje, takie jak tekst, parametry czy obrazy. Metodologia BIM umożliwia inżynierom wspólne tworzenie projektu, koordynując działania w czasie rzeczywistym i uwzględniając różnorodne uwarunkowania, w tym również te związane z eksploatacją budynku. Cyfrowy model budynku pełni współcześnie kluczową rolę w budowaniu świadomości projektowej wśród interdyscyplinarnych, rozproszonych zespołów współpracowników (Słyk, 2015).

BIM (ang. Building Information Modeling) oznacza „modelowanie informacji o budynku” i odnosi się do procesu tworzenia za pomocą specjalistycznego oprogramowania szczegółowej bazy danych, która precyzyjnie opisuje każdą część budynku – od konstrukcji, poprzez materiały i ich właściwości, aż po wyposażenie. Wszystkie te informacje są uporządkowane w przestrzeni trójwymiarowej, tworząc wirtualny model 3D. W projektach opartych na standardzie BIM wykorzystuje się trójwymiarowe obiekty takie jak: ściany, dachy, stropy, okna, drzwi, którym przypisuje się nie tylko wymiary, ale również szczegółowe parametry, takie jak właściwości fizyczne czy techniczne. Dzięki integracji wszystkich danych w jednym systemie, możliwa jest automatyczna identyfikacja zmian oraz wykrywanie potencjalnych kolizji w projekcie. Już na wczesnym etapie projektowania budynku możliwe jest przeprowadzenie testów jego efektywności energetycznej, na długo przed fizyczną realizacją i wdrożeniem rozwiązań, dzięki symulacjom znanym jako modelowanie energetyczne (Markiewicz, 2016). Środowisko pracy BIM pozwala na zarządzanie trójwymiarowymi modelami, które zawierają dane opisujące fizyczne i chemiczne właściwości budowli, jak również umożliwia integrację danych niegeometrycznych, takich jak koszty budowy, etapy realizacji oraz inne specjalistyczne parametry. Model wielowarstwowy BIM obejmuje danymi zarówno planowanie harmonogramów realizacji (BIM 4D), analizę kosztów (BIM 5D), oceny środowiskowe (BIM 6D), zarządzanie eksploatacją obiektu (BIM 7D), jak i analizy energetyczne

(Kasznia i in., 2017). Poziom BIM 6D koncentruje się na zrównoważonym rozwoju, minimalizacji zużycia energii i zasobów naturalnych oraz optymalizacji ekologicznych materiałów budowlanych i technologii. W szczególności, analizy wykonane na wczesnych etapach projektu pozwalają na sprawdzenie wielu wariantów projektowych i są kluczowe dla optymalizacji efektywności energetycznej budynku, jeszcze przed rozpoczęciem jego eksploatacji (Borkowski i in., 2022).

#### 4.6.2 BIM a idea cyfrowego bliźniaka

Należy podkreślić, że BIM nie jest jedynie środowiskiem do modelowania w 3D, a raczej rozbudowaną bazą danych o przemyślanej strukturze. BIM idzie w generowaniu wartości dalej niż tradycyjne rysunki CAD (Computer Aided Design), poprzez dostarczanie informacji i świadomości na temat działania całego systemu obiektu budowlanego, oprócz prostych relacji przestrzennych opartych na danych (Naamane i Boukara, 2015). W wielu opracowaniach dotyczących modelowania informacji budowlanych, skrót BIM jest interpretowany różnie w zależności od tematu, który porusza autor. Definiowanie jednolitej definicji BIM dla całej branży budowlanej może być wyzwaniem. Organizacja buildingSMART, która promuje otwartość środowiska BIM poprzez opracowywanie uniwersalnych standardów, takich jak IFC, umożliwiających wymianę danych między oprogramowaniem różnych producentów, sugeruje podzielenie BIM na trzy różne akronimy:

- **Building Information Model** definiowany jako model informacyjny budynku „to cyfrowy opis fizycznych i funkcjonalnych właściwości budowli, służący jako źródło wiedzy i wszelkich danych o obiekcie, w pełni dostępnych dla uczestników procesu inwestycyjnego i stanowiący niezawodną podstawę dla podejmowania decyzji w trakcie cyklu jego funkcjonowania, od pierwszej koncepcji do rozbiórki budynku”.
- **Building Information Modeling** tłumaczony jako modelowanie informacji o budynku (lub szerzej obiekcie budowlanym) definiowany jest jako „twórczy proces generowania i wykorzystywania danych o obiekcie, jej projektowania, etapu budowy i eksploatacji w trakcie pełnego cyklu funkcjonowania. BIM pozwala, aby wszyscy zainteresowani uczestnicy inwestycji mieli dostęp do tych samych informacji, w tym samym czasie, przez interoperacyjność platform technologicznych. Projektowanie budowli jest procesem, w którym bierze udział wiele stron zaangażowanych w powstanie inwestycji”.
- **Building Information Management** zdefiniowany jako metodyka i jednocześnie narzędzie zarządzania szeroko rozumianym procesem inwestycyjno-budowlanym to „organizacja i kontrola procesów inwestycyjnych poprzez wykorzystywanie parametrów cyfrowego modelu budynku dla dokonywania wymiany informacji o składnikach aktywów w całym cyklu inwestowania. Korzyści wynikają ze scentralizowanej wymiany danych, wizualnej komunikacji poprzez obiekty trójwymiarowe, wczesnego rozpoznawania możliwości, zrównoważonego i efektywnego interdyscyplinarnego i interakcyjnego projektowania, kontroli w trakcie i na miejscu budowy, aktualizacji dokumentacji do stanu rzeczywistego”.

Wszystkie istotne dane i informacje, które tworzą model budynku, są przechowywane w relacyjnej bazie danych, która może być wykorzystana w fazie eksploatacji obiektu. Z kolei idea cyfrowego bliźniaka (ang. digital twin) to szersza koncepcja, obejmująca wirtualne odwzorowania rzeczywistych lub planowanych obiektów. Jest to dynamiczny model, który rozwija się i jest aktualizowany przez cały okres użytkowania obiektu budowlanego. Koncepcja BIM stanowi fundament dla realizacji idei cyfrowego bliźniaka (Borkowski i Michalak, 2024). Na wirtualnym modelu można przeprowadzać symulacje i testy, co pozwala zaoszczędzić czas i pieniądze, a w rezultacie zwiększa efektywność i produktywność. Cyfrowy bliźniak daje możliwość monitorowania procesu budowy oraz nadzoru nad wszystkimi działaniami związanymi z realizacją projektu, co pomaga zmniejszyć ryzyko błędów w projektowaniu, wykonaniu czy użytkowaniu obiektu. Wiarygodny i aktualny model BIM może pełnić rolę cyfrowego bliźniaka, przynosząc korzyści różnym interesariuszom w procesie inwestycyjnym. Zarządzający projektem może



skutecznie zarządzać ruchem pieszym i kołowym, wprowadzać zmiany w lokalizacji użytkowników oraz dostosowywać infrastrukturę do ich potrzeb. Model wspomaga również zarządzanie remontami, umożliwiając dokładne oszacowanie kosztów, tworzenie harmonogramów oraz monitorowanie postępu prac. Jest także pomocny w bieżącej eksploatacji budynku, pozwalając na monitorowanie stanu technicznego wyposażenia i środków trwałych.

#### 4.6.3 BEM – modelowanie energetyki budynku

Jednym z obszarów BIM jest modelowanie energetyczne, które można dodatkowo określić jako BEM (Building Energy Modeling). Narzędzia, które są używane, głównie wykorzystują dwa silniki obliczeniowe: DOE i EnergyPlus. Ten pierwszy został stworzony przez Departament Energii USA (Departament Of Energy) w roku 1976 i jest od tego czasu systematycznie rozwijany (wersja aktualna DOE 2.3). Z kolei EnergyPlus powstał w 1997 roku i jest rozwijany przez Building Technologies Office, także bazując na silniku DOE. EnergyPlus ma za zadanie ulepszać modelowanie i analizę zużycia energii w budynkach. Narzędzia BEM, takie jak Autodesk Insight czy Open Studio, pozwalają na bardziej szczegółowe analizy energetyczne i pomagają w efektywnym projektowaniu, co przekłada się na komfort użytkownika, redukcję kosztów oraz zwiększenie efektywności energetycznej budynków. Wdrożenie tych narzędzi pozwala na lepsze projektowanie termiczne i zintegrowane planowanie projektów (Borkowski i in., 2022).

Programy do symulacji energetycznej można podzielić ze względu na metodologię związaną z długością kroku czasowego stosowanego w obliczeniach. Symulacje mogą się opierać na metodzie miesięcznej bądź wykorzystującej krótsze okresy, jak dni, godziny czy minuty. Obecnie obowiązujące prawodawstwo (*Dz.U. 2023 poz. 697, 2023*) przy sporządzaniu świadectw charakterystyki energetycznej bazuje właśnie na metodzie bilansów miesięcznych. Najbardziej popularne w Polsce programy komputerowe służące do wykonywania takich charakterystyk energetycznych budynków to m.in.: Arcadia TERMO, CERTO, Audytor OZC, BuildDesk Energy Certificate.

Kolejną grupą narzędzi wspomagających projektantów w obliczeniach efektywności energetycznej budynków są programy symulacyjne, które korzystają z godzinowych lub krótszych interwałów czasowych. Tego typu programy oferują znacznie większą dokładność w zakresie wprowadzania danych oraz uzyskiwanych wyników w porównaniu do narzędzi opartych na metodach miesięcznych. Choć są bardziej skomplikowane w obsłudze i wymagają zaawansowanej wiedzy o modelowanych procesach, umożliwiają większą elastyczność i precyzję w prognozowaniu zapotrzebowania na energię budynków. Programy symulacyjne oferują zaawansowane możliwości obliczeniowe, uwzględniając rzeczywiste godzinowe dane pogodowe, takie jak temperatura, wilgotność, promieniowanie słoneczne, kierunek i prędkość wiatru oraz stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu zewnętrznym. Umożliwiają równoczesne, zintegrowane modelowanie warunków cieplnych stref budynku oraz działania systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji, co pozwala na precyzyjne obliczanie komfortu cieplnego użytkowników na podstawie wskaźników takich jak PMV (Predicted Mean Vote) i PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), a także temperatury promieniowania przegród i temperatury operatywnej. Programy te pozwalają również na ocenę komfortu wizualnego przy użyciu wskaźnika DF (Daylight Factor) oraz jakości powietrza wewnętrznego, poprzez analizę stężenia CO<sub>2</sub> i innych szkodliwych substancji. Dodatkowo, umożliwiają dokładne modelowanie pracy systemów budynku takich jak: ogrzewanie, chłodzenie, wentylacja mechaniczna i oświetlenie, w różnych interwałach czasowych (godzinowych, dobowych, tygodniowych). Pozwalają także na uwzględnienie zmiennych parametrów pracy urządzeń oraz korzystanie z obliczeń dynamiki płynów w celu optymalizacji projektów. Do grupy programów symulacyjnych zaliczyć można m.in. ESP-r, EnergyPlus, Open Studio, WUfi Plus, Autodesk Insight, Green Building Studio, eQuest oraz IESVE. (Fedorowicz i Pokorska-Silva, 2016; Kuczyński i in., 2011; Mehta, 2021; Mostafavi i in., 2015; Witczak, 2020).

#### 4.6.4 Performance gap – luka wydajności

Jednym z głównych problemów, z jakimi mierzy się modelowanie energetyczne, jest tzw. “performance gap”- luka wydajności. Jest to problem niedokładności modeli obliczeniowych w stosunku do faktycznych wyników otrzymywanych po wybudowaniu budynków. Często różnice są znaczące, co stanowi popularny argument wśród przeciwników modelowania. Źródła luki wydajności są różne, najczęściej wskazywaną jest słabe wykonanie robót budowlanych, błędne oszacowanie harmonogramu korzystania z budynku bądź założenie nieadekwatnej liczby użytkowników. Jak wskazują jednak badania, problem dotyczy także samej metodologii wykonywania symulacji i czynnika ludzkiego. Literatura wskazuje, że jest to niedostatecznie zbadany obszar, który jest niezwykle ważny, ponieważ architekci i inżynierowie nie uważają się za czynnik przyczyniający się do luki wydajności, ale raczej wskazują na jakość budowy i użytkowników jako źródła problemu. Jednak badania przeprowadzone przez (Imam i in., 2017) pokazują, że źródeł luki wydajności należy także upatrywać w błędnych założeniach i niedostatecznym wartościowaniu poszczególnych czynników wpływających na termalną sprawność budynku.

W badaniu przeprowadzono ankietę wśród 108 osób zajmujących się modelowaniem budynków, pytając ich o znaczenie różnych zmiennych wejściowych w symulacjach energetycznych. Następnie przeprowadzono analizę wrażliwości, aby ocenić wpływ każdej zmiennej na roczne zużycie energii. Podsumowując, uczestnicy badania nie osiągnęli zgody co do ważnych parametrów, które powinny być uwzględnione w modelu, nie zgodzali się co do rankingu ważności tych parametrów oraz nie byli w stanie poprawnie ocenić wpływu zmian w wartościach 21 wspólnych parametrów. Wynik taki zgadza się z badaniami wcześniej przez Gillesa Guyona, przeprowadzonych przy uczestnictwie 12 użytkowników (Guyon, 1997). Nasuwającym się wnioskiem jest potrzeba popularyzacji wykonywania symulacji energetycznych oraz zwrócenie większej uwagi na fizykę budynków zamiast tworzenia sztywnych ram i gotowych wzorców postępowania.

#### 4.7 Wnioski i dyskusja

Pomimo rozwoju idei takich jak: projektowanie zintegrowane czy zrównoważony rozwój, poziom ich wdrożenia w Polsce i w polskiej architekturze pozostawia wiele do życzenia. Przejawem tego jest ogólna sytuacja głównego nurtu współczesnej polskiej architektury, która zdaje się wciąż przedkładać formę nad jakość i efektywność energetyczną, a także ekologiczną, ekonomiczną czy społeczną (Bać, 2014). Taka sytuacja nie jest przypadkowa. Stosowana metodologia obliczeń charakterystyki energetycznej budynków nie należy do najbardziej efektywnych spośród dostępnych opcji. Programy do wyznaczania charakterystyki energetycznej, zgodnie z obecnie obowiązującymi wytycznymi, uwzględniają zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzewania, chłodzenia, podgrzewania wody użytkowej, oświetlenia oraz działania urządzeń pomocniczych, takich jak pompy i wentylatory. Niestety, metoda bazująca na bilansach miesięcznych nie odzwierciedla precyzyjnie rzeczywistego funkcjonowania budynków, ponieważ pomija dynamiczne czynniki, takie jak zmienne profile pracy instalacji czy różnorodne warunki eksploatacji. Szczególnym wyzwaniem są obliczenia dotyczące zapotrzebowania na energię do chłodzenia, ponieważ średnie miesięczne dane klimatyczne nie oddają dokładnie rzeczywistych warunków panujących latem, co prowadzi do nieprecyzyjnych wyników (Witczak, 2020).

Na polskim rynku budowlanym dominuje budownictwo deweloperskie, którego fundamentalną cechą jest osiągnięcie założonej stopy zwrotu ze zrealizowanej inwestycji. W przypadku braku regulacji lub ograniczenia ich do minimum, przeprowadzenie bardziej zaawansowanych procesów optymalizacji energetycznej, czy certyfikacji zależy jedynie od dobrej woli inwestora, bądź potencjalnego zwiększenia wartości nieruchomości i późniejszej kapitalizacji wypracowanych atutów. Jak zostało wspomniane, metodologia projektowania zintegrowanego generuje większe koszty w początkowych etapach życia budynku. Wszystkie zyski, które wynikają z takiego podejścia, muszą być dostatecznie jasno przedstawione użytkownikowi – nabywcy, bądź muszą być to cechy, które są na tyle poszukiwanymi, że

wytworzą standard rynkowy. Z punktu widzenia architekta w procesie projektowym z uwagi na często ograniczone fundusze przeznaczone przez inwestora na finansowanie prac projektowych, kluczowe jest także budowanie świadomości wśród projektantów do stosowania takiego podejścia i zwiększanie zaangażowania wszystkich branż na wcześniejszych etapach, z jednoczesnym uświadamianiem inwestorów w tym temacie. Według zasad wyceny prac projektowych SARP (SARP, 2014) udział procentowy poszczególnych faz projektowania to:

- projekt koncepcyjny PK- 7-15%,
- projekt budowlany PB- 30-45%,
- projekt wykonawczy PW- 40-60%.

Założenia te są zbieżne z innymi zasadami wyceny i mają odzwierciedlenie w sytuacji rynkowej, natomiast standard ten w żaden sposób nie sprzyja przesuwaniu punktu ciężkości zaangażowania zespołu projektowego na najwcześniejsze fazy.

Cyfryzacja procesu projektowego także postępuje w wolnym tempie, choć należy docenić możliwość składania dokumentacji potrzebnej do wydania pozwolenia na budowę w formie cyfrowej od 2021 roku. Stosowanie standardu BIM nie jest w żadnej sposób regulowane w odróżnieniu od niektórych krajów i pozostaje każdorazowo do decyzji pracowni projektowej, bądź wymagań inwestora w tym zakresie. Pojawiają się również opinie, że BIM może być nieopłacalny przy mniejszych projektach. W literaturze oraz w praktyce często podkreśla się, że technologia BIM przynosi wymierne korzyści w przypadku dużych inwestycji. Wiele biur projektowych oraz przedsiębiorców uważa, że BIM może nie być odpowiedni dla ich konkretnych realizacji (Criminale i Langar, 2017). Jednak przykłady z różnych części świata pokazują, że efektywność można poprawić nawet w przypadku budownictwa jednorodzinne (Salehabadi i Ruparathna, 2022) w związku z tym, BIM może być wartościowym narzędziem dla architektów zarówno przy projektowaniu domów jednorodzinnych, jak i dużych budynków użyteczności publicznej (Borkowski i Michalak, 2024). BIM może być wykorzystywany także do recyklingu materiałów budowlanych oraz elementów z rozbiórki budynków, aby mogły być ponownie użyte w nowych inwestycjach.

## ROZDZIAŁ 5. ANALIZA REFERENCYJNYCH, ZOPTYMALIZOWANYCH ENERGETYCZNIE BUDYNKÓW

### 5.1 Wprowadzenie

Istnieje wiele metod optymalizacyjnych, za pomocą których projektanci wszystkich branż są w stanie obniżyć zapotrzebowanie energetyczne budynków. Każda z nich ma swoje granice i warunki, w których może być zastosowana, a także wywiera konkretne skutki w stosunku do zrealizowanych obiektów. Budynki, w których zastosowano kosztowne i mało uniwersalne rozwiązania, często cechują się ograniczoną funkcjonalnością. Związane są one zazwyczaj z jednym specyficznym typem obiektu i mogą być skuteczne tylko w ściśle określonych warunkach klimatycznych. Tego rodzaju projekty charakteryzują się dominacją jednego podejścia optymalizacyjnego, co prowadzi do ignorowania innych, równie istotnych czynników, takich jak komfort użytkowników, adaptowalność budynku do zmiennych warunków środowiskowych czy kwestie związane z kosztem eksploatacji. Ze względu na swoją specyfikę, takie budynki nie nadają się do wdrożenia na większą skalę i pozostają raczej wyjątkami niż standardami w budownictwie. Dominujące w nich rozwiązania, choć mogą osiągać doskonałe wyniki energetyczne, nie uwzględniają całościowego charakteru budynku, w którym kluczowe są zrównoważone podejście i elastyczność. Tym samym, te innowacyjne, lecz wąsko wyspecjalizowane rozwiązania, często prowadzą do powstania obiektów o charakterze prototypowym, których efektywność energetyczna jest osiągana kosztem innych ważnych aspektów, takich jak ekonomia użytkowania czy możliwość adaptacji w innych kontekstach klimatycznych lub technologicznych.

Przykładem wyjątkowo udoskonalonym pod względem optymalizacji energetycznej jest budynek 2226 autorstwa pracowni Baumschlager Eberle zlokalizowany w Lustenau w Austrii. Architekci Carlo Baumschlager i Dietmar Eberle, będąc zarówno inwestorami, jak i użytkownikami końcowymi budynku, mieli możliwość zaprojektowania obiektu w pełni dostosowanego do swoich potrzeb, co pozwoliło na stworzenie eksperymentalnej koncepcji niezależnej od typowych wymogów związanych z kosztami, optymalizacją budżetu czy standardowymi rozwiązaniami. Najważniejszym założeniem projektu było zapewnienie komfortu cieplnego dla użytkowników, utrzymując temperaturę wewnątrz budynku na poziomie 22-26°C przez cały rok, bez stosowania tradycyjnych systemów centralnego ogrzewania, klimatyzacji, wentylacji mechanicznej czy rekuperacji. To podejście stanowi kluczowy element jego innowacyjności, biorąc pod uwagę, że klimat Austrii jest jednym z zimniejszych w Europie pod względem liczby stopniocdni (ilustracja 17, str 38). Nazwa budynku - 2226 - odnosi się właśnie do tych granic komfortu temperaturowego. Budynek ma formę sześcianu o podstawie 24x24 metry i wysokości 24 metrów, co czyni go niezwykle proporcjonalnym. Pierwsze koncepcje, które Dietmar Eberle zaprezentował w 2008 roku na wystawie „The City in the House” w Berlinie, znacznie różniły się od ostatecznej wersji. Projekt został skrupulatnie zoptymalizowany zarówno pod kątem formy, jak i wydajności energetycznej. Architekci zrezygnowali z początkowych założeń, takich jak wycofany parter i rozległe tarasy, aby stworzyć elegancką i minimalistyczną bryłę, która opiera się na prostych i efektywnych rozwiązaniach.

Jednym z rozwiązań, które umożliwia utrzymanie komfortu cieplnego bez stosowania tradycyjnych systemów ogrzewania, jest zastosowanie grubych, dobrze izolujących ścian zewnętrznych. Ściany te zbudowane są z dwóch warstw poryzowanych pustaków o grubości 36 cm każda, co pozwala na maksymalizację akumulacji ciepła. Taka konstrukcja pozwala na zatrzymanie ciepła generowanego wewnątrz budynku przez użytkowników, urządzenia elektryczne oraz sztuczne oświetlenie. Budynek opiera się na zasadach znanych z tradycyjnego budownictwa, w którym grube ściany skutecznie stabilizują temperaturę wewnętrzną, minimalizując wahania związane z dobowymi zmianami temperatur na zewnątrz (Eberle i in., 2016).



Zdjęcie 6. Budynek 2226, Lustenau, projektu pracowni Baumshlager Eberle.

Źródło: materiały Baumshlager Eberle, [https://www.baumschlager-eberle.com/fileadmin/\\_processed\\_/a/0/csm\\_bea-projekt-2226-lustenau-buero-galerie-2\\_854e98fb2f.jpg](https://www.baumschlager-eberle.com/fileadmin/_processed_/a/0/csm_bea-projekt-2226-lustenau-buero-galerie-2_854e98fb2f.jpg)

Budynek jest wentylowany grawitacyjnie, co jest coraz rzadziej stosowane w nowoczesnych budynkach biurowych, gdzie dominują systemy wentylacji mechanicznej. System wentylacyjny w budynku 2226 działa automatycznie, kontrolując jakość powietrza za pomocą czujników CO<sub>2</sub> umieszczonych na wysokości głowy człowieka. Kiedy poziom CO<sub>2</sub> w pomieszczeniu przekracza 1200 ppm (liczba cząstek na milion), system automatycznie otwiera kłapy wentylacyjne przy oknach, umożliwiając dopływ świeżego powietrza z zewnątrz. Światowa organizacja zdrowia WHO, normy ISO i ASHRAE wskazują graniczny poziom stężenia dwutlenku węgla dla pomieszczeń w których stale przebywają ludzie jako 1000 ppm, ale dzięki dużej wysokości pomieszczeń (3,30 metra), zużyte powietrze gromadzi się powyżej strefy użytkowej, co pozwala na dłuższe utrzymanie komfortu cieplnego bez potrzeby ciągłej wymiany powietrza. W praktyce, dopóki temperatura zewnętrzna nie spada poniżej zera, nie ma potrzeby dodatkowego dogrzewania pomieszczeń. W sytuacjach, gdy temperatura spada poniżej tego poziomu, ciepło generowane jest przez sztuczne oświetlenie, które dodatkowo pełni rolę systemu grzewczego w najchłodniejszych miesiącach.

Budynek 2226 stanowi manifestację minimalistycznej, energooszczędnej architektury, będącej alternatywą dla nowoczesnych biurowców z przeszklonymi fasadami, które wymagają skomplikowanych systemów HVAC do utrzymania komfortu cieplnego. Osiągnięcie komfortu wewnętrznego bez stosowania tradycyjnych technologii grzewczych czy wentylacyjnych jest wynikiem dogłębnej analizy fizyki budynku, odpowiedniego doboru materiałów oraz inteligentnej wentylacji grawitacyjnej (Eberle i in., 2016).

Osiągnięcie imponująco wysokiego stopnia efektywności energetycznej w opisywanym budynku uwarunkowane jest szeregiem unikalnych okoliczności, które umożliwiły jego realizację:

- Projektantem, inwestorem i użytkownikiem końcowym jest ten sam podmiot. Dzięki temu proces decyzyjny jest uproszczony i nie występują konflikty interesów.
- Specyficzna funkcja budynku pozwala na osiągnięcie dużych bytowych zysków ciepła, które nie występują np. w budynkach mieszkaniowych ze względu na inny charakter i harmonogram użytkowania.
- Dzięki połączeniu funkcji inwestora i użytkownika możliwe było odpowiednie zwiększenie budżetu projektu w celu zmniejszenia kosztów ponoszonych w trakcie eksploatacji; taki schemat postępowania jest pożądanym, ale trudnym, bądź niemożliwym do realizacji np. w przypadku budownictwa mieszkaniowego (model deweloperski).
- Przez zastosowanie indywidualnie opracowanego systemu zarządzania budynkiem, potrzebna jest wysoka świadomość użytkowników przy przekazywaniu informacji zwrotnej. Okres dopracowywania ustawień systemu budynku trwał 2 lata. Dzięki połączeniu funkcji użytkownika i projektanta możliwa była o wiele większa niż zazwyczaj kontrola nad funkcjonowaniem i zarządzaniem budynkiem.
- Budynek został zrealizowany jako wolnostojący w luźnej zabudowie miejskiej.
- Forma sześcianu o boku 24 m nie jest podatna na skalowanie w przypadku zastosowania w budynku o innej funkcji albo większego zapotrzebowania na przestrzeń.

Wszystkie wymienione aspekty w opinii autora decydują o ograniczonym stopniu uniwersalności zastosowanych rozwiązań i limitowanym potencjale do implementacji na większą skalę w przypadku budownictwa mieszkaniowego. Niemniej technologie zastosowane w budynku mają znakomity potencjał do szerszego zastosowania jako układy wspomagające tradycyjne rozwiązania instalacyjne. W szczególności nowatorski jest system inteligentnego zarządzania temperaturą i stężeniem dwutlenku węgla, który steruje otwieraniem okien w zależności od potrzeby dostarczenia świeżego powietrza.

## 5.2 Analiza przypadków badań wariantowych w literaturze

W tym podrozdziale podjęto analizę pięciu badań naukowych na podstawie opublikowanych artykułów, które koncentrują się na wpływie różnych parametrów na stopień efektywności energetycznej budynków. Każdy z przypadków uwzględnia różne czynniki, takie jak izolacja termiczna, materiały budowlane, wentylacja, źródła energii odnawialnej oraz zarządzanie zużyciem energii. Celem przeglądu tych artykułów jest ukazanie, w jaki sposób poszczególne parametry wpływają na optymalizację zużycia energii w budynkach, a także identyfikacja najbardziej skutecznych strategii, które mogą przyczynić się do zmniejszenia zużycia energii i poprawy efektywności energetycznej. Przeanalizowano następujące artykuły:

- *„Wymagania energetyczne dla budynków wielorodzinnych, a rozwiązania konwencjonalne”* autorstwa Adriana Trząskiego (Trząski, 2021)
- *„Wpływ współczynnika kształtu A/V na wielkość strat ciepła w budynku w świetle rosnących wymogów dotyczących izolacyjności termicznej przegród budowlanych”* autorstwa Marcina Kaczmarzyka (Kaczmarzyk, 2017)
- *„Influence of Envelope Design in the Optimization of the Energy Performance of a Multi-family Building”*, której autorami są: Maria Ferrara, Elisa Sirombo, Alberto Monti, Enrico Fabrizio, Marco Filippi (Ferrara i in., 2017)
- *„Bim-based energy analysis and optimization using insight 360 (case study)”*, której autorami są: Ahmed M. Maglad, Moustafa Houda, Raid Alrowais, Abdul Mateen Khan, Mohammed Jameel, Sardar Kashif Ur Rehman, Hamza Khan, Muhammad Faisal Javed, Muhammad Faisal Rehman (Maglad i in., 2023)
- *„Investigating the influence of building shape and insulation thickness on energy efficiency of buildings”*, której autorami są: Cristina Marincu, Daniel Dan, Ligia Moga (Marincu i in., 2024)

### 5.2.1 Wymagania energetyczne dla budynków wielorodzinnych a rozwiązania konwencjonalne

W ramach badań przeanalizowano różne warianty rozwiązań konwencjonalnych w zakresie optymalizacji energetycznej i ich wpływ na poziom wskaźników zapotrzebowania na energię budynku wielorodzinnego.

Parametrami zmiennymi w poszczególnych scenariuszach były:

- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien,
- rodzaj instalacji wentylacji,
- rozwiązania instalacyjne w zakresie CO i C.W.U.

Model bazowy używany w badaniach miał następujące założenia:

- liczba kondygnacji nadziemnych: 6,
- budynek podpiwniczony,
- powierzchnia ogrzewana: 6000 m<sup>2</sup>,
- kubatura ogrzewana: 16 200 m<sup>3</sup>,
- liczba mieszkańców: 240,
- liczba mieszkań: 70,
- strumień powietrza wentylacyjnego: 6480 m<sup>3</sup>/h,
- rodzaj wentylacji: naturalna,
- źródło ciepła: centralny kocioł niskotemperaturowy,
- sprawność instalacji c.o.: 0,80,
- sprawność instalacji c.w.u.: 0,52,
- lokalizacja: Warszawa,
- izolacyjność przegród zewnętrznych na poziomie wymaganym przez WT od 2021 r.

Scenariusze badawcze zakładały zmiany w następujących zakresach:

1. Poprawa izolacyjności cieplnej przegród nieprzezroczystych budynku – współczynniki U zostały obniżone w stosunku do modelu bazowego dla ścian zewnętrznych z 0,20 W/m<sup>2</sup>·K na 0,10 W/m<sup>2</sup>·K, dla dachu z 0,15 W/m<sup>2</sup>·K do 0,075 W/m<sup>2</sup>·K, dla stropu nad kondygnacją podziemną z 0,25 W/m<sup>2</sup>·K do 0,12 W/m<sup>2</sup>·K.
2. Poprawa izolacyjności cieplnej okien – współczynnik U został obniżony w stosunku do modelu bazowego dla okien z 0,9 W/m<sup>2</sup>·K na 0,5 W/m<sup>2</sup>·K.
3. Zastosowanie odzysku ciepła z powietrza wentylacyjnego oraz obniżenie strumienia powietrza w nocy - zaproponowano zastąpienie instalacji wentylacyjnej naturalnej instalacją wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła o sprawności nominalnej 95% (średnia w sezonie 65,5%). Dodatkowo w obliczeniach przyjęto, że system wentylacji będzie umożliwił redukcję podstawowego strumienia powietrza wentylacyjnego w nocy do poziomu 5670 m<sup>3</sup>/h.
4. Poprawa sprawności instalacji c.o. i c.w.u. poprzez zastosowanie ogrzewania mieszkaniowego - zaproponowano poprawę sprawności instalacji c.o. poprzez zastąpienie centralnej instalacji grzewczej ogrzewaniem mieszkaniowym z gazowym kotłem kondensacyjnym. Ponadto zaproponowano usprawnienie systemu regulacji dzięki zastosowaniu zaworów termostatycznych z funkcjami- adaptacyjną i optymalizującą.
5. Poprawa sprawności instalacji c.w.u. poprzez zastosowanie miejscowych podgrzewaczy przepływowych - zaproponowano zastąpienie centralnego systemu przygotowania c.w.u. miejscowymi gazowymi podgrzewaczami przepływowymi bezpośrednio przy punktach poboru.
6. Scenariusz 6. zakładał połączenie wszystkich poprzednich metod optymalizacji energetycznej.

Tabela 17. Wartości EU, EK, EP osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy.  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Trząski, 2021

wariant	współczynnik	ogrzewanie i wentylacja	C.W.U	urządzenia pomocnicze	suma
		jednostka = kWh/m <sup>2</sup> ·rok			
bazowy	EU	17,9	24,1	3,6	45,6
	EK	22,3	46,0	3,6	71,9
	EP	24,5	50,6	10,7	85,8
1	EU	13,9	24,1	3,5	41,5
	EK	17,3	46,0	3,5	66,8
	EP	19,0	50,6	10,5	80,1
2	EU	15,2	24,1	3,5	42,8
	EK	18,9	46,0	3,5	68,4
	EP	20,8	50,6	10,6	82,0
3	EU	4,1	24,1	6,0	34,2
	EK	5,1	46,0	6,0	57,1
	EP	5,7	50,6	18,0	74,3
4	EU	17,9	24,1	3,6	45,6
	EK	20,5	41,7	3,6	65,8
	EP	22,5	45,8	10,7	79,0
5	EU	17,9	24,1	3,6	45,6
	EK	22,3	28,3	3,6	54,2
	EP	24,5	31,2	10,7	66,4
1+5	EP	-	-	-	60,8
1+2+5	EP	-	-	-	57,1
1+2+3+5	EP	-	-	-	49,1
1+2+3+4+5	EP	-	-	-	48,6

Autor artykułu wnioskuję, że w założonym modelu bazowym, osiągnięcie wskaźnika EP określonego w WT 2021 poprzez samą poprawę izolacyjności cieplnej przegród jest niewykonalne. Nawet zastosowanie wentylacji mechanicznej z wysokosprawnym odzyskiem ciepła nie gwarantuje spełnienia tego warunku. Głównym powodem jest struktura zapotrzebowania na energię w analizowanym budynku mieszkalnym, gdzie prawie 60% bilansu energetycznego przypada na ciepłą wodę użytkową. Autor sugeruje, że rozwiązaniem mogą być alternatywne źródła energii, takie jak źródła odnawialne, np. pompy ciepła oraz systemy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej.

Analiza wyników wykazała, że największy wpływ na zmniejszenie zapotrzebowania na energię użytkową badanego budynku osiągnięto dzięki zastosowaniu instalacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła. Ponadto, przez radykalne obniżenie współczynnika przenikalności U do poziomu budynków pasywnych, w badanym przypadku można liczyć na obniżenie współczynnika EP na poziomie ok 11%, a współczynnika EU na poziomie 15%. Należy także podkreślić, że scenariusz stosowania indywidualnych spalinyowych źródeł ciepła w postaci kotłów znacząco zwiększa nakłady inwestycyjne i skomplikowanie instalacji oraz zmniejsza powierzchnię mieszkań ze względu na konieczność lokalizacji we wnętrzu kotła oraz dodatkowych kanałów spalinyowych. Podobne zastrzeżenia dotyczą scenariusza 5. i zastosowania miejscowych podgrzewaczy przepływowych.



## 5.2.2 Wpływ współczynnika kształtu a/v na wielkość strat ciepła w budynku

Celem badań było określenie wpływu zwartej bryły na wielkość sezonowych strat ciepła kiedyś i współcześnie. Metodę badawczą oparto na obliczeniach sezonowych strat ciepła w budynkach o różnych stosunkach powierzchni przegród zewnętrznych do kubatury budynku A/V.

Parametrami zmiennymi w poszczególnych scenariuszach były:

- liczba kondygnacji nadziemnych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien,
- stosunek powierzchni elewacji,
- współczynnik zwartości bryły A/V.

Model bazowy używany w badaniach miał następujące założenia:

- kształt prostopadłościenny,
- powierzchnia całkowita 250 m<sup>2</sup>,
- kubatura ogrzewana: 650 m<sup>3</sup>,
- powierzchnia okien równa 1/8 PC,
- ściany dwuwarstwowe oraz ciągłą izolację termiczną na całej powierzchni obudowy termicznej,
- liczbę stopniogodzin w sezonie grzewczym przyjęto jako 90 kKh, co jest typową wartością dla obszaru Polski,
- nie uwzględniano strat ciepła przez wentylację.

Scenariusze badawcze zakładały zmiany w następujących zakresach:

1. Obliczenia zostały przeprowadzone dla dziewięciu grup izolacyjności termicznej budynków, reprezentowanych dalej przez rok wydania lub początku obowiązywania wymogów dotyczących współczynnika przenikania ciepła U,
2. Liczba kondygnacji nadziemnych: 1-3,
3. Stosunek powierzchni elewacji od 1:1 do 1:3,
4. A/V: 0,83 do 1,26.

Tabela 18. Wartości Q max, Q min, Q osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kaczmarzyk, 2017

		grupy izolacyjności termicznej								
		1964	1974	1982	1991	2002	2008	2013	2017	2021
Q max	kWh	80895,11	72217,66	52939,04	42208,77	32240,53	27243,38	20868,13	19123,21	16976,07
Q min	kWh	59547,43	56564,60	39284,08	31745,75	23487,23	20934,68	16433,13	14843,67	12925,48
ΔQ	kWh	21347,68	15653,06	13654,96	10463,02	8753,30	6308,70	4435,00	4279,54	4050,59
stosunek ΔQ do Q max		26,4%	21,7%	25,8%	24,8%	27,1%	23,2%	21,3%	22,4%	23,9%
stosunek ΔQ do ΔQ 1964		100,0%	73,3%	64,0%	49,0%	41,0%	29,6%	20,8%	20,0%	19,0%

Qmax [kWh] – najwyższa wartość strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

Qmin [kWh] – najniższa wartość strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

ΔQ [kWh] różnica najwyższych i najniższych wartości strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

Wnioski autora artykułu wskazują, że znaczący wzrost izolacyjności termicznej budynku ma istotny wpływ na zmniejszenie strat ciepła przez przenikanie, osiągając poziom pięciokrotnie niższy niż wymagania z 1964 roku. Obniżenie stosunku A/V powoduje proporcjonalne zmniejszenie strat ciepła przez termiczną obudowę budynku. Zauważono, że budynki o niskim współczynniku A/V, czyli o bryle

zbliżonej do sześcianu, charakteryzują się najmniejszymi stratami ciepła. Analizując oszczędności energetyczne wynikające z redukcji A/V w różnych kategoriach izolacyjności termicznej, można stwierdzić, że potencjalne korzyści zmniejszają się wraz z poprawą izolacyjności przegród. Z tego wynika, że w bardzo dobrze izolowanych budynkach, takich jak budynki pasywne, dążenie do zachowania zwartej bryły nie jest konieczne, ponieważ wysoka izolacyjność termiczna redukuje wpływ współczynnika A/V na straty ciepła. Obecnie, wysoka izolacyjność termiczna daje większą swobodę w projektowaniu architektonicznym budynków o zróżnicowanej geometrii.

### 5.2.3 Wpływ przegród zewnętrznych na optymalizację energetyczną budynku wielorodzinnego

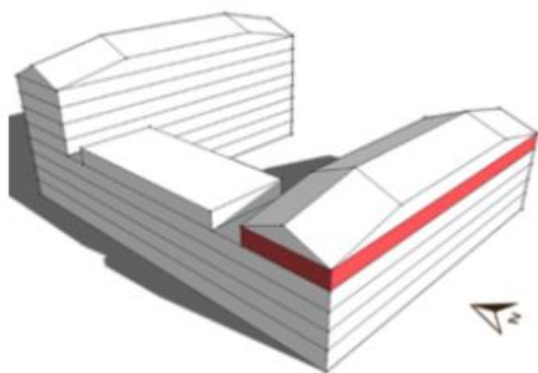
Badania miały na celu zastosowanie metodologii optymalizacji opartej na symulacji do optymalizacji sprawności energetycznej budynku wielorodzinnego przeznaczonego na mieszkania socjalne. Wykonano model BIM istniejącego budynku i oceniono wpływ zmienności kilku parametrów projektowych na zapotrzebowanie na ogrzewanie i chłodzenie.

Parametrami zmiennymi w poszczególnych scenariuszach były:

- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien,
- wielkość przeszkleń (WWR).

Model bazowy używany w badaniach miał następujące założenia:

- lokalizacja: Cremona, Włochy,
- budynek wielorodzinny o rzucie w kształcie litery C,
- powierzchnia badanego piętra – 466 m<sup>2</sup>,
- współczynnik A/V dla piętra 0,46,
- izolacyjność ścian zewnętrznych na poziomie  $U = 0,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,
- izolacyjność okien na poziomie  $U = 1,45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,
- sprawność instalacji c.o.: 0,88,
- sprawność instalacji c.w.u.: 0,85,
- wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła,
- wskaźnik EP = 73,6 kWh/m<sup>2</sup> · rok.



Ilustracja 29. Uproszczona bryła badanego budynku wielorodzinnego przeznaczonego na mieszkania socjalne.

Źródło: (Ferrara i in., 2017)

Scenariusze badawcze zakładały zmiany w następujących zakresach:

1. zmiana wartości współczynnika przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
2. zmiana typu zastosowanych okien na konstrukcje z różnymi parametrami izolacyjności termicznej i przepuszczalności promieniowania słonecznego,
3. wielkości powierzchni przeszkleń.

Analiza parametryczna przedstawiona w tekście ukazuje wpływ zmian wybranych parametrów projektowych na zapotrzebowanie na ogrzewanie i chłodzenie budynku. Wyniki pokazują, że modyfikacje

dotyczące nieprzezroczystych elementów obudowy budynku mają odwrotny wpływ na zapotrzebowanie na ogrzewanie i chłodzenie. Na przykład, zwiększenie grubości izolacji ścian prowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na ogrzewanie o 8%, ale zwiększa zapotrzebowanie na chłodzenie do 5%. Z kolei parametry związane z systemami zacieniającymi mają szczególnie duże znaczenie dla orientacji południowej budynku – zmniejszenie głębokości loggii obniża zapotrzebowanie na ogrzewanie, ale podnosi zużycie energii na chłodzenie o 25%.

W przypadku przezroczystych elementów, takich jak okna, zastosowanie niektórych typów zmniejsza zarówno zapotrzebowanie na ogrzewanie, jak i chłodzenie, zwłaszcza na południowej i północnej stronie budynku (efekt na poziomie 4%-6%). Okna o niskim współczynniku U i zrównoważonym współczynniku przepuszczalności promieniowania (g) skutecznie redukują zapotrzebowanie na ogrzewanie bez wpływu na chłodzenie. Z kolei okna z niższym współczynnikiem g, ale podobnym współczynnikiem U, mają odwrotny wpływ, zwiększając zapotrzebowanie na chłodzenie.

Ogólna analiza pokazuje, że zmiany w orientacji zachodniej są mniej istotne ze względu na małą powierzchnię przezroczystą, podczas gdy na południowej stronie wyniki są bardziej zróżnicowane. Zwiększenie szerokości okien, niezależnie od orientacji, prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia.

Największy wpływ na roczne zapotrzebowanie na energię mają: opór cieplny nieprzezroczystej obudowy zewnętrznej, charakterystyka systemów osłon przeciwsłonecznych na południowej stronie budynku oraz rodzaj zastosowanych okien.

Proces optymalizacji umożliwił ocenę tysięcy konfiguracji budynku, co doprowadziło do znalezienia rozwiązania, które zmniejsza zapotrzebowanie na energię pierwotną do ogrzewania o 26%-33%, a do chłodzenia o 22%-51%. Uwzględniając także zużycie energii na ciepłą wodę użytkową i wentylację, optymalny scenariusz zmniejsza całkowite zużycie energii pierwotnej o około 20% w porównaniu do pierwotnego scenariusza. Oznacza to, że proces optymalizacji skutecznie obniżył zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, redukując ich wpływ na całkowite zużycie energii w analizowanym budynku. W optymalnym rozwiązaniu różnice w zapotrzebowaniu na energię i koszty operacyjne między poszczególnymi mieszkaniami zostały zminimalizowane. Badanie podkreśla, że skuteczny projekt wymaga jednoczesnej optymalizacji wielu zmiennych projektowych, proponując narzędzie symulacyjne do tego celu.

#### 5.2.4 Analiza i optymalizacja energetyczna z wykorzystaniem Autodesk Insight 360

Badanie to analizuje charakterystykę energetyczną budynku akademickiego jako studium przypadku w celu optymalizacji zużycia energii poprzez obracanie budynku w odstępach 45 stopni i wykorzystanie BIM do instalacji energooszczędnych materiałów budowlanych. Do badań wykorzystano program Autodesk Insight.

Parametrami zmiennymi w poszczególnych scenariuszach były:

- orientacja budynku,
- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien,
- udział przeszkleń (WWR),
- harmonogram użytkowania,
- zużycie energii elektrycznej.

Model bazowy używany w badaniach miał następujące założenia:

- lokalizacja: Abbottabad, Pakistan,
- budynek akademicki uniwersytetu w COMSATS Islamabad,
- powierzchnia budynku 1040 m<sup>2</sup>.

Scenariusze badawcze zakładały zmiany w następujących zakresach:

1. obrót bryły budynku o 360 stopni co 45 stopni,
2. zastosowano ściany o różnych stopniach izolacji,
3. zmiana typu okien na konstrukcje z różnymi parametrami izolacyjności termicznej i przepuszczalności promieniowania słonecznego,
4. udział przeszkleń (WWR) wariantowany był w zakresie od 15 do 35% na poszczególnych elewacjach,
5. zmiana stopnia szczelności budynku.

Wynikiem przeprowadzonych badań było opracowanie pięciu najbardziej optymalnych scenariuszy, z których najbardziej optymalny zakładał wyposażenie budynku w wentylację ze sterowaniem zmiennym strumieniem powietrza i zastosowaniem przeszkleń w ramach aluminiowych z obniżonym współczynnikiem przewodzenia ciepła.

Ze względu na panujący klimat w miejscu przeprowadzenia badań, rozwiązania w niskim stopniu dotyczyły ogrzewania budynku. Autorzy doszli do wniosku, że dobre projektowanie wymaga jednoczesnej optymalizacji wielu zmiennych projektowych, co umożliwi lepsze dostosowanie budynku do potrzeb energetycznych. Kluczowym aspektem było również uwzględnienie zmian klimatycznych i wzorców energetycznych w różnych orientacjach budynków względem stron świata, co pozwala na wypracowanie optymalnych rozwiązań pod kątem minimalizacji zużycia energii. Opracowanie nowych metod poprawy efektywności energetycznej budynków ma ogromne znaczenie, szczególnie w krajach borykających się z niedoborami energii, takich jak Pakistan. Zastosowanie technologii BIM na wczesnych etapach projektowania może prowadzić do znacznych oszczędności energetycznych i kosztowych, jednocześnie promując zrównoważony rozwój i innowacje w budownictwie.

### 5.2.5 Badanie wpływu kształtu budynku i grubości izolacji na efektywność energetyczną budynków

Badanie ocenia wpływ kształtu budynku i grubości izolacji ścian na ogólny transfer ciepła w budynku i jego wpływ na roczne zapotrzebowanie na ogrzewanie. Obiektem badania były 3 budynki mieszkalne zlokalizowane w mieście Timisoara w Rumunii.

Parametrami zmiennymi w poszczególnych scenariuszach były:

- współczynnik zwartości bryły A/V,
- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien.

Użyto trzech modeli bazowych istniejących budynków (B1, B2, B3):

- powierzchnia przegród zewnętrznych: 632,89 m<sup>2</sup>, 758,00 m<sup>2</sup>, 571,35 m<sup>2</sup>,
- kubatura: 948,61 m<sup>3</sup>, 1013,4 m<sup>3</sup>, 545,85 m<sup>3</sup>,
- powierzchnia pomieszczeń ogrzewanych: 280,39 m<sup>2</sup>, 302,11 m<sup>2</sup>, 154,51 m<sup>2</sup>,
- współczynnik zwartości bryły: 0,67; 0,72; 1,05,
- współczynnik przenikania ciepła U dla dachów budynków został przyjęty jako 0,113 W/m<sup>2</sup>·K,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien budynków został przyjęty jako 0,73 W/m<sup>2</sup>·K.

Scenariusze badawcze zakładały zmiany w grubości zastosowanej izolacji z płyt styropianowych EPS na ścianach zewnętrznych w zakresie od 100 do 300 mm. W rezultacie otrzymano przegrody o współczynniku przenikania ciepła U w zakresach od 0,32 do 0,121 W/m<sup>2</sup>·K. Badano także wpływ mostków cieplnych na ogólną wydajność budynku. Wyniki osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy przedstawiono w tabeli.

Tabela 19. Wartości współczynnika EU do ogrzewania [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ rok}$ ] osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Marincu i in., 2024

grubość izolacji ściany [mm]	wartość współczynnika EU do ogrzewania [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$ ]		
	B1	B2	B3
100	19,17	30,45	57,80
150	16,04	24,41	48,45
200	14,31	20,66	43,81
250	13,25	18,45	41,02
300	12,56	16,44	38,88

Wnioski autorów artykułu wskazują, że budynek B3 charakteryzuje się najwyższymi współczynnikami przenikania ciepła zarówno przez przegrody, jak i mostki termiczne. Różnica między B3 a pozostałymi budynkami jest wyraźna, natomiast porównanie B1 i B2 pokazuje jedynie niewielką przewagę współczynników przenikania ciepła na korzyść B1. W budynkach o niższych współczynnikach A/V (B1 i B2), wpływ grubości izolacji na współczynniki przenikania ciepła jest mniej zauważalny. Przy wyższych współczynnikach A/V konieczne może być zastosowanie grubszej izolacji, aby osiągnąć określony poziom efektywności energetycznej.

Obliczenia procentowego udziału transferu ciepła związanego z mostkami termicznymi w całkowitym przenikaniu ciepła wykazały, że dla budynku B1 wynosi on od 7% do 10%, dla B2 od 11% do 12%, a dla B3 od 17% do 20%. Wartości te są niemal dwukrotnie wyższe w przypadku B3 w porównaniu do B1 i B2, które mają zbliżone wyniki. Oznacza to, że wyższy współczynnik A/V w B3 zwiększa negatywny wpływ mostków termicznych na ogólny bilans ciepła. W każdym z budynków procentowy udział transferu ciepła maleje wraz z większą grubością izolacji. Wzrost grubości izolacji ścian ma większy wpływ na współczynniki przenikania ciepła w budynkach o wyższym współczynniku A/V. Autorzy rekomendują uwzględnianie współczynnika A/V w krajowych kodeksach i przepisach budowlanych jako czynnik określający zgodność ze standardami efektywności energetycznej.

### 5.2.6 Wnioski

Analiza literatury przedmiotu dotyczącej prowadzenia badań symulacyjnych w odniesieniu do modelu bazowego ukazała różne metody wariantowania metod optymalizacji energetycznej. Najczęściej badanym parametrem jest współczynnik przenikania ciepła U przez przegrody zewnętrzne oraz modyfikacje kształtu bryły. Wyniki poszczególnych rozwiązań opisywane są i porównywane za pomocą współczynnika EU bądź EP, który był odnoszony do badań uwzględniających instalacje wewnętrzne. Metodologie opisywanych przypadków stanowiły referencję przy opracowywaniu metodologii własnych badań. Analizowane badania wskazały na znaczny udział instalacji w ogólnym bilansie energetycznym budynków i podkreśliły rolę stosowania instalacji o wysokim stopniu sprawności w osiąganiu lepszej efektywności energetycznej. W badaniach podkreślano duży wpływ izolacji na zmniejszenie zużycia energii, który w niektórych przypadkach był istotniejszy, niż sama forma i kształt badanych budynków.

W badaniach analizowano także zmianę parametrów, które w opinii autora dysertacji są nierozzerwalnie związane z funkcją budynku, takie jak harmonogram użytkowania, którego zmiana jest założeniem dość abstrakcyjnym. Niemniej, przeprowadzenie takiej hipotetycznej analizy może mieć wartość w przypadku budowania uniwersalnej bazy wiedzy na temat wpływu poszczególnych parametrów na optymalizację efektywności energetycznej budynków.

## 5.3 Analiza przypadków istniejących budynków zoptymalizowanych energetycznie

W celu określenia zakresów poszczególnych parametrów wpływających na wydajność energetyczną, szczegółowej analizie zostały poddane przypadki zrealizowanych obiektów. Następnie zostały określone przedziały wartości tych parametrów na tle wcześniejszych badań literaturowych.

### 5.3.1. Kryteria

Przy wyborze obiektów do analizy przyjęto następujące kryteria:

1. Standard energetyczny – kluczowym kryterium był przeprowadzony w trakcie projektowania proces optymalizacji energetycznej. Osiągnięte to zostało poprzez dobór przypadków, których efektywność energetyczna przewyższa wymagane w okolicznościach jego powstawania wymagane minimum. Ewaluacja spełnienia tego kryterium była przeprowadzona na podstawie przyznanych certyfikatów oraz deklarowanych wartości zużycia energii.
2. Funkcja budynku – analiza obejmuje budynki mieszkalne wielorodzinne, rozumiane jako budynki z wydzielonymi co najmniej trzema lokalami mieszkalnymi (*Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414, 1994*). Dopuszczono także budynki z towarzyszącą funkcją usługową w parterach. W przypadku zespołów mieszkaniowych do analizy włączono jeden z zespołu budynków o powtarzalnej charakterystyce.
3. Lokalizacja – wszystkie analizowane budynki zlokalizowane są w Europie. Dobre obiekty funkcjonują w podobnych warunkach klimatycznych, określonych na podstawie średnich temperatur z ostatnich lat. Budynki mieszczą się w krajach Unii Europejskiej i Wielkiej Brytanii, przez co wymagania formalnoprawne przy ich budowie miały podobną strukturę.
4. Data powstania – w związku z szybkim tempem zmian dotyczących wymagań energetycznych stawianych nowym budynkom, brano pod uwagę jedynie obiekty, których data realizacji nie była wcześniejsza niż 10 lat przed rozpoczęciem pracy badawczej autora (2020).

### 5.3.2. Wybór obiektów

Po przeprowadzonej wstępnej analizie 34 obiektów, wybrano 8, które spełniały wszystkie kryteria i ilość dostępnych danych była wystarczająca do przeprowadzenia badań szczegółowych. Podstawowe dane dotyczące budynków zostały przedstawione w poniższej tabeli.

Tabela 20. Podstawowe informacje charakterystyczne dotyczące szczegółowych przypadków poddanych analizie.

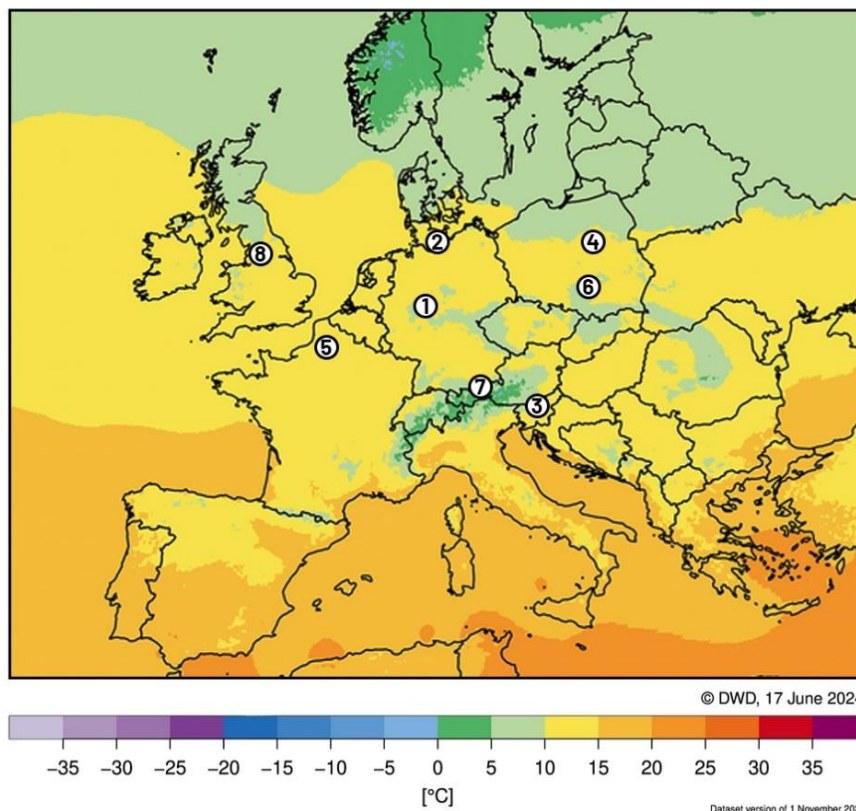
Źródło: opracowanie własne

1		nazwa	BelVista
		lokalizacja	Frankfurt, Niemcy
		autor	happarchitecture
		rok realizacji	2013
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	pasywny (PHI)
Ilustracja 30 Budynek BelVista we Frankfurcie. Źródło: <a href="https://www.happarchitecture.de/en/project/projekt/belvista">https://www.happarchitecture.de/en/project/projekt/belvista</a>			
2		nazwa	Woodcube
		lokalizacja	Hamburg, Niemcy
		autor	Architekturagentur
		rok realizacji	2013
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	neutralny ślad węglowy (PHI)
Ilustracja 31 Budynek Woodcube w Hamburgu Źródło: <a href="https://www.architekturagentur.de/assets/images/1/woody_05-ea1d29b4.jpg">https://www.architekturagentur.de/assets/images/1/woody_05-ea1d29b4.jpg</a>			

3		nazwa	ECO Silver House
		lokalizacja	Lubljana, Słowenia
		autor	Akropola
		rok realizacji	2014
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	pasywny (PHI)
<p><i>Ilustracja 32 Budynek ECO Silver House.</i>  <i>Źródło: <a href="http://www.akropola.si/modules/gallery/uploads/1a.jpg">http://www.akropola.si/modules/gallery/uploads/1a.jpg</a></i></p>			
4		nazwa	Villa Nova
		lokalizacja	Warszawa, Polska
		autor	Innebo
		rok realizacji	2015
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	NF15
<p><i>Ilustracja 33 Budynek Villa Nova.</i>  <i>Źródło: <a href="https://logi.lv/sites/default/files/id_energeto_7000.jpg">https://logi.lv/sites/default/files/id_energeto_7000.jpg</a></i></p>			
5		nazwa	Terrasse 9
		lokalizacja	Nanterre, Francja
		autor	AZC
		rok realizacji	2015
		funkcja	wielofunkcyjny
		standard energetyczny	zeroenergetyczny
<p><i>Ilustracja 34 Budynek terrasse 9 w Nanterre.</i>  <i>Źródło: <a href="https://azc.archi/postwork/Terrasse-9/#carousel-work-desktop">https://azc.archi/postwork/Terrasse-9/#carousel-work-desktop</a></i></p>			
6		nazwa	Share Home Silesia
		lokalizacja	Katowice, Polska
		autor	MBC
		rok realizacji	2021
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	nZEB, nagroda PASCAL 2022
<p><i>Ilustracja 35 Budynek Share Home Silesia w Katowicach.</i>  <i>Źródło: <a href="https://www.mbc.pl/wp-content/uploads/2023/11/1-3.jpg">https://www.mbc.pl/wp-content/uploads/2023/11/1-3.jpg</a></i></p>			
7		nazwa	Campagne House B
		lokalizacja	Innsbruck, Austria
		autor	bogenfeld Architektur
		rok realizacji	2022
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	pasywny (PHI)
<p><i>Ilustracja 36 Budynek Campagne House B.</i>  <i>Źródło: <a href="https://bogenfeld.squarespace.com/projekte/blog-post-title-three-9z8nz-a7n4p-6r685">https://bogenfeld.squarespace.com/projekte/blog-post-title-three-9z8nz-a7n4p-6r685</a></i></p>			
8		nazwa	Greenhaus
		lokalizacja	Salford, Wielka Brytania
		autor	Buttress architects
		rok realizacji	2024
		funkcja	mieszkalny, wielorodzinny
		standard energetyczny	pasywny (PHI)
<p><i>Ilustracja 37 Budynek Greenhouse w Salford.</i>  <i>Źródło: <a href="https://buttress.net/sites/default/files/styles/full_width_image/public/2024-07/greenhaus%20passivhaus%20salford.jpg?itok=Mzjt1WWW">https://buttress.net/sites/default/files/styles/full_width_image/public/2024-07/greenhaus%20passivhaus%20salford.jpg?itok=Mzjt1WWW</a></i></p>			

Przebadane obiekty znajdują się w strefie klimatycznej o zbliżonej do siebie charakterystyce. Większość budynków znajduje się w lokalizacjach, gdzie zakres średniej rocznej temperatury powietrza zawiera się w przedziale od 10 °C do 15 °C. Wyjątkiem jest budynek znajdujący się w Innsbrucku, gdzie średnia temperatura jest niższa.

### średnia temperatura roczna w 2023



- 1 BelVista
- 2 Woodcube
- 3 ECO Silver House
- 4 Villa Nova
- 5 Terrasse 9
- 6 Share Home Silesia
- 7 Campagne House B
- 8 Greenhaus

Ilustracja 38. Mapa Europy z oznaczoną średnią temperaturą roczną w 2023 i lokalizacją analizowanych przypadków.  
Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://www.dwd.de/EN/ourservices/rcccm/int/rcccm\\_month\\_ttt.html](https://www.dwd.de/EN/ourservices/rcccm/int/rcccm_month_ttt.html)

#### 5.3.3. Zakres badań

W ramach badań opracowano schemat badawczy obejmujący następujące informacje, cechy charakterystyczne i współczynniki:

- Lokalizacja,
- Data realizacji,
- Funkcja,
- Standard energetyczny,
- Powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze,
- Liczba mieszkań,
- Liczba kondygnacji nadziemnych i podziemnych,
- Izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych,
- Szczelność,
- Instalacje występujące w budynku,
- Zapotrzebowanie na energię.

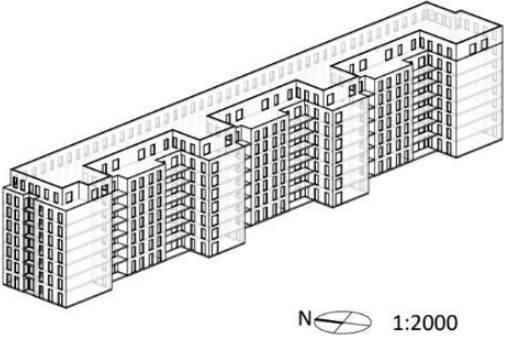
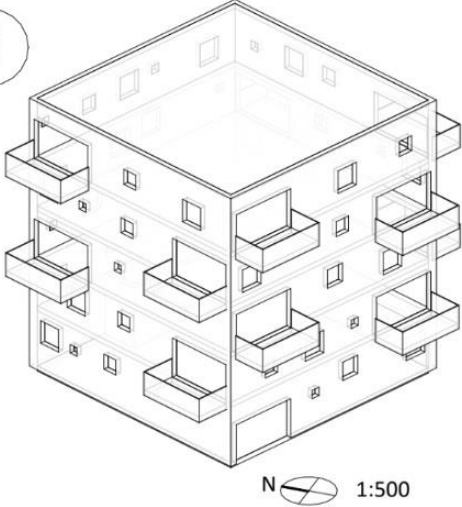
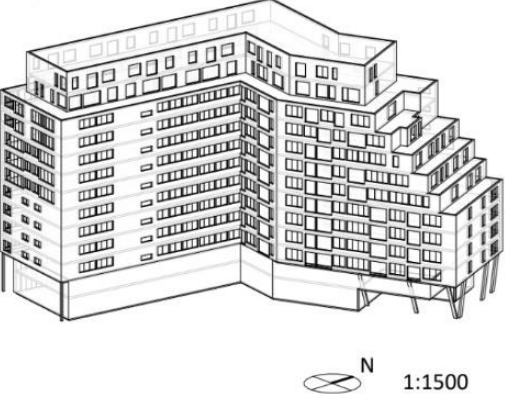
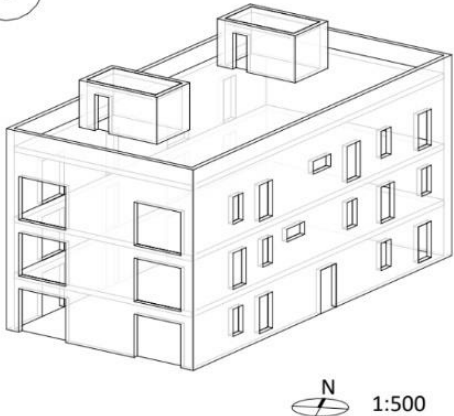


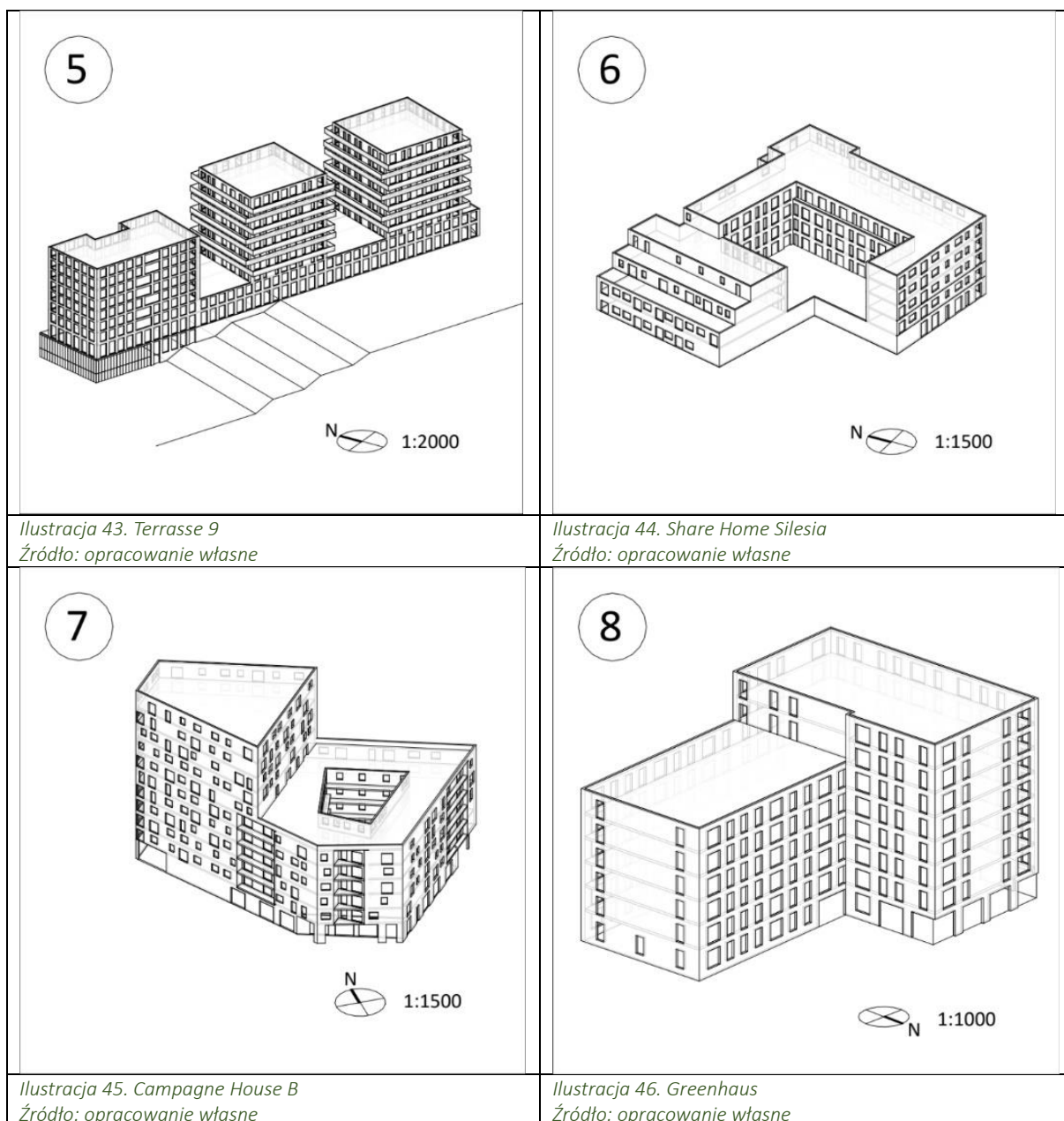
Na podstawie dostępnych danych sporządzono modele BIM każdego ze szczegółowo analizowanych przypadków, obejmujące lokalizację i geometrię budynku, przegrody zewnętrzne z uwzględnieniem okien i przeszkleń. Modele odpowiadają dokładności typowej dla projektu koncepcyjnego i zostały utworzone za pomocą oprogramowania Autodesk Revit 2024. Na ich podstawie określono wartości następujących parametrów:

- Orientacja względem stron świata,
- Powierzchnia całkowita,
- Kubatura,
- Typologia bryły,
- Współczynnik A/V,
- Proporcje powierzchni elewacji,
- Udział przeszkleń na poszczególnych elewacjach (WWR – Windows Wall Ratio).

Tabela 21. Aksonometrie szczegółowo analizowanych studiów przypadków, dla których wykonano uproszczone modele BIM. Oznaczono orientację względem stron świata. W prawym dolnym rogu opisano skalę rysunku.

Źródło: opracowanie własne

<p>1</p>  <p>N 1:2000</p>	<p>2</p>  <p>N 1:500</p>
<p>Ilustracja 39. BelVista Źródło: opracowanie własne</p>	<p>Ilustracja 40. Woodcube Źródło: opracowanie własne</p>
<p>3</p>  <p>N 1:1500</p>	<p>4</p>  <p>N 1:500</p>
<p>Ilustracja 41. ECO Silver House Źródło: opracowanie własne</p>	<p>Ilustracja 42. Villa Nova Źródło: opracowanie własne</p>



Ilustracja 43. Terrasse 9  
Źródło: opracowanie własne

Ilustracja 44. Share Home Silesia  
Źródło: opracowanie własne

Ilustracja 45. Campagne House B  
Źródło: opracowanie własne

Ilustracja 46. Greenhaus  
Źródło: opracowanie własne

Schemat badawczy opracowano w oparciu o metody optymalizacyjne opisane w podrozdziale 4.4 (tabela 15 str. 59), które zostały wyodrębnione na podstawie badań literaturowych oraz reflective practice (Kolb i Fry, 1975). Poszczególne badane parametrów odpowiadają metodom optymalizacyjnym w sposób zaprezentowany w poniższej tabeli:

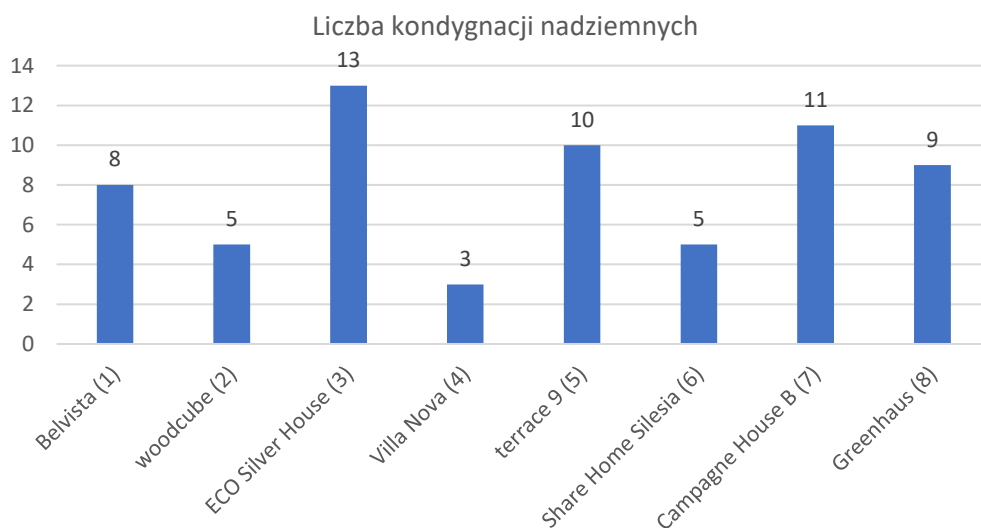
Tabela 22 Odniesienie schematu badawczego do metod optymalizacyjnych w praktyce architektonicznej (tabela 15)  
Źródło: opracowanie własne

	obszar tematyczny	działania	parametr
architektura	otoczenie zewnętrzne	orientacja budynku na działce	odchylenie od osi północ-południe
	geometria budynku	kontrola współczynnika zwartości formy	powierzchnia (PC), kubatura, A/V
		dostosowanie proporcji elewacji	proporcje elewacji
		rozmieszczenie i powierzchnia stolarki i ślusarki	udział szklenia na elewacji – WWR
	właściwości materiałowe	dobór izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych (U)	izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych
zapewnienie szczelności budynku		szczelność	

### 5.3.4. Informacje ogólne

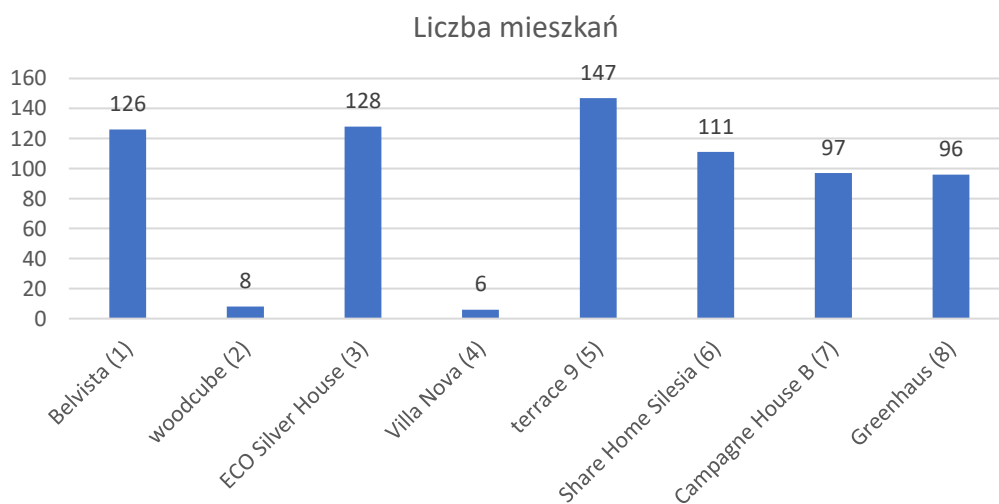
Aby odnieść badania do praktyki budowlanej na rynku polskim, obiekty zostały sklasyfikowane zgodnie z podziałem obowiązującym w prawie budowlanym. W celu określenia wymagań technicznych i użytkowych wprowadzono następujący podział budynków mieszkalnych według wysokości:

- **niskie (N)** – o wysokości do 4 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- **średniowysokie (SW)** – o wysokości ponad 4 do 9 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- **wysokie (W)** – o wysokości ponad 9 do 18 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- **wysokościowe (WW)** – o wysokości ponad 18 kondygnacji nadziemnych.



Ilustracja 47. Liczba kondygnacji nadziemnych w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

W badanych obiektach liczba kondygnacji wynosi od 3 do 13, co wskazuje na znaczną rozbieżność. Jeden z budynków zaliczono do niskich, 4 do średniowysokich, a pozostałe 3 do wysokich. Badane obiekty to budynki wielorodzinne, liczące od około 100 do 150 mieszkań. Wyjątkiem są dwa budynki, Woodcube i Villa Nova, które stanowią przykłady wczesnych realizacji wielorodzinnych budynków pasywnych w Europie i w Polsce i zostały uwzględnione ze względu na ich pionierski i istotny dla dziedziny charakter.



Ilustracja 48. Liczba mieszkań w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

W kontekście polskiego zasobu mieszkaniowego i sytuacji w sektorze budownictwa, analizowane budynki mają większą liczbę mieszkań niż średnia, która wynosi 44 mieszkania na budynek (GUS, 2024d). W klasyfikacji GUS obiekty z ponad 50 mieszkaniami znajdują się w najwyższej kategorii wielkości budynków mieszkaniowych.

Badania nie wykazały bezpośredniego związku liczby kondygnacji i mieszkań z ilością zużywanej energii przez budynek. Wskaźniki energetyczne są najczęściej przeliczane na powierzchnię budynku lub liczbę użytkowników. Jednakże liczba mieszkań może pośrednio wpływać na zużycie energii poprzez oddziaływanie na całkowitą powierzchnię i kubaturę budynku, co z kolei wpływa na współczynnik zwartości bryły A/V.

Kształt bryły budynków badano na podstawie modeli BIM, odnosząc je do typologii przestrzennej zaproponowanej przez Jana Pallado (Pallado, 2016). Bazuje on na kształcie rzutu i rozróżnia cztery rodzaje układów:

- **budynki punktowe** – o zwartym rzucie zbliżonym kształtem do figur foremnych
- **budynki odcinkowe** – o wydłużonych rzutach, zazwyczaj w formie prostokąta
- **budynki liniowe** – o rzutach, gdzie długość jest wielokrotnie większa niż szerokość
- **budynki płaszczyznowe** – z rzutami o znacznych wymiarach, często z dziedzińcem wewnętrznym, układem tarasowym lub w formie rozległej przestrzenie.

Tabela 23. Typologia przestrzenna analizowanych studiów przypadków w odniesieniu do kategoryzacji J. Pallado.

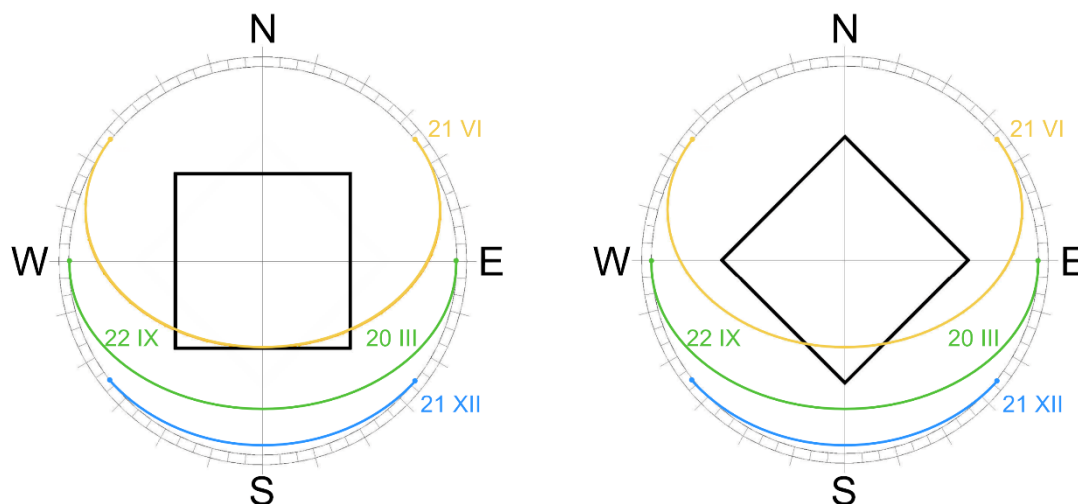
Źródło: opracowanie własne

punktowe	1
odcinkowe	1
liniowe	2
punktowo-liniowe	1
płaszczyznowe	3

Wszystkie przebadane szczegółowo przypadki można opisać za pomocą tych kategorii, z zastrzeżeniem budynku Terrasse 9, który jest przykładem obiektu hybrydowego, punktowo-liniowego, gdyż 2 najniższe kondygnacje nadziemne mają układ liniowy, natomiast kolejne kondygnacje to 3 segmenty o charakterze punktowym, opisane na rzucie kwadratu.

### 5.3.5. Orientacja

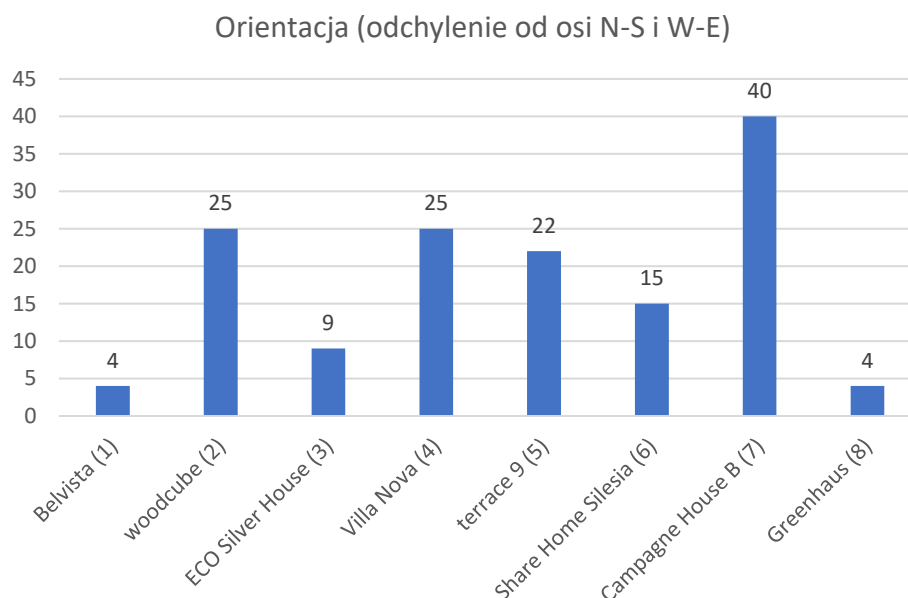
Parametr orientacji, wzięty pod uwagę w badaniach, rozumiany jest jako odchylenie głównej osi budynku od kierunków północ-południe lub wschód-zachód. Minimalną wartością jest 0 stopni, a maksymalną 45 stopni.



Ilustracja 49. Odchylenie budynku.

Źródło: opracowanie własne

Orientacja budynku ma duże znaczenie w dostępie światła do poszczególnych elewacji. Na ilustracji przedstawiono drogę wędrowki słońca w dniach przesilenia zimowego i letniego oraz obu równonocy zrzuconą na płaszczyznę. Badany budynek ma rzut kwadratu, a jego lokalizacja pokrywa się z szerokością i długością geograficzną Gliwic. Przebadano dwa skrajne przypadki, gdy odchylenie od osi północ-południe i wschód-zachód wynosi 0 dla pierwszego przypadku i 45 dla drugiego. Na lewej ilustracji można zaobserwować, że w ciągu dnia przez prawie cały rok oświetlone są trzy elewacje. W przypadku obrócenia rzutu o 45 stopni, w ciągu lata oświetlone są wszystkie cztery elewacje, natomiast w zimie tylko dwie. Dzięki świadomemu ustawieniu bryły względem stron świata możliwa jest kontrola zysków słonecznych oraz nagrzewania na poszczególnych fasadach.



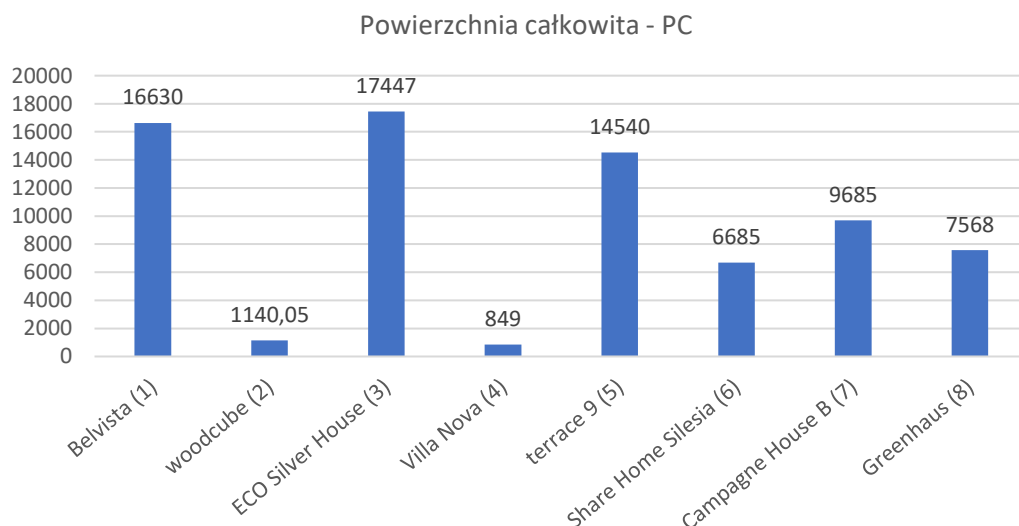
*Ilustracja 50. Orientacja (odchylenie od osi N-S i W-E) w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne*

Odchylenie od osi w większości opisywanych przypadków zawiera się w zakresie od 4 do 25 stopni, z wyjątkiem budynku Campagne House B. Należy jednak podkreślić, że jest to obiekt o najbardziej nieregularnym rzucie spośród opisywanych i jako główna oś została przyjęta elewacja, której płaszczyzna jest prostopadła do ulicy, przy której znajduje się budynek jako osi definiującej odbiór struktury w tkance urbanistycznej miasta. Jest to zbieżne z głównym ograniczeniem tego parametru. Orientacja budynku w wielu przypadkach jest definiowana poprzez układ urbanistyczny przestrzeni, w której znajduje się budynek, jak również przez prawo miejscowe (np. MPZP i obowiązujące w nich linie zabudowy) a także kształt i rozmiary działki, a przez to swoboda kształtowania tego parametru jest bardzo ograniczona. Pomimo tego, orientacja poszczególnych fasad w bardzo dużym stopniu wpływa na określanie innych cech; przede wszystkim proporcji powierzchni elewacji oraz udziału powierzchni przeszkleń, dzięki którym możliwe jest skorygowanie ograniczeń wynikających z narzuconej orientacji budynku.

### 5.3.6. PC, kubatura, A/V

W swoich badaniach Marcin Kaczmarzyk wskazuje na często wymienianą w literaturze przedmiotu (Butala i Novak, 1999; Chen i in., 2015; Danielski i in., 2012; Jevremovic i in., 2015; Marks, 1997) konieczność zachowania zwartej bryły budynku i uzyskanie możliwie niskiego współczynnika kształtu, celem ograniczenia powierzchni przegród zewnętrznych i w konsekwencji redukcji strat ciepła w budynku. Współczynnik A/V dla badanych przypadków został określony na podstawie wartości powierzchni elewacji i kubatury obliczonych przy pomocy modeli BIM. Powierzchnia całkowita obliczona jest zgodnie z metodologią wskazaną przez prawo budowlane, przywołującego normę PN-ISO 9836.

Powierzchnia całkowita budynku jest sumą powierzchni całkowitych wszystkich kondygnacji budynku, liczonych po zewnętrznym obrysie budynku. Kondygnacje, które brane są do wyliczenia powierzchni całkowitej, to kondygnacje nadziemne, poddasza, tarasy, tarasy na dachach, kondygnacje techniczne i kondygnacje magazynowe (PN-ISO 9836, 2022).

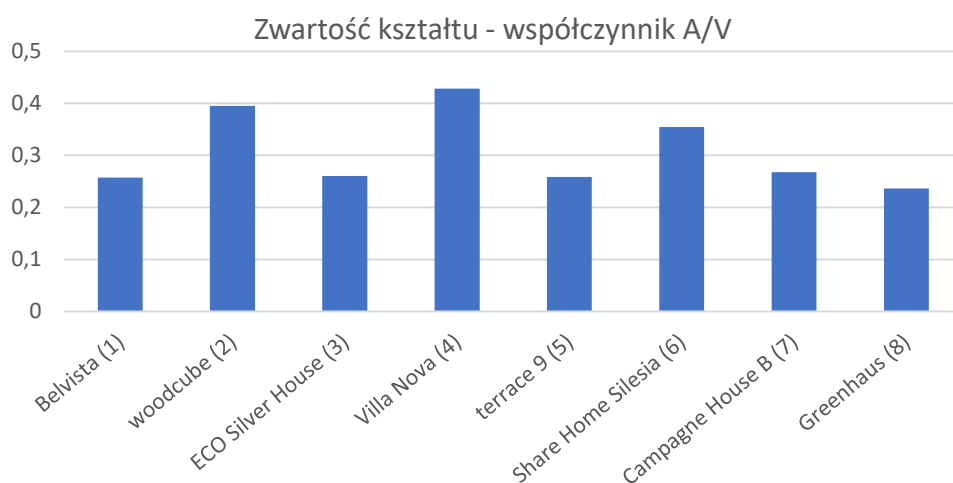


Ilustracja 51 Powierzchnia całkowita (PC) oraz liczba mieszkań w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

Powierzchnia całkowita budynków wynosi od 849 m<sup>2</sup> w przypadku Villa Nova do 17447 m<sup>2</sup> dla budynku ECO Silver House. Ze względu na zmienną średnią wielkość mieszkań proporcja ich liczby do powierzchni całkowitej nie zawsze odpowiada rozmiarom budynku.

Wielkość kubatur obiektów została wyliczona z pomiaru rzutu i wysokości budynków i kształtuje się w zakresie od 2971 m<sup>3</sup> do 53136 m<sup>3</sup>. Ze względu na zróżnicowane wysokości kondygnacji największym analizowanym obiektem pod tym względem jest BelVista, pomimo mniejszej PC niż ECO Silver House.

Współczynnik A/V został wyliczony jako A – suma pól powierzchni przegród budynku oddzielających część ogrzewaną od powietrza zewnętrznego, gruntu oraz pomieszczeń nieogrzewanych, V – kubatura ogrzewanej części budynku.



Ilustracja 52 Zwartość A/V w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

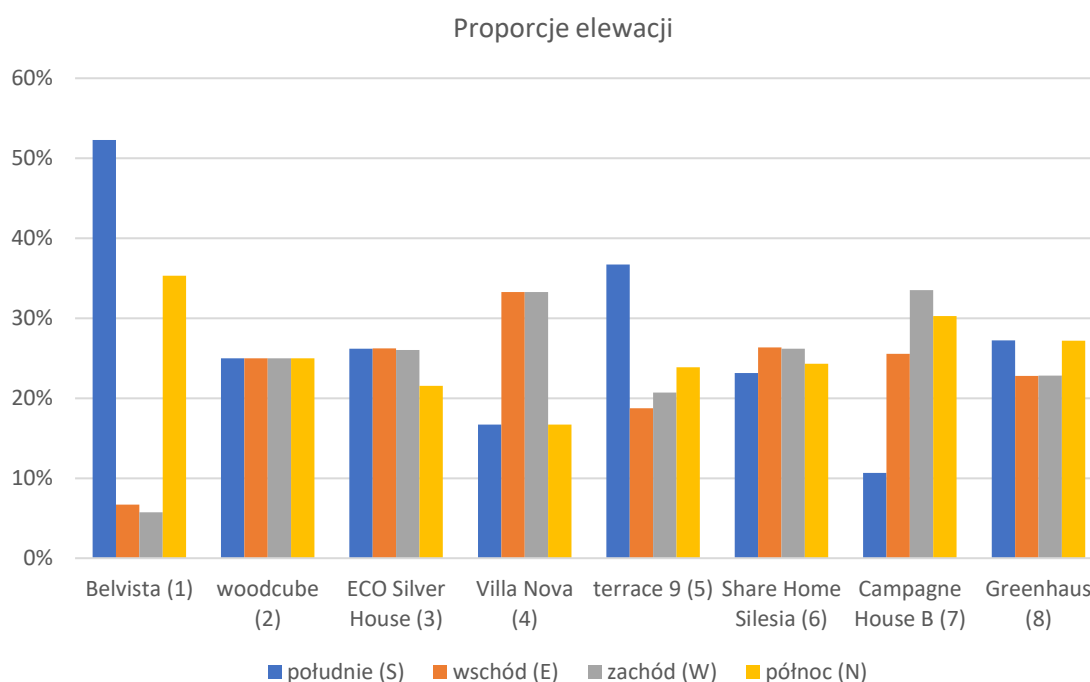
W wersjach Warunków Technicznych obowiązujących przed rokiem 2021 wymagania dotyczące wartości granicznych wskaźnika zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania były warunkowane na podstawie kategorii:

- **budynki zwarte** – A/V mniejsze niż 0,2
- **budynki o średniej zwartości** – A/V w zakresie 0,2 - 0,9
- **budynki niezwarne** – A/V większe niż 0,9

Współczynnik ten jest zależny od wielkości bryły i osiąga niższe wartości dla większych budynków, dlatego największą użyteczność parametr ten ma przy bezpośrednim porównywaniu budynków o tej samej kubaturze, na przykład w ramach wariantowania bryły. W badanych przypadkach współczynnik A/V jest utrzymywany na niskim poziomie, od 0,24 do 0,43 w przypadku najmniejszego budynku, co potwierdza wniosek płynący z badań literatury – że niskie AV stanowi cechę charakterystyczną budynków o niskim zużyciu energii.

### 5.3.7. Proporcje elewacji

Proporcje poszczególnych elewacji są parametrem, który jest w dużej mierze zależny od orientacji działki oraz budynku, natomiast w tej kwestii projektanci mają większą możliwość ich kształtowania. W przypadku budynków mieszkalnych duży udział w ostatecznym kształcie ma układ komunikacyjny, który często przypisany jest do poszczególnych rodzajów typologicznych układów przestrzennych budynków wielorodzinnych. Wyróżnia się układy komunikacyjne: bezklatkowe, klatkowe, korytarzowe, galeriowe i mieszane (Pallado, 2016). Wśród zbadanych przypadków dominują układy klatkowe. Występują także układy korytarzowe i mieszane, czyli układ klatkowy z wewnętrzną galerią, oraz układ klatkowy z krótkimi korytarzami, którego nie można zakwalifikować jako korytarzowy. Ponieważ przestrzenie komunikacyjne w budynkach wielorodzinnych zazwyczaj nie wymagają ogrzewania ani oświetlenia, pełnią funkcję buforów cieplnych (termicznych). Z badań wynika, że najczęściej umieszczane są przy elewacji północnej (N) lub wschodniej (E), chociaż zdarza się, że klatki schodowe znajdują się w centralnej (C) części budynku (Bać i Michalski, 2022).



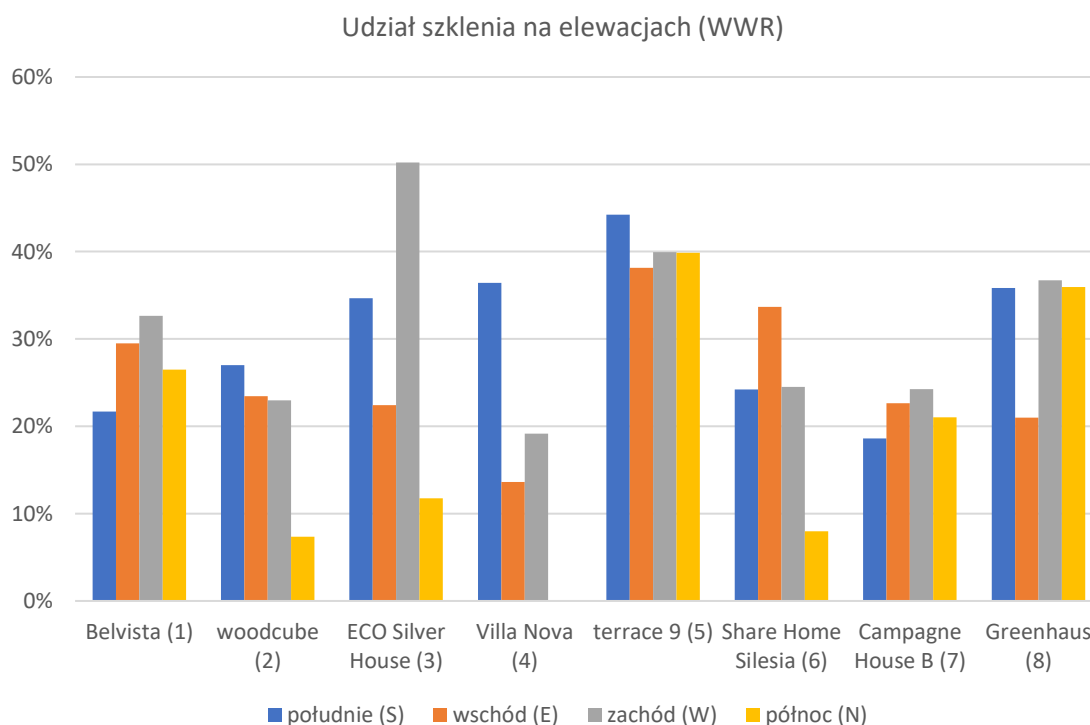
Ilustracja 53 Proporcje elewacji w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

Proporcje elewacji badanych budynków w większości przypadków są do siebie zbliżone. Nie zawsze zależy to od typologii budynku, ponieważ porównywalne proporcje elewacji mają zarówno budynki punktowe (2), płaszczyznowe (6,8) oraz budynek liniowy ECO Silver House, którego trakt jest załamany w połowie długości.

W opisywanych przypadkach można zauważyć, że powierzchnia elewacji północnej w stosunku do południowej jest równa bądź mniejsza, zgodnie z zasadami kształtowania brył budynków energooszczędnych (Zielonko-Jung, 2020), z wyjątkiem budynku Campagne House, który jednak, ze względu na swoją formę, łamie sztywny podział na 4 kierunki świata. Pięć elewacji łączonych pod kątami większymi niż 90, łączy w sobie różne ekspozycje, które w pełniejszy sposób wykorzystują wędrówkę słońca. W budynku BelVista (1), którego układ jest liniowy, elewacja południowa jest znacznie zróżnicowana pod względem formy, poprzez załamania, balkony, loggie i wykusze od prostej płaszczyzny elewacji północnej. Podobny efekt osiągnięto w przypadku obiektu Terrasse 9 (5), jednak w tym przypadku środkiem prowadzącym do zmniejszenia elewacji północnej jest zakopanie 2 pierwszych kondygnacji pod ziemią od strony północnej i zachowanie ekspozycji słonecznej od innych stron. Zabieg taki nie jest środkiem uniwersalnym, który jest możliwy do zastosowania w każdej przestrzeni urbanistycznej, niemniej wartym uwagi poprzez wykorzystanie kontekstu i uwarunkowań działki do świadomego kształtowania sprawności energetycznej budynku.

### 5.3.8. Stosunek powierzchni szklenia w do powierzchni elewacji – WWR (Windows Wall Ratio)

Kolejnym analizowanym parametrem był stosunek powierzchni okien do powierzchni całej elewacji (WWR). Poniższy wykres ilustruje udział szklenia na fasadach, z rozróżnieniem na kierunki świata: południe (S), wschód (E), zachód (W) i północ (N). Prezentuje dane dla ośmiu budynków, z których każdy wykazuje zróżnicowane wartości udziału szklenia na poszczególnych elewacjach. Największy udział szklenia występuje na elewacjach południowych, co jest związane z dążeniem do maksymalizacji zysków ciepłych od słońca. Na elewacjach wschodnich (E) i zachodnich (W) wartości te zazwyczaj plasują się pomiędzy skrajnościami obserwowanymi na południu (S) i północy (N).



Ilustracja 54. Udział szklenia na elewacjach (WWR) w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne



W prawie wszystkich przypadkach na elewacji północnej udział szklenia jest najmniejszy ze skrajnym przypadkiem budynku Villa Nova (4), który nie posiada żadnych przeszkleń od tej strony. W przypadku budynku BelVista (1) procent udziału szklenia na elewacji południowej jest niższy niż ten na elewacji północnej, co w budownictwie energooszczędnym jest sytuacją niecodzienną. Należy jednak przeanalizować ten fakt w zestawieniu z opisywanym wcześniej współczynnikiem proporcji elewacji, z którego wynika, że elewacja południowa ma znacznie większą powierzchnię niż północna. Dopiero dzięki jednoczesnej analizie tych dwóch wskaźników można zauważyć, że sumarycznie powierzchnia przeszkleń na elewacji południowej jest znacznie większa niż na północnej. Fakt ten zwraca uwagę, że żaden z opisywanych i analizowanych parametrów nie powinien być traktowany jako kategoriyczny wyznacznik budynku zaprojektowanego optymalnie, jeżeli jest traktowany wybiórczo.

Uzyskane wyniki zostały zestawione z zaleceniami dotyczącymi proporcji powierzchni przeszklonych do powierzchni całej elewacji (tabela 14, str. 58) (Zielonko-Jung, 2020).

*Tabela 24. Uzyskane wyniki badań zestawione z zaleceniami dotyczącymi proporcji powierzchni przeszklonych do pełnych wg. Zielonko-Jung (tabela 14).*

*Źródło: opracowanie własne*

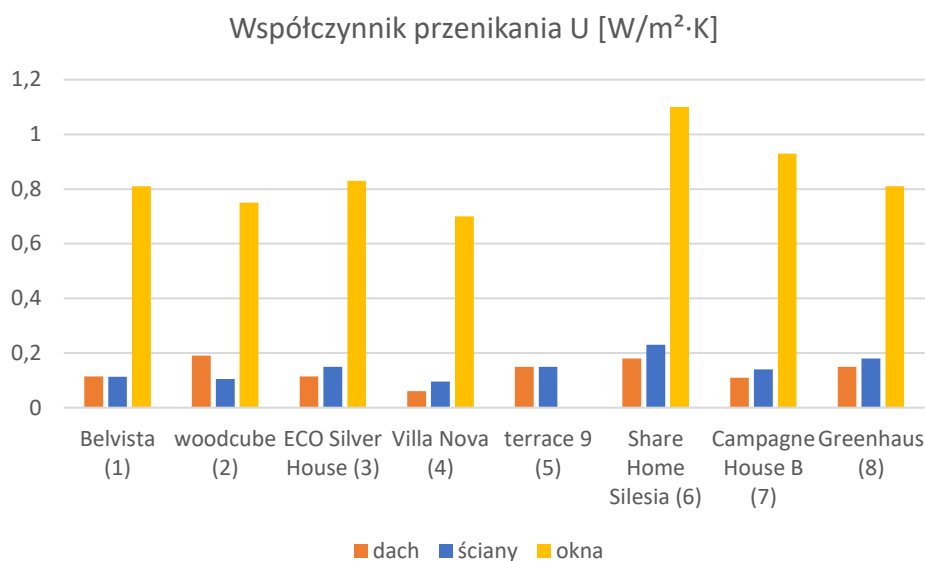
ELEWACJA	UDZIAŁ PRZESZKLEŃ	ROLA ENERGETYCZNA	WYNIKI BADAŃ PRZYPADKÓW
południowa (S)	30-50%	źródło pasywnych zysków cieplnych z energii słonecznej, oświetlenie wnętrz światłem dziennym	19- 44%
wschodnia (E)	20-50%	pasywne zyski ciepłe z energii słonecznej, oświetlenie wnętrz światłem dziennym	14 – 38%
zachodnia (W)	20-50%	pasywne zyski ciepłe z energii słonecznej, oświetlenie wnętrz światłem dziennym	19 – 50%
północna (N)	0-30%	oświetlenie wnętrz światłem dziennym (możliwość braku okien w pomieszczeniach niewymagających oświetlenia naturalnego)	0 – 40%

Wartości parametrów udziału przeszkleń w przypadku badanych obiektów nie pokrywają się w pełni z zaleceniami. Należy wziąć jednak pod uwagę, że zalecenia te dotyczą budynków o wszystkich funkcjach, a nie tylko budynków mieszkaniowych, które mają swoje specyficzne wymagania. Jednym z takich wymagań w prawie polskim jest wymóg zapewnienia powierzchni okien w stosunku do powierzchni pomieszczenia w relacji 1:8 (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, 2002). Przy projektowaniu większych budynków mieszkalnych w niektórych warunkach nie sposób całkowicie uniknąć lokalizacji pomieszczeń od strony północnej, a przez to lokalizacji okien z tej strony. Ponadto, także w przypadku budynku Terrasse 9 (5), w którym poziom udziału przeszkleń od strony północnej jest na poziomie 40%, należy wziąć pod uwagę pomniejszenie jej powierzchni w stosunku do bryły budynku poprzez podniesienie terenu w tym miejscu. Należy również pamiętać o ograniczeniach konstrukcyjnych i zapewnieniu prywatności mieszkańcom. Niemniej, orientowanie przeszkleń i zwiększanie ich powierzchni w celu zwiększania zysków solarnych jest cechą charakterystyczną budynków energooszczędnych.

### 5.3.9. Izolacyjność przegród zewnętrznych i szczelność powietrzna obudowy

Opisane powyżej parametry związane są bezpośrednio z działaniami optymalizacyjnymi w obszarze otoczenia zewnętrznego i geometrii budynku. Pozostałe obszary to właściwości materiałowe i detale wykonawcze. Izolacyjność przegród determinowana jest przez właściwości przewodzenia ciepła materiałów, z których jest wykonana. Najbardziej rozpowszechnionym wskaźnikiem opisującym niejednorodne struktury warstwowe jest współczynnik U. Izolacyjność przegród zewnętrznych badanych obiektów została podzielona na 3 zasadnicze rodzaje: dach, ściany zewnętrzne i okna. Współczynniki U dla dwóch autor nie odnalazł wśród dostępnych materiałów. W przypadku budynku Terrasse 9 (5) przyjęto współczynniki przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych U na poziomie  $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,

zgodnie z wytycznymi programu Passive House Institute, ponieważ deklarowane jest spełnienie tych wymagań. Dla budynku Share Home Silesia (6) przyjęto 0,23; 0,18 i 1,1 W/m<sup>2</sup>·K odpowiednio dla ścian, dachów i okien, ponieważ takie maksymalne parametry były wymagane prawnie w czasie sporządzania projektu



Ilustracja 55. Współczynnik przenikania U w analizowanych studiach przypadków.  
Źródło: opracowanie własne

W przypadku obiektów, dla których dane zostały upublicznione, można zauważyć, że większość z nich posiada współczynniki niższe od maksymalnej wartości dopuszczonej w polskim prawie budowlanym (PB), osiągając raczej wyniki porównywalne do standardu NF15. Wyjątkiem pod tym względem jest przekroczenie dachowe budynku Woodcube (2). Fakt ten dobitnie pokazuje, że standard jeszcze dekadę temu zarezerwowany dla budynków energooszczędnych, został wprowadzony w przypadku budowy każdego nowego obiektu referencyjnego.

Tabela 25. Zestawienie wymagań WT, NF15 i wyników badań U [W/m<sup>2</sup>·K].  
Źródło: opracowanie własne

przegroda	wymaganie WT	wymaganie NF15	przebadany zakres
dach	0,15 W/m <sup>2</sup> ·K	0,1 do 0,08 W/m <sup>2</sup> ·K	0,19 do 0,06 W/m <sup>2</sup> ·K
ściana zewnętrzna	0,20 W/m <sup>2</sup> ·K	0,1 do 0,08 W/m <sup>2</sup> ·K	0,18 do 0,095 W/m <sup>2</sup> ·K
okno	0,90 W/m <sup>2</sup> ·K	0,8 do 0,7 W/m <sup>2</sup> ·K	0,93 do 0,7 W/m <sup>2</sup> ·K

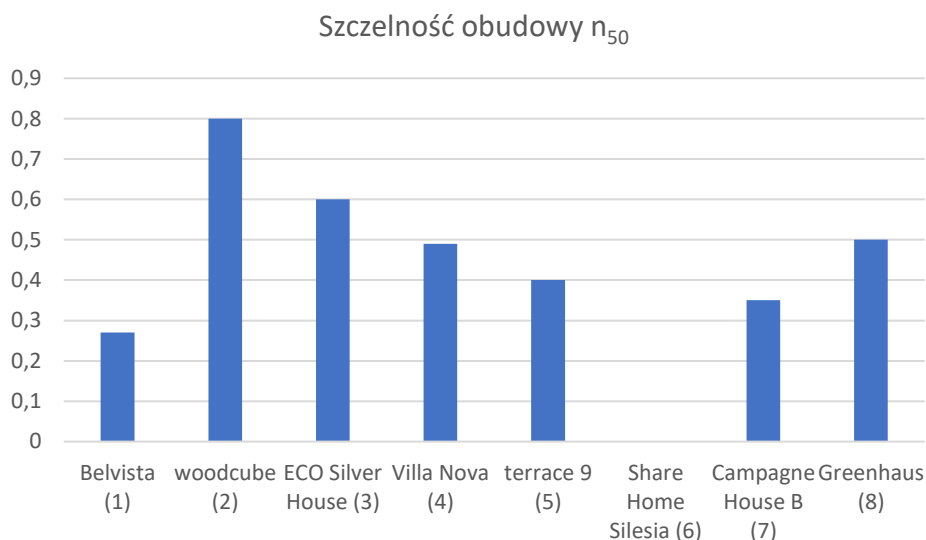
Dla budynków BelVista (1), ECO Silver House (3) i Greenhaus (5) wartości U dla okien zostały podzielone na ramę i szklenie, którego współczynniki przenikalności ciepła wynosiły kolejno 0,51; 0,50 oraz 0,48 W/m<sup>2</sup>·K, ponieważ, w przypadku okien wykonywanych przy użyciu współczesnych technologii rama jest najsłabszym ich punktem, co sugeruje, że stosowanie modułów z większym udziałem szklenia w stosunku do ramy jest działaniem bardziej pożądanym, jeśli chodzi o ograniczenie strat ciepła.

Niższa przenikalność cieplna wiąże się z mniejszymi zyskami słonecznymi, dlatego najbardziej zaawansowane okna nie zawsze są najlepszym wyborem dla każdego budynku, które różnią się długością sezonu grzewczego i/lub chłodniczego w zależności od swojego standardu energetycznego. Na przykład obiekty o wysokim standardzie energetycznym, jak budynki pasywne, wymagają ogrzewania przez najkrótszy czas, podczas gdy starsze budynki, czy te o niższym standardzie energetycznym, muszą być ogrzewane dłużej.

W kontekście minimalizacji zużycia energii na ogrzewanie kluczową rolę odgrywa ilość ciepła uzyskanego z promieniowania słonecznego w trakcie sezonu, która maleje wraz ze wzrostem izolacyjności okien. Zmiany te nie są jednak liniowe – do pewnego poziomu poprawa izolacyjności okien

obniża zapotrzebowanie na energię ciepłą, ale po przekroczeniu tego punktu zaczyna ono wzrastać. Z tego wynika, że nie zawsze najbardziej zaawansowane okna zapewniają najlepszy efekt z punktu widzenia efektywności energetycznej (Nowak, 2020).

Szczelność powietrzna obudowy badanych przypadków kształtuje się w granicach  $n_{50} = 0,27/h$  do  $n_{50} = 0,8/h$ . Dla budynku Share Home Silesia (6) dane nie były dostępne. Parametr ten pokazuje, w jakim stopniu budynek jest podatny na niekontrolowany przepływ powietrza, a w konsekwencji straty ciepła lub chłodu z niego wynikające.

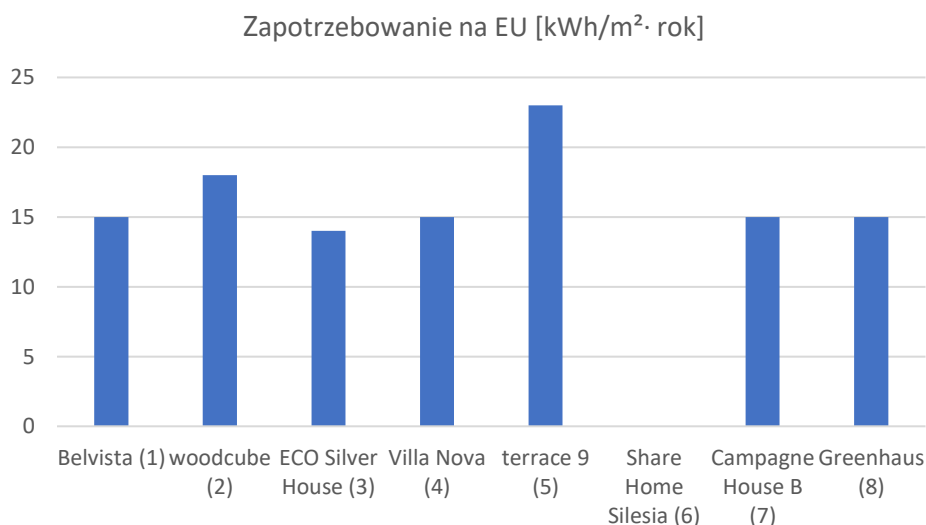


Ilustracja 56. Szczelność w analizowanych studiach przypadków.

Źródło: opracowanie własne

Określa on krotność wymiany powietrza w czasie 1 godziny przy różnicy ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego wynoszącej 50 Pa. W polskim prawie osiągnięcie konkretnych wartości tego wskaźnika nie jest wymagane, jedynie zalecane w WT i wynosi  $n_{50} < 3,0/h$  dla budynków z wentylacją grawitacyjną lub wentylacją hybrydową oraz  $n_{50} < 1,5/h$  dla budynków z wentylacją mechaniczną lub klimatyzacją. W standardzie NF40 i NF15 wartości te wynosiły odpowiednio:  $n_{50} < 1,0/h$  oraz  $n_{50} < 0,6/h$ . Badane budynki na tle tych standardów prezentują wyniki pozwalające umieścić je w najwyższych klasach szczelności.

### 5.3.10. Zapotrzebowanie na EU



Ilustracja 57. Zapotrzebowanie na EU [kWh/m<sup>2</sup> rok] w analizowanych studiach przypadków.

Źródło: opracowanie własne

Wszystkie badane budynki wykazują niskie zapotrzebowanie na energię użytkową, co było jednym z kluczowych kryteriów doboru przypadków. Dla Share Home Silesia (6) podana została jedynie wartość EP = 48 kWh/m<sup>2</sup>·rok, co także pozwala na klasyfikację tego budynku jako obiekt o obniżonym zapotrzebowaniu na energię względem obowiązujących wymagań. Za wyjątkiem Woodcube (2) i Terrasse 9 (5) reszta budynków spełnia także podstawowe kryterium konieczne do certyfikacji budynków pasywnych, jakim jest zapotrzebowanie na energię użytkową na cele ogrzewania w wysokości mniejszej lub równej od 15 kWh/m<sup>2</sup>·rok.

### 5.3.11. Instalacje

Badania instalacji dotyczyły źródła ciepła i sposobu jego dystrybucji w mieszkaniach, systemu wentylacji oraz instalacji ciepłej wody użytkowej. W stopniu szczegółowym są to zakresy wykraczające poza dziedzinę architektury, w ramach której realizowana jest niniejsza rozprawa, natomiast podstawowe założenia instalacyjne powinny być opracowywane w procesie projektowym na wczesnym etapie w asyście projektantów branżowych ze względu na ich znaczny udział w wydatkowaniu energetycznym budynku, a ich koordynacja i integracja z budynkiem wymagają także zaangażowania architektów.

Tabela 26. Źródła ciepła i sposób dystrybucji ciepła we wnętrzach analizowanych studiów przypadków.

Źródło: opracowanie własne

obiekt	źródło ciepła	dystrybucja w mieszkaniach
(1) Belvista	lokalna sieć ciepłownicza	ogrzewanie podłogowe
(2) Woodcube	lokalna sieć ciepłownicza	grzejniki
(3) ECO Silver House	lokalna sieć ciepłownicza + logotermy mieszkaniowe	<brak danych>
(4) Villa Nova	indywidualne pompy ciepła	klimakonwektory
(5) Terrasse 9	pompa ciepła + odzysk z kanalizacji sanitarnej	<brak danych>
(6) Share Home Silesia	kogenerator + kocioł gazowy	belki grzewczo-chłodzące
(7) Campagne Innsbruck House B	pompa ciepła	ogrzewanie podłogowe
(8) Greenhaus	pompa ciepła	grzejniki

Większość obiektów korzysta z pomp ciepła lub lokalnych sieci ciepłowniczych. Otrzymywanie ciepła za pomocą indywidualnego spalania paliw występuje tylko w Share Home Silesia (6). Metody dystrybucji ciepła obejmują ogrzewanie podłogowe, grzejniki oraz specjalistyczne systemy jak klimakonwektory i belki grzewczo-chłodzące. Dwa z obiektów nie mają określonych metod dystrybucji ciepła. Na tej podstawie można stwierdzić, że w budynkach energooszczędnych unika się spalania paliw oraz w większości stosowane są centralne źródła ciepła. System dystrybucji natomiast dostosowany jest do potrzeb i warunków konkretnego projektu.

Tabela 27. Sposób wentylacji oraz uzyskiwania ciepłej wody użytkowej w analizowanych studiach przypadków.

Źródło: opracowanie własne

obiekt	wentylacja	C.W.U.
(1) Belvista	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła na poziomie 81%	lokalna sieć ciepłownicza + pompy obiegowe
(2) Woodcube	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	źródło centralne
(3) ECO Silver House	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła na poziomie 80%	lokalna sieć ciepłownicza + logotermy mieszkaniowe
(4) Villa Nova	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	pompy ciepła
(5) Terrasse 9	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	pompa ciepła + zasobnik na każdy segment
(6) Share Home Silesia	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	kogenerator
(7) Campagne Innsbruck House B	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	lokalna sieć ciepłownicza
(8) Greenhaus	mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła	pompa ciepła

Każdy z badanych obiektów jest wentylowany przy pomocy instalacji wentylacji mechanicznej, nawiewno-wywiewnej. Co więcej, każda z tych instalacji jest wyposażona w system odzysku ciepła. Na tej podstawie można stwierdzić, że taki typ wentylacji jest cechą charakterystyczną dla budynków zoptymalizowanych energetycznie. Jest to cecha istotna ze względu na to, że odbiega od obecnego standardu panującego na polskim rynku mieszkaniowym w przypadku obiektów o dużej skali. Najczęściej stosowanym systemem jest wentylacja hybrydowa, bazująca na przewodach grawitacyjnych jedynie wspomaganym mechanicznie.

Instalacje ciepłej wody użytkowej bazują na źródłach centralnych w badanych przypadkach, z wyjątkiem Villa Nova (4), gdzie każde z mieszkań wyposażone jest w indywidualną pompę ciepła, co jest możliwe dzięki niewielkim rozmiarom budynku oraz z wyjątkiem ECO Silver House (3), gdzie zastosowano logotermy mieszkaniowe stanowiące indywidualne węzły cieplne służące do indywidualnego ogrzewania mieszkania i przygotowania C.W.U. Rozwiązanie takie daje niezależność od sezonu grzewczego w lokalnej sieci lub źródle centralnym. W dostępnych informacjach jedynie w odniesieniu do Terasse 9 (5) autor odnalazł informację o indywidualnych zasobnikach C.W.U na każdy segment budynku.

### 5.3.12. Karty wybranych przypadków

Przypadek 1		
<b>I Informacje ogólne</b>		
1	Nazwa	Belvista
2	Lokalizacja	Niemcy, Frankfurt
3	Autor	happarchitecture
4	Data realizacji	2013
5	Standard	Pasywny (PHI)
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
<b>II Cechy charakterystyczne</b>		
7	Typologia	Liniowiec (budynek liniowy)
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy (N)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	16630
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	53136
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	8
12	Liczba kondygnacji podziemnych	2
13	Liczba mieszkań	126
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	4
<b>III Zapotrzebowanie na energię</b>		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	116
16	EU (energia użytkowa) [[kWh/m <sup>2</sup> rok]]	15
<b>IV Instalacje</b>		
17	Źródło ciepła	Lokalna sieć ciepłownicza
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Lokalna sieć ciepłownicza
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła (81%)
20	Sposób dystrybucji ciepła	Ogrzewanie podłogowe
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	11698
<b>V Parametry budynku dot. architektury</b>		
22	Zwartość (A/V)	0,26
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	52
	Elewacja wschodnia (E)	7
	Elewacja zachodnia (W)	6
	Elewacja północna (N)	35
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	22
	Elewacja wschodnia (E)	3
	Elewacja zachodnia (W)	33
	Elewacja północna (N)	26
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,114
	Ściany	0,113
	Okna	0,81
	Szklenia	0,51
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,27







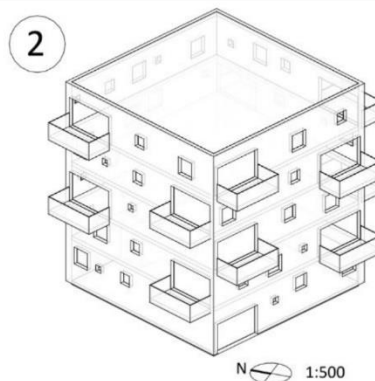
**EU=15**  
kWh/m<sup>2</sup>·rok

\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji  
 \*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):  
[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_2924](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_2924)  
<https://database.passivehouse.com/en/persons/buildingdocumentation/documentation/download/52>

## Przypadek 2

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Woodcube
2	Lokalizacja	Hamburg, Niemcy
3	Autor	Architekturagentur
4	Data realizacji	2013
5	Standard	Neutralny ślad węglowy (PHI)
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Punktowiec (budynek punktowy)
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy centralny (C)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	1140
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	3511
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	5
12	Liczba kondygnacji podziemnych	1
13	Liczba mieszkań	8
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	25
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	21
16	EU (energia użytkowa) [kWh/m <sup>2</sup> rok]	18
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Lokalna sieć ciepłownicza
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Lokalna sieć ciepłownicza
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Grzejniki ściennie
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	900
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,39
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	25
	Elewacja wschodnia (E)	25
	Elewacja zachodnia (W)	25
	Elewacja północna (N)	25
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	27
	Elewacja wschodnia (E)	23
	Elewacja zachodnia (W)	23
	Elewacja północna (N)	7
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,19
	Ściany	0,105
	Okna	0,75
	Szklenia	Bd
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,8



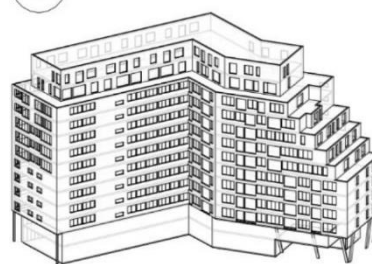
\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji  
 \*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):  
<https://www.deepgreen-development.com/woodcube-hamburg>

## Przypadek 3

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	ECO Silver House
2	Lokalizacja	Lubljana, Słowenia
3	Autor	Akropola
4	Data realizacji	2014
5	Standard	Pasywny (PHI)
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Liniowiec (budynek liniowy)
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowo - korytarzowy (N, E)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	17447
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	52341
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	13
12	Liczba kondygnacji podziemnych	4
13	Liczba mieszkań	128
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	9
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	106
16	EU (energia użytkowa) [[kWh/m <sup>2</sup> rok]]	14
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Lokalna sieć ciepłownicza, logotermy mieszkaniowe
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła (80%)
20	Sposób dystrybucji ciepła	Bd
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	10867
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,26
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	26
	Elewacja wschodnia (E)	26
	Elewacja zachodnia (W)	26
	Elewacja północna (N)	22
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	35
	Elewacja wschodnia (E)	22
	Elewacja zachodnia (W)	50
	Elewacja północna (N)	12
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,114
	Ściany	0,149
	Okna	0,83
	Szklenia	0,5
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ]**	0,6

3



N 1:1500



\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji  
 \*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

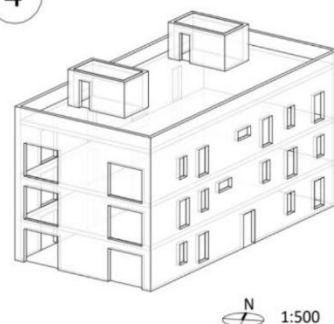
Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):  
[https://ekosrebrnahisa.si/files/Eko\\_srebrna\\_hisa\\_energetska\\_izkaznica.pdf](https://ekosrebrnahisa.si/files/Eko_srebrna_hisa_energetska_izkaznica.pdf)  
<https://ekosrebrnahisa.si/si/Predstavitev#pdf-katalogi>  
[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_4522](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_4522)



## Przypadek 4

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Villa Nova
2	Lokalizacja	Polska, Warszawa
3	Autor	Innebo
4	Data realizacji	2015
5	Standard	NF15
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Budynek odcinkowy
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy €
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	849
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	2971,5
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	3
12	Liczba kondygnacji podziemnych	1
13	Liczba mieszkań	6
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	25
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	Bd
16	EU (energia użytkowa) [kWh/m <sup>2</sup> rok]	15
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Pompy ciepła
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Pompy ciepła
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Klimakonwektory
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	Bd
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,43
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	17
	Elewacja wschodnia (E)	33
	Elewacja zachodnia (W)	33
	Elewacja północna (N)	17
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	36
	Elewacja wschodnia (E)	14
	Elewacja zachodnia (W)	19
	Elewacja północna (N)	0
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,06
	Ściany	0,095
	Okna	0,7
	Szklenia	Bd
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,49

4



\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji

\*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):

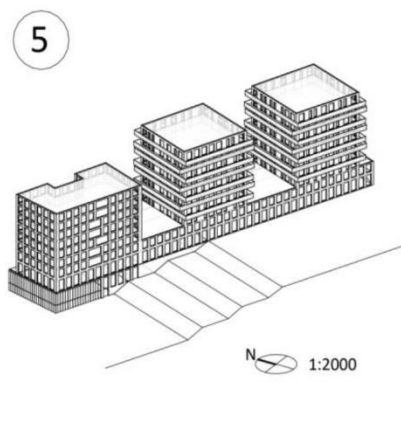
<https://halo.domy.pl/pierwszy-w-polsce-pasywny-budynek-wielorodzinny-powstaje-w-warszawie/index.html>

<https://lufthaus.pl/realizacje/budynek-wielorodzinny-villa-nova-w-warszawie/>

<https://en.aluplast.com.pl/villa-nova-pierwszy-wielorodzinny-budynek-pasywny-w-polsce-1>

## Przypadek 5

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Terrace 9
2	Lokalizacja	Nanterre, Francja
3	Autor	AZC
4	Data realizacji	2015
5	Standard	Zeroenergetyczny
6	Funkcja	Budynek wielofunkcyjny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Budynek punktowo-liniowy
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy (N)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	14540
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	44131
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	10
12	Liczba kondygnacji podziemnych	2
13	Liczba mieszkańców	147
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	22
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	Bd
16	EU (energia użytkowa) [kWh/m <sup>2</sup> rok]	23
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Pompy ciepła, odzysk ciepła z kanalizacji sanitarnej
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Bd
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	11476
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,26
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	37
	Elewacja wschodnia (E)	19
	Elewacja zachodnia (W)	21
	Elewacja północna (N)	24
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	44
	Elewacja wschodnia (E)	38
	Elewacja zachodnia (W)	40
	Elewacja północna (N)	40
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	Bd
	Ściany	Bd
	Okna	Bd
	Szklenia	Bd
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,4



\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji  
 \*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):  
<https://www.archdaily.com/797376/terrace-9-azc>  
<https://www.world-architects.com/en/projects/view/terrace-9-housing-and-office-building>  
<https://azc.archi/postwork/terrace-9/>

## Przypadek 6

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Share Home Silesia
2	Lokalizacja	Katowice, Polska
3	Autor	MBC
4	Data realizacji	2021
5	Standard	nZEB, Nagroda PASCAL 2022
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Budynek płaszczyznowy
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ korytarzowy (N, C)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	6685
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	22137,5
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	5
12	Liczba kondygnacji podziemnych	2
13	Liczba mieszkań	111
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	15
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	48
16	EU (energia użytkowa) [[kWh/m <sup>2</sup> rok]]	Bd
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Kogenerator, kocioł gazowy
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Kogenerator
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Belki grzewczo-chłodzące
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	5370
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,35
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	23
	Elewacja wschodnia (E)	26
	Elewacja zachodnia (W)	26
	Elewacja północna (N)	24
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	24
	Elewacja wschodnia (E)	34
	Elewacja zachodnia (W)	25
	Elewacja północna (N)	8
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	Bd
	Ściany	Bd
	Okna	Bd
	Szklenia	Bd
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	Bd







EP=48

kWh/m<sup>2</sup>·rok

\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji

\*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):

<https://www.mbc.pl/index.php/share-home-silesia/>

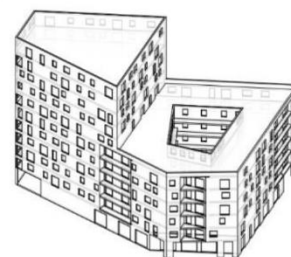
<https://sharehome.pl/katowice-mieszkania-na-wynajem/>

<https://www.rynekinstalacyjny.pl/arttykul/projektowanie-went-klima/153539,niemal-zeroenergetyczne-budynki-wielorodzinne>

## Przypadek 7

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Campagne Innsbruck House B
2	Lokalizacja	Innsbruck, Austria
3	Autor	bogenfeld Architektur
4	Data realizacji	2022
5	Standard	Pasywny (PHI)
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Budynek płaszczyznowy
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy z wewnętrzną galerią
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	9685
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	31358
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	11
12	Liczba kondygnacji podziemnych	1
13	Liczba mieszkań	97
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	40
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	58
16	EU (energia użytkowa) [[kWh/m <sup>2</sup> rok]]	15
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Pompy ciepła
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Lokalna sieć ciepłownicza
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Ogrzewanie podłogowe
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	6525
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,27
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	11
	Elewacja wschodnia (E)	26
	Elewacja zachodnia (W)	34
	Elewacja północna (N)	30
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	19
	Elewacja wschodnia (E)	23
	Elewacja zachodnia (W)	24
	Elewacja północna (N)	21
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,11
	Ściany	0,14
	Okna	0,93
	Szklenia	Bd
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,35

7



N 1:1500



**EU=15**  
kWh/m<sup>2</sup>·rok

\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji

\*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

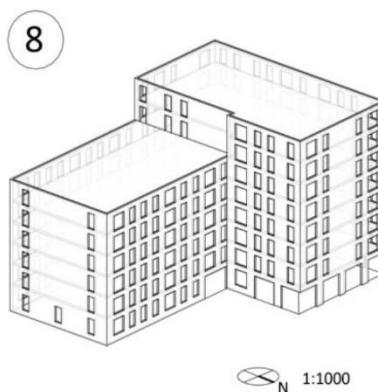
Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):

[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_7190](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_7190)  
<https://www.vlst.at/en/prj/die-blumen-von-campagne/#16>

[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_7190](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_7190)

## Przypadek 8

I Informacje ogólne		
1	Nazwa	Greenhouse
2	Lokalizacja	Wielka Brytania
3	Autor	Buttress architects
4	Data realizacji	2024
5	Standard	Pasywny (PHI)
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
II Cechy charakterystyczne		
7	Typologia	Budynek płaszczyznowy
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Korytarzowiec (C)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	7568
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	24536,8
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	9
12	Liczba kondygnacji podziemnych	0
13	Liczba mieszkań	96
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	4
III Zapotrzebowanie na energię		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	Bd
16	EU (energia użytkowa) [kWh/m <sup>2</sup> rok]	15
IV Instalacje		
17	Źródło ciepła	Pompy ciepła
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	Pompy ciepła
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła
20	Sposób dystrybucji ciepła	Grzejniki ścienne
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	5825
V Parametry budynku dot. architektury		
22	Zwartość (A/V)	0,24
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	27
	Elewacja wschodnia (E)	23
	Elewacja zachodnia (W)	23
	Elewacja północna (N)	27
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	36
	Elewacja wschodnia (E)	21
	Elewacja zachodnia (W)	37
	Elewacja północna (N)	36
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,15
	Ściany	0,18
	Okna	0,81
	Szklenia	0,48
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	0,5



\* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji

\*\* Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa

Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz źródeł (dostęp 01.01.2024):

[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_7190](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_7190)  
<https://www.vlst.at/en/prj/die-blumen-von-campagne/#16>  
[https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d\\_7190](https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_7190)

### 5.3.13. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań określono zakresy parametrów określających charakterystyczne cechy budynków, które zostały wykształcone w skutek optymalizacji energetycznej.

Tabela 28. Zakres wybranych parametrów budynków zoptymalizowanych energetycznie.

Źródło: opracowanie własne

parametr	zakres
liczba kondygnacji nadziemnych	3 do 13
liczba kondygnacji podziemnych	0 do 4
liczba mieszkań	8 do 147
orientacja (odchylenie od osi N-S)	4° do 40°
powierzchnia całkowita (PC)	849 m <sup>2</sup> do 17447 m <sup>2</sup>
kubatura	2971 m <sup>3</sup> do 53136 m <sup>3</sup>
zwartość A/V	0,24 do 0,43
proporcje elewacji	
południowa (S)	11% do 52%
wschodnia (E)	7% do 33%
zachodnia (W)	6% do 34%
północna (N)	17% do 35%
udział szklenia (WWR)	
południowa (S)	19% do 44%
wschodnia (E)	14% do 38%
zachodnia (W)	19% do 50%
północna (N)	0% do 40%
izolacyjność	
dach	0,06 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,19 W/m <sup>2</sup> ·K
ściany	0,095 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,18 W/m <sup>2</sup> ·K
okna	0,7 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,93 W/m <sup>2</sup> ·K
szczelność	n <sub>50</sub> = 0,27/h do n <sub>50</sub> = 0,8/h

Otrzymane wyniki posłużyły jako wartości referencyjne w dalszym toku badań. Jako parametry o największej uniwersalności i potencjale do zastosowania przy wariantowaniu projektu zostały wyznaczone:

- zwartość A/V,
- proporcje elewacji,
- udział szklenia WWR,
- izolacyjność.

Podane parametry są wynikiem działań optymalizacyjnych, które są możliwe do przeprowadzenia na wczesnym etapie procesu projektowego i są osadzone w kompetencjach związanych z dziedziną architektury.

Według badań (Parasonis i in., 2012) dotyczących współczynnika A/V największy wpływ wielkości na zapotrzebowanie na energię i inne zasoby zaobserwowano w przypadku budynków o powierzchni ogrzewanej do 3000 m<sup>2</sup>. W miarę wzrostu rozmiaru budynku, zmniejsza się znaczenie jego proporcji dla efektywności geometrycznej i energetycznej (w porównaniu z budynkami mniejszymi), co potwierdzają wyniki analiz strat energetycznych. Niemniej jednak, większe budynki oferują większy potencjał oszczędności energii i surowców, a także szersze możliwości w zakresie zastosowania różnorodnych rozwiązań architektonicznych i estetycznych.

Wniosek wynikający z analizy parametrów dotyczących geometrii budynku wskazuje na konieczność wspólnego rozpatrywania wszystkich wartości. Izolacja pojedynczego parametru może prowadzić do wniosków, które zniekształcają rzeczywistość poprzez nieadekwatne opisanie innych czynników. Również na tej podstawie nie jest możliwe określenie jednoznacznej metody kształtowania bryły budynku, lecz niezbędna jest analiza przyjmowanych rozwiązań w kontekście strategii opracowanej przez interdyscyplinarny zespół projektowy.

Należy również rozważyć kwestię izolacyjności i odpowiedzieć na pytanie, czy dalsze obniżanie współczynnika przenikalności termicznej  $U$  przyniesie wymierne korzyści energetyczne, zważając na udział strat ciepła przez przenikanie w całościowym bilansie budynku.

## ROZDZIAŁ 6. APLIKACJA WYBRANYCH METOD I BADANIE ICH WPŁYWU NA SPRAWNOŚĆ ENERGETYCZNĄ BUDYNKU

### 6.1 Wprowadzenie

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie wpływu zastosowania wybranych metod optymalizacji energetycznej na sprawność energetyczną budynku w oparciu o symulacje przeprowadzone w środowisku BIM, dzięki porównaniu otrzymanych wyników.

W ramach badań korzystano z modelu BIM wykonanego w oprogramowaniu Autodesk Revit stanowiącego część faktycznej dokumentacji, który jednocześnie jest bliźniakiem cyfrowym zrealizowanych budynków. W celu symulacji wczesnego etapu projektowego model został uproszczony, do dokładności modelu odpowiadającemu projektowi koncepcyjnemu. Następnie zostały przeprowadzone symulacje energetyczne w celu porównania otrzymanych wyników z wynikami zawartymi w charakterystyce energetycznej. W ten sposób odrzucono 3 rodzaje oprogramowania pierwotnie zaplanowanych do wykorzystania przy badaniach symulacyjnych.

Pierwszym z nich był program Audytor OZC, w którym wykonano oryginalną charakterystykę energetyczną budynku. Schemat pracy w tym programie zakłada 2 opcje – albo podanie samych wejściowych parametrów liczbowych i wykonanie bardzo wstępnej symulacji, albo utworzenie dokładnego modelu 3D w programie oraz definicji szczegółowej wszystkich materiałów, pomieszczeń i ich funkcji oraz parametrów grzewczych i instalacyjnych, a następnie przeprowadzenie szczegółowej symulacji według metodologii sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej. Opcja importu modelu na podstawie plików open BIM nie przyniosła zadowalających wyników w zakresie dokładności geometrii odwzorowania informacji zawartych w modelu, takich jak na przykład właściwości termiczne materiałów. Takie dostępne schematy pracy kwalifikują program jako narzędzie do określenia charakterystyki gotowego projektu, natomiast jego przydatność do założonych badań obejmujących zmiany przeprowadzane na wczesnych etapach projektowych jest niska.

Popularny program IESVE służący do symulacji energetycznych wykorzystujący silnik obliczeniowy APACHE do obliczeń był także brany pod uwagę. Geometria budynku i właściwości termiczne importowane były w zadowalającym stopniu. Program posiada bardzo rozbudowane narzędzia do tworzenia scenariuszy energetycznych, obejmujące takie parametry jak zyski energetyczne ze wszystkich instalacji, zmienne harmonogramy użytkowania, obliczenia stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu. Na potrzeby koncepcji dostępne są także uproszczone scenariusze obliczeniowe o ograniczonej wymaganej liczbie parametrów wejściowych, które oparte są na standardach Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji (ASHRAE) oraz dostosowane do tamtejszego rynku, pod względem rozwiązań typowych, stopnia sprawności instalacji, źródeł ciepła i stosowanych materiałów. Opracowywanie szczegółowych scenariuszy dostosowanych do polskich zostały uznane za każdorazowo zbyt czasochłonne na potrzeby projektów na etapie koncepcyjnym. Narzędzie wykazuje jednak potencjał do opracowania użytecznych scenariuszy przez zespół specjalistów z zakresu instalacji i fizyki budowli, który mógłby być przydatny także na wczesnym etapie projektowym.

Ostatnim rozważanym programem był Autodesk Insight. W pełni korzysta on z modeli stworzonych w Autodesk Revit, uwzględniając wszystkie wprowadzone parametry oraz obliczenia oparte na silniku EnergyPlus i OpenStudio, omówionych w podrozdziale 4.6.3. Program dostarcza dane na temat zużycia energii, a także przedstawia alternatywne scenariusze w odniesieniu do wybranych parametrów, uwzględniając charakterystykę budynku oraz zainstalowane w nim systemy. Niemniej jednak, możliwość stosowania alternatywnych scenariuszy w programie opiera się na rynku amerykańskim i tamtejszych standardowych rozwiązaniach, a obecnie program nie oferuje opcji tworzenia własnych scenariuszy. Mimo to koncepcja programu jest zbieżna z ideą badań przeprowadzonych w tej pracy, co sprawia, że ma on potencjał do wykorzystania w podobnych symulacjach w przyszłości, jeśli jego funkcje zostaną rozszerzone.



W celach symulacji modelu bazowego wykorzystano program Autodesk Green Building Studio, który stoi za obliczeniami prezentowanymi w programie Insight. Silnik obliczeniowy bazuje na wspomnianym wcześniej EnergyPlus i OpenStudio i w pełni wykorzystuje wszystkie parametry z modelu BIM. Otrzymane wyniki dotyczące zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania były na porównywalnym poziomie do opracowanej na podstawie modelu szczegółowego charakterystyki energetycznej. W budynku nie przewidziano systemu chłodzenia, więc energia użytkowa na potrzeby chłodzenia nie była brana pod uwagę z powodu braku wartości referencyjnej. Zapotrzebowanie na EU na cele ogrzewania zostało wybrane jako wartość do porównywania sprawności energetycznej poszczególnych wariantów. Tak przygotowany model referencyjny poddany został przekształceniom.

Opracowano scenariusze przekształceń zakładające zastosowanie metod optymalizacyjnych, których skutkiem była zmiana konkretnych parametrów projektowanego budynku. Wybór metod przeprowadzono o badania literaturowe opisywane we wcześniejszych rozdziałach, natomiast referencyjne ich wartości odnosiły się do wcześniej przeprowadzonej analizy przypadków. Scenariusze zostały zaaplikowane do modelu bazowego, co spowodowało powstanie 12 wariantów, różniących się od siebie wartościami poszczególnych parametrów.

Wyniki przedstawiają wpływ poszczególnych zmian na wielkość zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania.

## 6.2 Zakres badań

Na podstawie badań literaturowych w poszczególnych scenariuszach badawczych zmiennymi parametrami były:

- orientacja
- współczynnik kształtu A/V
- geometria budynku
- proporcje elewacji
- udział szklenia na elewacjach WWR
- współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych nieprzeziernych,
- współczynnik przenikania ciepła U dla okien,

Ze względu na wzajemną zależność parametry A/V, gabaryty, geometria budynku i proporcje elewacji zostały ujęte w scenariuszach zakładających zmianę formy bryły.

Badane parametry odnoszą się do przeprowadzonych analiz referencyjnych budynków oraz metod optymalizacji energetycznej opisanych we wcześniejszych rozdziałach. Parametry dobrane do badań kształtowane są w wyniku stosowania metod optymalizacyjnych możliwych do wprowadzenia na najwcześniejszych etapach projektowych i są bezpośrednio związane z dziedziną architektury.

*Tabela 29. Zakres badanych parametrów określony na tle wcześniejszych badań.*

*Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 15 i tabeli 22*

	obszar tematyczny	działania	parametr	stan uszczegółowienia projektu
architektura	otoczenie zewnętrzne	orientacja budynku na działce	odchylenie od osi północ-południe	wczesny
	geometria budynku	kontrola współczynnika zwartości formy	PC, kubatura, A/V	wczesny
		dostosowanie proporcji elewacji	proporcje elewacji	wczesny
		rozmieszczenie i powierzchnia stolarki i ślusarki	udział szklenia (WWR)	średni
właściwości materiałowe	dobór izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych (U)	izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych	średni	

### 6.3 Model referencyjny

Wybrany do badań model referencyjny to zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych zlokalizowanych w Katowicach, przy którego projektowaniu od etapu koncepcji do projektu wykonawczego brał udział autor niniejszej rozprawy. Zespół zaplanowany jest jako 9 budynków mieszkalnych, których wykonawstwo zostało podzielone na cztery etapy (ilustracja 62). Etap pierwszy został zrealizowany w roku 2021 i składa się z trzech punktowych segmentów o wysokości 11 pięter połączonych wspólnym parterem, w których znajduje się 256 mieszkań. Etap drugi to dwa bliźniacze punktowce o wysokości 55 metrów każdy, które zostały oddane do użytku w roku 2024. Forma i założenia budynków z pozostałych faz są tożsame dla etapu drugiego, więc w rezultacie zostanie wybudowanych sześć budynków o tożsamym kształcie i parametrach. Z uwagi na analogiczne założenia każdego z obiektów, do badań wykorzystano pojedynczy budynek. Ze względu na czas powstawania projektu budowlanego, standard był dostosowany do wymagań stawianych przez WT w roku 2018.



Ilustracja 58 Pierwsza Dzielnica w Katowicach, podział na etapy  
Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów Medusa Group

Zaprojektowany obiekt ma 17 kondygnacji nadziemnych oraz 2 podziemne kondygnacje garażu, co kwalifikuje go jako budynek wysoki (W). Znajduje się w nim 128 mieszkań, przez co może być traktowany jako duży budynek mieszkaniowy wielorodzinny (GUS 2024d). Według klasycznej typologii przestrzennej jest to budynek punktowy, oparty na rzucie w kształcie kwadratu o boku 25,21 m.

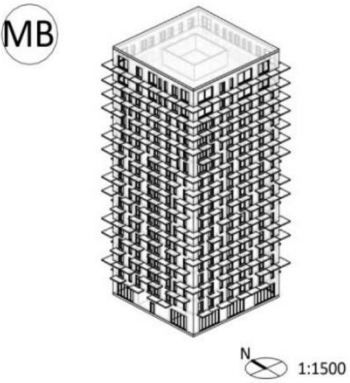

Odchylenie elewacji budynku od układu północ-południe wynosi 3 stopnie. Powierzchnia całkowita (PC) liczona jako suma powierzchni wszystkich kondygnacji, mierzonych po zewnętrznym obrysie, wynosi 10777 m<sup>2</sup>. Suma powierzchni użytkowej mieszkań oraz innych powierzchni ogrzewanych 7683,12 m<sup>2</sup>. Kubatura budynku wynosi 35094,52 m<sup>3</sup>, także liczona po zewnętrznym obrysie, na potrzeby obliczeń dotyczących kształtu. Współczynnik A/V wynosi 0,195 co kwalifikuje przedmiotową formę jako zwartą.

Układ komunikacyjny umieszczony jest centralnie i jest realizowany jako pojedyncza klatka schodowa wspomagana przez trzy windy. Opisany przypadek można zatem sklasyfikować jako układ klatkowy. Proporcje elewacji, z racji foremnego rzutu poszczególnych kondygnacji rozłożone są równomiernie po 25%. Udział szklenia na poszczególnych elewacjach wynosi 33% z wyjątkiem południa, gdzie zastosowano 35% udziału okien w powierzchni fasady.



*Ilustracja 59 Budynek – podstawa modelu bazowego  
Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów Medusa Group*

Struktura przegród zewnętrznych nie jest jednolita. Ściany parteru zrealizowano jako trójwarstwowe wentylowane. Izolację ścian kondygnacji do piętra 8 wykonano z płyt styropianowych EPS 036 o grubości 180mm. Izolacja ścian wyższych pięter została wykonana przy użyciu płyt z wełny mineralnej o grubości 160 mm i współczynnika  $\lambda=0,034$  i warstwie wełny o współczynnika  $\lambda=0,037$  o grubości 20 mm. Dla uproszczenia i celów porównawczych współczynnik przenikania ciepła U uśredniono proporcjonalnie do powierzchni ścian zewnętrznych do wartości  $0,176 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Dach budynku posiada współczynnik U na poziomie  $0,116 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Współczynnik U dla okien zastosowanych w obiekcie wynosi  $1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , uwzględniając witryny na parterze, przy wskaźniku przepuszczalności promieniowania na poziomie 75%. Szczelność budynku nie była badana, do obliczeń charakterystyki energetycznej została przyjęta na poziomie  $n_{50} = 2,0/\text{h}$ .

Model bazowy		
<b>I Informacje ogólne</b>		
1	Nazwa	Pierwsza Dzielnica
2	Lokalizacja	Katowice, Polska
3	Autor	medusagroup
4	Data realizacji	2024
5	Standard	WT 2018
6	Funkcja	Budynek mieszkalny wielorodzinny
<b>II Cechy charakterystyczne</b>		
7	Typologia	Punktowiec
8	Rodzaj układu komunikacyjnego	Układ klatkowy (C)
9	Powierzchnia całkowita (PC) [m <sup>2</sup> ]	10777
10	Kubatura [m <sup>3</sup> ]	35094
11	Liczba kondygnacji nadziemnych	17
12	Liczba kondygnacji podziemnych	2
13	Liczba mieszkań	128
14	Orientacja (odchylenie od osi N-S) [°]	4
<b>III Zapotrzebowanie na energię</b>		
15	EP (energia pierwotna) [kWh/(m <sup>2</sup> rok)]	72
16	EU (energia użytkowa) [kWh/m <sup>2</sup> rok]	45
<b>IV Instalacje</b>		
17	Źródło ciepła	Lokalna sieć ciepłownicza, logotermy
18	Źródło ciepłej wody użytkowej (CWU)	
19	Typ wentylacji	Wentylacja mechaniczna wywiewna
20	Sposób dystrybucji ciepła	Ogrzewanie podłogowe
21	Powierzchnia z kontrolowaną temperaturą [m <sup>2</sup> ]	11698
<b>V Parametry budynku dot. architektury</b>		
22	Zwartość (A/V)	0.19
23	Proporcje elewacji [%]	
	Elewacja południowa (S)	25
	Elewacja wschodnia (E)	25
	Elewacja zachodnia (W)	25
	Elewacja północna (N)	25
24	Window wall ratio (WWR) [%] *	
	Elewacja południowa (S)	35
	Elewacja wschodnia (E)	33
	Elewacja zachodnia (W)	33
	Elewacja północna (N)	33
25	Izolacyjność cieplna [W/(m <sup>2</sup> K)]	
	Dach	0,116
	Ściany	0,176
	Okna	1
	Szklenia	1
26	Szczelność (współczynnik n50) [h <sup>-1</sup> ] **	Bd
		
		
		
		<p>* Stosunek powierzchni okien (przeszkleń) do powierzchni całej elewacji</p> <p>** Krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnień wynoszącej 50 Pa</p> <p>Dane uzyskano na podstawie wykonanego przez autora modelu BIM oraz materiałów Medusa Group</p>

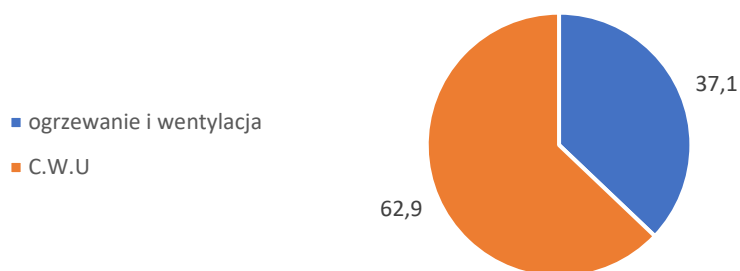
Instalacja ogrzewania w budynku oparta jest o źródło ciepła w postaci lokalnej sieci ciepłowniczej. Wytwarzanie ciepła realizowane jest w węźle cieplnym a następnie przesyłane do indywidualnych węzłów mieszkaniowych – logoterm. Nie zastosowano zasobnika buforowego. Mieszkania na piętrach 0 do 10 ogrzewane są za pomocą grzejników płytowych z regulacją automatyczną miejscową. Na piętrach od 11 do 16 zastosowano ogrzewanie podłogowe z centralną i miejscową regulacją.

System podgrzewania ciepłej wody jest realizowany analogicznie do instalacji CO, ze względu na zastosowanie stacji logoterm, w których następuje indywidualne ogrzanie wody dla indywidualnego mieszkania. Nie zastosowano cyrkulacji.

Wentylacja mieszkań następuje w wyniku działania instalacji wentylacji wywiewnej zlokalizowanej w kuchniach i łazienkach. System nawiewny obejmuje nawiewniki higrosterowane, montowane w ramach okiennych. Wywiew powietrza z kuchni i sanitariatów realizowany jest poprzez higrosterowane kratki wywiewne zamontowane na przewodach pionowych. Układy te podłączono do trzech zespołów wentylatorów dachowych, które wprowadzają zużyte powietrze na zewnątrz. W budynku nie zaprojektowano centralnego systemu klimatyzacji.

Zapotrzebowanie na energię przedmiotowego budynku zostało określone na etapie projektu budowlanego zgodnie z metodologią obowiązującą przy sporządzaniu charakterystyki energetycznej. Udział energii wykorzystywanej na cele ogrzewania i wentylacji stanowił 37,1% całości, co wskazuje na dobre zaizolowanie budynku.

udział w rocznym zapotrzebowaniu na energię użytkową

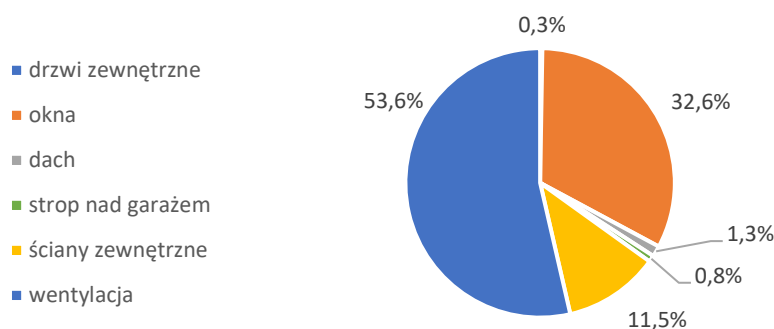


Ilustracja 60. Udział w rocznym zapotrzebowaniu na EU dla modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

Na potrzeby opracowania charakterystyki energetycznej opracowano także zestawienie strat energii w rozbiciu na poszczególne czynniki.

udział strat energii przez przenikanie



Ilustracja 61. Udział strat energii przez przenikanie.

Źródło: opracowanie własne

Wykres przedstawia zestawienie strat energii w budynku na przestrzeni roku, wyrażone jako udział procentowy w ogólnej stracie energii. Ze względu na kształt budynku straty przez dach są stosunkowo niskie, wynoszą 7844 kWh/rok, co stanowi 1,3% całości. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku stropu nad garażem. Okna są odpowiedzialne za znaczącą część strat, 196954 kWh/rok, co stanowi 32,6% ogółu, co jest typowe ze względu na gorszą izolacyjność szklenia w porównaniu do innych elementów budowlanych. Straty ponoszone przez przenikalność termiczną ścian wynoszą 69446 kWh/rok i stanowią 11,5% ogółu. Wentylacja odpowiada za największą część strat, 324118 kWh/rok, co stanowi 53,6% ogółu, wskazując na obszar o potencjale do poprawy w celu oszczędności energii.

Roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania wg normy PN-EN ISO 13790 zostało wyliczone na 317083 kWh/rok, przy strumieniu powietrza wentylacyjnego 17013 m<sup>3</sup>/h. W odniesieniu do powierzchni wskaźnik zapotrzebowana na ogrzewanie wynosi 34,67 kWh/m<sup>2</sup>·rok.

## 6.4 Scenariusze wariantowania

W celu symulacji wczesnego etapu projektowego stworzony został uproszczony model bazowy w programie Revit 2024, którego podstawą był faktyczny model BIM będący częścią realnej dokumentacji projektowej. Zachowując wszystkie parametry opisane dla modelu referencyjnego, przeprowadzono symulację zapotrzebowania na energię w ciągu roku na cele ogrzewania, korzystając z programu Green Building Studio, którego silnik obliczeniowy bazuje na programach EnergyPlus i OpenStudio.

Otrzymano wynik 315803 kWh/rok przy obliczonym strumieniu powietrza wentylacyjnego 16146 m<sup>3</sup>/h, co przekłada się na wskaźnik EU na cele ogrzewania o wartości 34,53 kWh/m<sup>2</sup>·rok. Różnica w wysokości współczynników spowodowana jest innymi metodami obliczeniowymi oraz stopniem dokładności modelu, ale jest wystarczająco mała, aby służyć dla celów porównawczych.

Następnie model został poddany przekształceniom w zgodnym z opracowanymi scenariuszami. Scenariusze wariantowania zostały opracowane w oparciu o zakresy charakterystycznych parametrów zdefiniowanych w wyniku analizy referencyjnych budynków mieszkalnych wielorodzinnych.

*Tabela 30. Zestawienie parametrów modelu bazowego z zakresem z parametrów określonych w case studies.*

*Źródło: opracowanie własne.*

PARAMETR	ZAKRES Z CASE STUDIES	MODEL REFERENCYJNY
ORIENTACJA	4° do 40°	3°
A/V	0,24 do 0,43	0,195
PROPORCJE ELEWACJI		
południowa (S)	11% do 52%	25%
wschodnia (E)	7% do 33%	25%
zachodnia (W)	6% do 34%	25%
północna (N)	17% do 35%	25%
UDZIAŁ SZKLENIA (WWR)		
południowa (S)	19% do 44%	35%
wschodnia (E)	14% do 38%	33%
zachodnia (W)	19% do 50%	33%
północna (N)	0% do 40%	33%
WSPÓŁCZYNNIK U		
dach	0,06 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,19 W/m <sup>2</sup> ·K	0,116 W/m <sup>2</sup> ·K
ściany	0,095 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,18 W/m <sup>2</sup> ·K	0,176 W/m <sup>2</sup> ·K
okna	0,7 W/m <sup>2</sup> ·K do 0,93 W/m <sup>2</sup> ·K	1,0 W/m <sup>2</sup> ·K

### 6.4.1. Orientacja

Model referencyjny odchylony jest od układu północ-południe o 3 stopnie, co stanowi najmniej z przebadanych budynków. W testowanych wariantach założono odchylenie od osi kolejno o 15°, 30°, 45°. Razem stanowią badane warianty numer 1, 2 i 3.

### 6.4.2. Forma bryły

Współczynnik A/V osiągnięty w modelu bazowym jest niższy niż w przypadku obiektów referencyjnych i w budynek w skali zwartości kwalifikowany jest jako budynek zwarty.

Scenariusze opracowane na potrzeby badania wpływu współczynnika kształtu A/V zakładały 3 warianty redefiniowania bryły. Ze względu na ścisłą zależność tego czynnika z proporcjami elewacji opracowane alternatywy zakładały zmiany w zakresie obu tych obszarów. Na podstawie wniosków z wcześniejszych badań, przy wariantowaniu została zachowana ta sama kubatura obiektów oraz podobna powierzchnia całkowita, w celu zmaksymalizowania wiarygodności wpływu współczynnika na otrzymane wyniki (Nowak, 2020). W tym samym celu wysokość brutto poszczególnych kondygnacji została zachowana na relatywnie podobnym poziomie. Ponieważ symulacja dotyczy współczynnika kształtu pominięto wzrost udziału powierzchni komunikacyjnej i spadek powierzchni użytkowej mieszkań wskutek modyfikacji kształtu rzutu.

Tabela 31. Zestawienie parametrów poszczególnych badanych scenariuszy.

Źródło: opracowanie własne

	bazowy	wariant 4	wariant 5	wariant 6
kształt rzutu	kwadrat	kwadrat	prostokąt	trapez
typologia	punktowy	punktowy	liniowy	płaszczyznowy
grupa wysokości	(W) wysoki	(W) wysoki	(SW) średniowysoki	(N) niski
długość [m]	25,21	32,74	75,00	91,40
szerokość [m]	25,21	32,74	16,00	52,00
wysokość [m]	55,22	32,74	29,25	13,00
kubatura [m <sup>3</sup> ]	35094	35094	35094	35094
wys. kondygnacji [m]	3,25	3,27	3,25	3,25
PC kondygnacji [m <sup>2</sup> ]	635,54	1071,91	1200,00	2703,10
PC budynku [m <sup>2</sup> ]	10804,25	10719,08	10800,00	10812,40
liczba pięter	17	10	9	4
stosunek A/V	0,19	0,18	0,22	0,28
proporcje elewacji				
południowa (S)	25%	25%	41%	30%
wschodnia (E)	25%	25%	9%	25%
zachodnia (W)	25%	25%	9%	25%
północna (N)	25%	25%	41%	20%

Wariant nr 4 zakłada dążenie do maksymalnej zwartości bryły, dlatego zadana kubatura i powierzchnia całkowita zostały zrealizowane w formie sześciennego budynku o długości boku 32,74 metra i 10 kondygnacjach. W tym przypadku pominięto problem doświetlenia światłem naturalnym pomieszczeń mieszkalnych, który powstaje przy założeniu tak dużych rozpiętości rzutu, ponieważ celem było sprawdzenie minimalnej wartości współczynnika A/V dla budynku o zadanej kubaturze i powierzchni całkowitej. Współczynnik zwartości dla wariantu bryły optymalnej, możliwy do zrealizowania przy zmianie funkcji budynku np. na biurową, wynosi 0,18. W porównaniu do modelu bazowego osiągnięta została redukcja na poziomie 6%.

Wariant nr 5 zakłada zachowanie kubatury, funkcji mieszkaniowej oraz optymalnego doświetlenia mieszkań, dlatego szerokość traktu została przyjęta jako 16 m, co stanowi spotykaną wartość dla

budynków mieszkalnych. Liczba pięter została zmniejszona do 9, przez co budynek byłby kwalifikowany jako (SW) średniowysoki. Wskutek tych przekształceń długość elewacji została powiększona do 75 metrów, przez co typologia budynku została zmieniona z punktowej na liniową. Proporcje elewacji zostały znacząco zmienione na korzyść fasady południowej i północnej. Współczynnik zwartości kształtu otrzymanej bryły wynosi 0,22, czyli o 13% więcej od współczynnika modelu bazowego.

Wariant nr 6 zakłada zachowanie szerokości traktu i kubatury oraz dalszej redukcji wysokości, która została ustalona na cztery kondygnacje nadziemne, przez co budynek kwalifikowany byłby jako (N) niski. Zwiększenie całkowitej powierzchni rzutu doprowadziło do wytworzenia atrium doświetlającego. Proporcje elewacji zostały dostosowane dla osiągnięcia większej powierzchni fasady południowej, przez co można liczyć na większe zyski energetyczne z promieniowania słonecznego. W rezultacie przeprowadzonych modyfikacji budynek przybrał formę graniastosłupa prostego o podstawie trapezu z wewnętrznym atrium w tej samej formie. Udział fasad południowych został zwiększony do 30%, a fasad północnych zmniejszony do 20% w stosunku do modelu bazowego.

#### 6.4.3. Stosunek powierzchni szklenia do powierzchni elewacji (WWR)

Udział powierzchni okien w powierzchni elewacji w modelu bazowym jest rozłożony równo, z drobnym zwiększeniem na elewacji południowej (elewacje E, W i N po 33%, elewacja S 35%). W zakresie tego parametru przebadano dwa skrajne przypadki w celu określenia zakresu wpływu udziału okien na zużycie energii w badanym przykładzie.

Powierzchnia użytkowa pomieszczeń mieszkalnych, które wymagają doświetlenia światłem naturalnym według prawa budowlanego wynosi 5617 m<sup>2</sup>.

W wariantcie 7 zachowano wymóg stawiany w WT dotyczący utrzymania powierzchni przeszkleń na poziomie 1/8 powierzchni podłogi pomieszczeń. W rezultacie okna zajmują 10,33 m<sup>2</sup> na kondygnację z każdej ze stron. Przekłada się to na ok 175,5 m<sup>2</sup> na każdą fasadę, a wskaźnik WWR wynosi w tym przypadku 13% dla każdej elewacji.

Scenariusz 9 zakłada dostosowanie powierzchni przeszkleń do zaleceń uzyskanych w wyniku badań literaturowych (tabela 14, str. 58). Dla elewacji północnej przyjęto minimum określone w poprzednim scenariuszu – 13%. Udział przeszkleń od stron południowej, wschodniej i zachodniej został zwiększony do 50%.

Scenariusze zmiany współczynnika WWR wzbogacono także o warianty zmieniające współczynnik przenikania ciepła U dla okien do poziomu 0,6 W/m<sup>2</sup>·K (scenariusze 8 i 10).

#### 6.4.4. Współczynnik przenikania ciepła U

Współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych modelu bazowego znajduje się w górnych granicach zakresów obiektów referencyjnych, a w przypadku okien nawet je przewyższa (tabela 30).

Scenariusz 11 redukujący wartość współczynnika, przewiduje zmianę wartości U dla przegród nieprzeziernych do minimalnych wartości referencyjnych, czyli 0,06 W/m<sup>2</sup>·K dla dachu i 0,095 W/m<sup>2</sup>·K dla ścian zewnętrznych. Wartość dla okien przyjęto na poziomie 0,6 W/m<sup>2</sup>·K.

W celu sprawdzenia wpływu izolacji na wydajność energetyczną badanych przypadków, opracowano także scenariusz zastosowania materiałów o współczynnikach U odpowiadających wartościom na poziomie wymogów stawianych w czasie wprowadzania pierwszych wytycznych dotyczących energooszczędności budynków z 2014 roku. Współczynnik dla dachu wynosi 0,2 W/m<sup>2</sup>·K, dla ściany zewnętrznej 0,25 W/m<sup>2</sup>·K a dla okien 1,3 W/m<sup>2</sup>·K.

Opracowane warianty i zakres zmian ich parametrów zostały przedstawione w tabeli 31.



Tabela 32. Zestawienie parametrów poszczególnych badanych scenariuszy.  
Źródło: opracowanie własne

parametr	bazowy	wariant 1	wariant 2	wariant 3	wariant 4	wariant 5	wariant 6	wariant 7	wariant 8	wariant 9	wariant 10	wariant 11	wariant 12
orientacja	3°	15°	30°	45°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°
rzut	kwadrat	kwadrat	kwadrat	kwadrat	kwadrat	prostokąt	trapez	kwadrat	kwadrat	kwadrat	kwadrat	kwadrat	kwadrat
typologia	punktowy	punktowy	punktowy	punktowy	punktowy	liniowy	płaszczyznowy	punktowy	punktowy	punktowy	punktowy	punktowy	punktowy
grupa wysokości	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(SW) średniowysoki	(N) niski	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki	(W) wysoki
długość [m]	25,21	25,21	25,21	25,21	32,74	75,00	91,40	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21
szerokość [m]	25,21	25,21	25,21	25,21	32,74	16,00	52,00	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21
wysokość [m]	55,22	55,22	55,22	55,22	32,74	29,25	13,00	55,22	55,22	55,22	55,22	55,22	55,22
kubatura [m <sup>3</sup> ]	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094	35094
wys. kondygnacji [m]	3,25	3,25	3,25	3,25	3,27	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
PC kondygnacji [m <sup>2</sup> ]	635,54	635,54	635,54	635,54	1071,91	1200,00	2703,10	635,54	635,54	635,54	635,54	635,54	635,54
PC budynku [m <sup>2</sup> ]	10804,25	10804,25	10804,25	10804,25	10719,08	10800,00	10812,40	10804,25	10804,25	10804,25	10804,25	10804,25	10804,25
liczba pięter	17	17	17	17	10	9	4	17	17	17	17	17	17
stosunek A/V	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,22	0,28	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
<b>proporcje elewacji</b>													
południowa (S)	25%	25%	25%	25%	25%	41%	30%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
wschodnia (E)	25%	25%	25%	25%	25%	9%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
zachodnia (W)	25%	25%	25%	25%	25%	9%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
północna (N)	25%	25%	25%	25%	25%	41%	20%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
<b>WWR</b>													
południowa (S)	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	13%	13%	13%	13%	35%	35%
wschodnia (E)	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	13%	13%	50%	50%	33%	33%
zachodnia (W)	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	13%	13%	50%	50%	33%	33%
północna (N)	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	13%	13%	50%	50%	33%	33%
<b>izolacyjność</b>													
dach [W/m <sup>2</sup> ·K]	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,060	0,200
ściany [W/m <sup>2</sup> ·K]	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,095	0,250
okna [W/m <sup>2</sup> ·K]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,500	1,000	0,500	0,500	1,300



## 6.5 Wyniki

W celach porównawczych wyniki zostały przedstawione w odniesieniu do modelu referencyjnego, którego zapotrzebowanie na EU na cele ogrzewania wynosi 34,53 kWh/m<sup>2</sup>·rok.

### 6.5.1. Orientacja

Zmiana odchylenia układu budynku od osi N-S wpłynęła w marginalny sposób na efektywność energetyczną budynku. Różnica w stosunku do modelu bazowego wyniosła maksymalnie 1%. Na tle innych scenariuszy modyfikacja tego parametru wprowadziła najmniejsze zmiany w stosunku do modelu wyjściowego.

Tabela 33. Wpływ zmiany orientacji na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

parametr	bazowy	wariant 1	wariant 2	wariant 3
orientacja	3°	15°	30°	45°
stosunek wskaźnika EU do modelu bazowego	1	0,99	1,00	1,01

### 6.5.2. Forma bryły

W wyniku wdrożenia scenariusza zmiany formy budynku utworzono 3 modele BIM, których aksonometrie przedstawiono w tabeli poniżej.

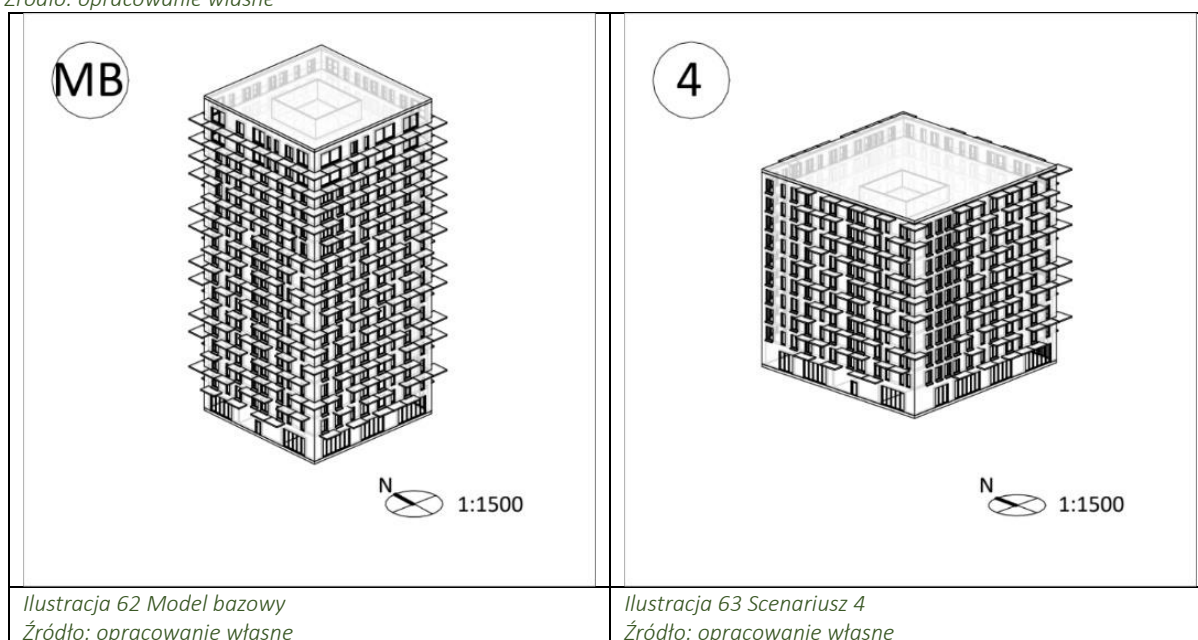
W każdym przypadku został zmieniony współczynnik A/V, podczas gdy wzajemne proporcje elewacji zostały zmienione tylko w przypadku wariantu 5 i 6. Zakres wpływu zmiany bryły na współczynnik EU kształtował się w granicach -7% do +5%.

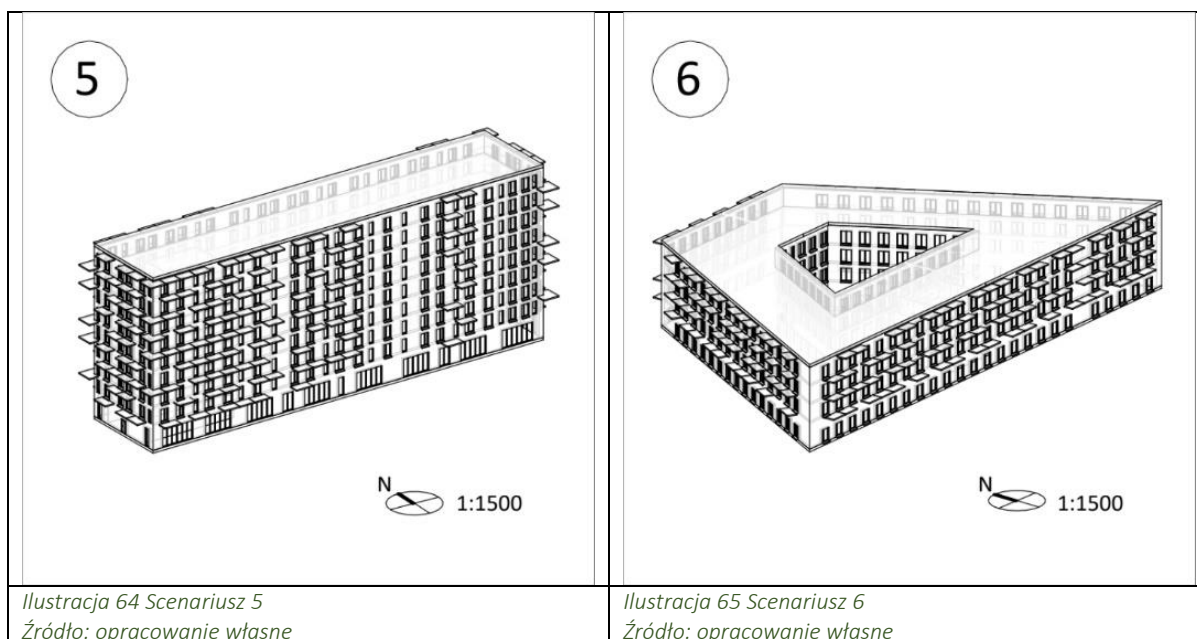
W przypadku wariantu 4 zapotrzebowanie na energię użytkową na cele ogrzewania zmniejszyło się o 6%, co wskazuje na pozytywny wpływ zmniejszenia współczynnika kształtu.

Zapotrzebowanie na energię użytkową zmniejszyło się także w przypadku wariantu nr 5, w którym bryła jest mniej zwarta. Zmiana wielkości współczynnika A/V została osiągnięta w rezultacie znacznego wydłużenia fasady południowej i północnej, przy jednoczesnym zachowaniu udziału szklenia, co przełożyło się na znaczne zwiększenie powierzchni okien na tych elewacjach. Taki kształt przyczynił się do zwiększenia zysków słonecznych i w efekcie obniżenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania.

Tabela 34. Aksonometrie bazowego modelu BIM i modeli powstałych wskutek wdrożenia scenariuszy 4, 5 i 6. Oznaczono orientację względem stron świata. W prawym dolnym rogu opisano skalę rysunku.

Źródło: opracowanie własne





W wariancie 6 przy radykalnym obniżeniu wysokości budynku i ponad czterokrotnym zwiększeniu powierzchni zabudowy także zwiększono udział elewacji południowej, przy jednoczesnym zmniejszeniu północnej. Zabiegi te jednak nie skompensowały strat wynikających ze zmniejszenia zwartości bryły o prawie 50% do współczynnika 0.28.

Tabela 35. Wpływ zmiany formy na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.  
Źródło: opracowanie własne

parametr	bazowy	wariant 4	wariant 5	wariant 6
rzut	kwadrat	kwadrat	prostokąt	trapez
typologia	punktowy	punktowy	liniowy	płaszczyznowy
grupa wysokości	(W) wysoki	(W) wysoki	(SW) średniowysoki	(N) niski
długość [m]	25,21	32,74	75,00	91,40
szerokość [m]	25,21	32,74	16,00	52,00
wysokość [m]	55,22	32,74	29,25	13,00
kubatura [m <sup>3</sup> ]	35094	35094	35094	35094
wys. Kondygnacji [m]	3,25	3,27	3,25	3,25
PC kondygnacji [m <sup>2</sup> ]	635,54	1071,91	1200,00	2703,10
PC budynku [m <sup>2</sup> ]	10804,25	10719,08	10800,00	10812,40
liczba pięter	17	10	9	4
stosunek A/V	0,19	0,18	0,22	0,28
proporcje elewacji				
południowa (S)	25%	25%	41%	30%
wschodnia (E)	25%	25%	9%	25%
zachodnia (W)	25%	25%	9%	25%
północna (N)	25%	25%	41%	20%
stosunek wskaźnika EU do modelu bazowego	1	0,94	0,93	1,05

### 6.5.3. Stosunek powierzchni szklenia do powierzchni elewacji (WWR)

Zmiany współczynnika szklenia na poszczególnych ścianach zewnętrznych przy zachowaniu proporcji elewacji doprowadziły do zmiany zapotrzebowania na energię do ogrzewania w zakresie od +16% do -30%.

Jednolite zmniejszenie udziału przeszkleń na wszystkich elewacjach do minimum przyniosło straty w bilansie energetycznym budynku na poziomie 16%. Przy radykalnym obniżeniu współczynnika przenikania ciepła dla tych okien sytuacja uległa poprawie, ale w dalszym ciągu w stosunku do modelu bazowego zapotrzebowanie na energię do ogrzewania było większe o 9%. Zwiększenie zapotrzebowania na energię powstało w wyniku zmniejszenia zysków słonecznych.

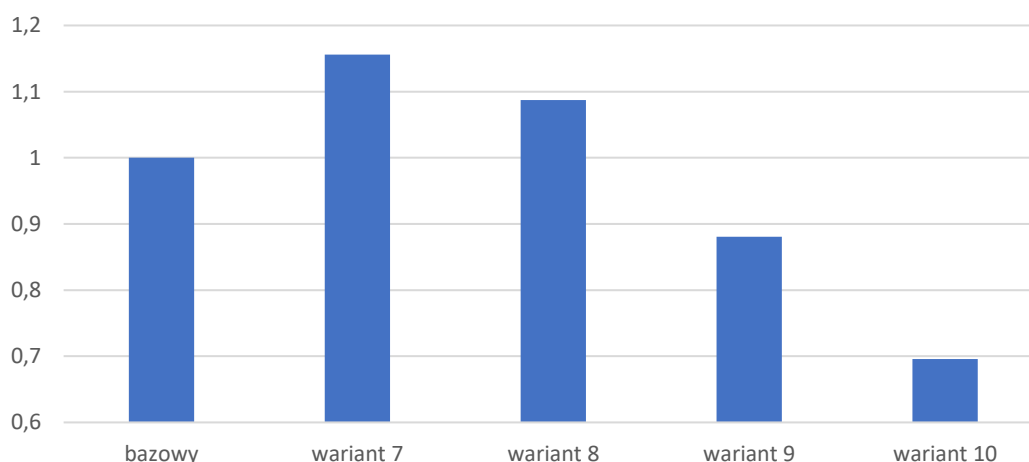
Tabela 36. Wpływ zmiany WWR na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

parametr	bazowy	wariant 7	wariant 8	wariant 9	wariant 10
WWR					
południowa (S)	35%	13%	13%	50%	50%
wschodnia (E)	33%	13%	13%	50%	50%
zachodnia (W)	33%	13%	13%	50%	50%
północna (N)	33%	13%	13%	13%	13%
izolacyjność					
dach [W/m <sup>2</sup> ·K]	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
ściany [W/m <sup>2</sup> ·K]	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176
okna [W/m <sup>2</sup> ·K]	1,000	1,000	0,600	1,000	0,600
stosunek wskaźnika EU do modelu bazowego	1	1,16	1,09	0,88	0,70

Wariant 9 i 10 zawiera bardziej optymalne rozlokowanie okien na elewacjach. W wyniku zwiększenia indeksu WWR do 50% na elewacjach, na które słońce oddziałuje bezpośrednio i zmniejszenie do minimum na elewacji północnej, zapotrzebowanie na EU na cele ogrzewania spadły o 12%. Obniżenie współczynnika U badanych okien do poziomu 0,6 W/m<sup>2</sup>·K spowodowało zmniejszenie zapotrzebowania na energię o 30%, co stanowi najlepszy wynik wśród badanych scenariuszy.

Wpływ zmiany WWR na wskaźnik EU w stosunku do modelu bazowego



Ilustracja 66. Wpływ zmiany WWR na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

#### 6.5.4. Współczynnik przenikania ciepła U

Modyfikacje współczynnika przenikania ciepła przyniosły zmiany w zakresie +17% do -26%. Wartości w wariantach 11 zostały obniżone do najniższych wśród przebadanych przypadków o standardzie pasywnym. Zastosowanie ich razem doprowadziło do obniżenia zapotrzebowania na EU do ogrzewania o 26%.

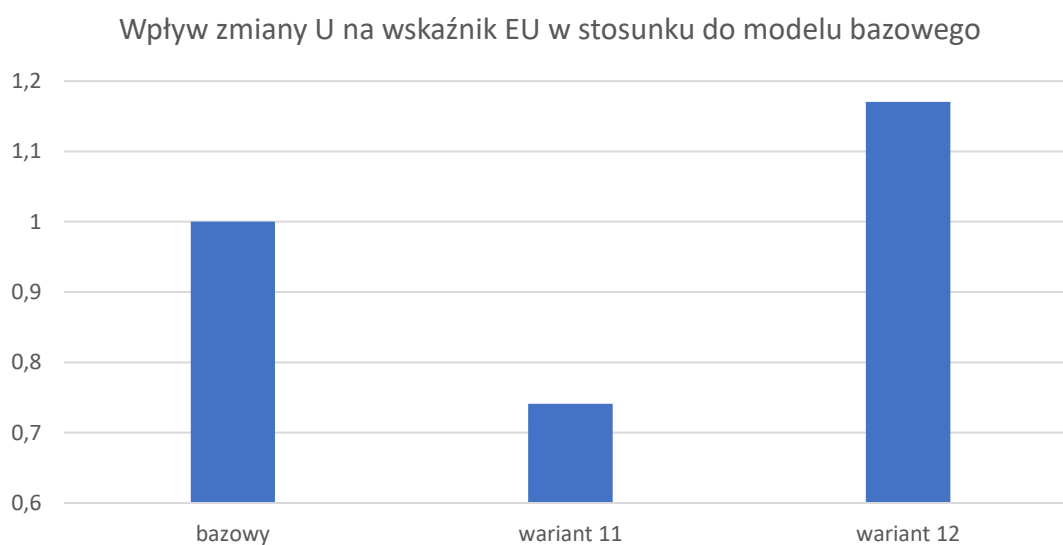
Na skutek przeprowadzenia symulacji wariantu 12, który zakładał wykonanie przegród o wyższych współczynnikach U, na poziomie maksymalnych wymagań z WT z roku 2014, współczynnik EU uległ zwiększeniu o 17%, co można porównać do wariantu 7, który zakładał zmniejszenie powierzchni wszystkich okien do wymaganego prawnie minimum.

Tabela 37. Wpływ zmiany współczynnika U na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

parametr	bazowy	wariant 11	wariant 12
izolacyjność			
dach	0,116	0,060	0,200
ściany	0,176	0,095	0,250
okna	1,000	0,600	1,300
stosunek wskaźnika EU do modelu bazowego	1	0,74	1,17

Obok wariantów modyfikujących udział szklenia w elewacjach wskutek zastosowania tego scenariusza osiągnięto największe różnice w stosunku do modelu bazowego.



Ilustracja 67. Wpływ zmiany współczynnika U na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego.

Źródło: opracowanie własne

## 6.6 Wnioski

W tabeli poniżej przedstawiono liczbowe wyniki uzyskane na skutek przeprowadzonych symulacji poszczególnych wariantów.

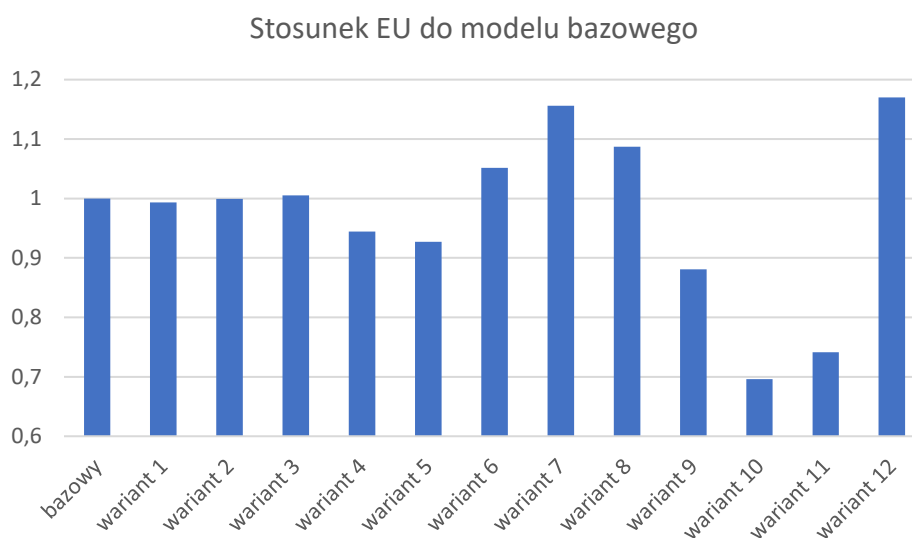
Tabela 38. Wartości współczynnika EU uzyskane w przeprowadzonych symulacjach.  
Źródło: opracowanie własne

scenariusz	EU ogrzewanie [kWh · rok]	EU ogrzewanie [kWh/m <sup>2</sup> · rok]	stosunek do modelu bazowego
bazowy	315803	34,53	1,00
wariant 1	313761	34,31	0,99
wariant 2	315608	34,51	1,00
wariant 3	317403	34,71	1,01
wariant 4	298250	32,61	0,94
wariant 5	292794	32,02	0,93
wariant 6	332047	36,31	1,05
wariant 7	365050	39,92	1,16
wariant 8	343381	37,55	1,09
wariant 9	278097	30,41	0,88
wariant 10	219764	24,03	0,70
wariant 11	234108	25,60	0,74
wariant 12	369578	40,41	1,17

Najniższy uzyskany wynik wynosi 25,6 kWh/m<sup>2</sup> · rok uzyskany na skutek działań bez ingerencji w rodzaj wentylacji i sprawność systemów instalacyjnych.

Najmniejszy wpływ, który jest praktycznie pomijalny, miały zmiany w zakresie orientacji budynku. Przy zadanej badanej bryle orientacja w stosunku do osi północ południe nie ma większego znaczenia. Dla bryły o innych proporcjach elewacji i zmiennym udziale szklenia wyniki mogłyby się zmienić, co może stanowić kierunki dalszych badań.

Badania dotyczące formy budynku wpłynęły na zużycie energii do ogrzewania na poziomie +/- 5%, jednocześnie radykalnie zmieniając wszystkie inne założenia przestrzenne. W przypadku symulacji w odniesieniu do konkretnej działki niektóre scenariusze mogłyby być niemożliwe do zrealizowania. Należy także podkreślić, że nie wykazano jednoznacznego związku między obniżaniem A/V i zmniejszeniem zapotrzebowania na EU do ogrzewania. Współczynnik ten jest ściśle połączony z proporcjami elewacji i współczynnikiem WWR, który, jeżeli pozostaje na tym samym poziomie, może doprowadzić do zmniejszenia zapotrzebowania przy wyższym współczynniku A/V (wariant 5). Wyniki uzyskane przy analizie tych wariantów pokazują skomplikowany system zależności w kształtowaniu bryły, w którym należy brać pod uwagę wszystkie związane z nim czynniki. Można postawić tezę, że przy tak dużej kubaturze i powierzchni całkowitej budynku oraz wysokiej izolacyjności dążenie do jak największej zwartości bryły nie jest priorytetem w celu ograniczenia zużycia energii na ogrzewanie, a raczej wskaźnikiem pomocniczym, którego nie należy przesadnie powiększać przez nadmierne komplikowanie formy. Wniosek jest zbieżny z wnioskami M. Kaczmarzyka na podstawie przeprowadzonych przez niego badań (Kaczmarzyk, 2017).



Ilustracja 68. Wartości współczynnika EU uzyskane w przeprowadzonych symulacjach.  
Źródło: opracowanie własne

Największy wpływ na efektywność energetyczną w zakresie przebadanych scenariuszy miały działania związane ze stosunkiem udziału przeszkleń do powierzchni ścian zewnętrznych oraz rozwiązania dostępne na rynku. W kierunku dalszych badań należałoby sprawdzić stosunek poniesionych kosztów ekonomicznych i środowiskowych takich rozwiązań w stosunku do zysków.

Najbardziej optymalnym scenariuszem pod względem zysków energetycznych w stosunku do kosztów jest wariant 9. Dzięki odpowiedniemu rozlokowaniu okien na elewacjach i zwiększenia ich powierzchni o 20%, przy jednoczesnym zachowaniu współczynnika U na tym samym poziomie jak w modelu bazowym, osiągnięto zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania o 12%. Przeanalizowano także udział strat ciepła z wariantu 11 dla samych okien i przeprowadzono dodatkową symulację polegającą jedynie na zmianie wartości współczynnika U dla okien do poziomu  $0,6 \text{ W/m}^2$ . Wynik zapotrzebowania na energię do ogrzewania na  $\text{m}^2$  wynosił  $30,14 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ , co przekłada się na zmniejszenie o 13% co jest wartością porównywalną do wariantu 9, przy o wiele mniejszych nakładach. Na podstawie przeprowadzonych badań, analiza udziału przeszkleń na poszczególnych elewacjach na wczesnym etapie koncepcyjnym w projektach wykazuje największy potencjał do uzyskania oszczędności energetycznych budynku i jest rekomendowana do wdrożenia przy projektowaniu kolejnych budynków wielorodzinnych w ramach działania przedsiębiorstwa, w partnerstwie, z którym realizowano niniejsze badania.

Największe uzyskane oszczędności w wyniku zastosowania opisywanych metod zmniejszyły zapotrzebowanie na EU do ogrzewania o  $10 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ , osiągając wynik  $24,03 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ . W celu dostosowania budynku do bardziej wymagających standardów, stawianych na przykład budynkom pasywnym, wskazane byłoby zastosowanie jednocześnie najbardziej efektywnych scenariuszy oraz zmniejszenie strat ciepła wynikających z rodzaju zastosowanej wentylacji i poprawienia szczelności budynku. Kierunkiem dalszych badań jest przeprowadzenie kolejnych symulacji w zespole projektowym rozszerzonym o specjalistów z zakresu fizyki budowli i rozwiązań instalacyjnych. Podkreśla to priorytetową rolę zastosowania schematu znanego ze zintegrowanego podejścia do procesu projektowego, polegającego na zwiększeniu udziału zespołu specjalistów na wczesnym etapie.



Uzyskane wyniki zostaną szczegółowo zaprezentowane inwestorowi z uwzględnieniem potencjału wdrożeniowego, w odniesieniu do niezrealizowanych jeszcze budynków w IV etapie (ilustracja 70), które charakteryzują się analogicznymi parametrami do modelu bazowego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje możliwość osiągnięcia lepszych parametrów termicznych budynków przy stosunkowo niewielkich nakładach inwestycyjnych. To z kolei może prowadzić do podniesienia standardu budynku, co bezpośrednio przełoży się na wzrost jego wartości rynkowej oraz atrakcyjności dla przyszłych użytkowników.

W przypadku pozytywnego zakończenia negocjacji z inwestorem, opracowany schemat badawczy zostanie poddany dalszym udoskonaleniom przez interdyscyplinarny zespół projektowy, składający się z projektantów branżowych oraz specjalistów w dziedzinie efektywności energetycznej i technologii budowlanych. Celem tych działań będzie uzyskanie dokładniejszych wyników symulacji, uwzględniających pełną efektywność instalacji grzewczych, wentylacyjnych i innych rozwiązań technicznych, które mogą wpływać na całkowitą wydajność budynku.

Wkład uzyskany dzięki tym działaniom w dalszy rozwój metody badawczej zostanie wykorzystany w przyszłych projektach, szczególnie na etapie analiz chłonności działek, co pozwoli na bardziej precyzyjne oszacowanie parametrów inwestycji. Następnym krokiem, wynikającym z przeprowadzonych symulacji, będzie opracowanie alternatywnego modelu BIM oraz projektu wykonawczego, dedykowanego dla ostatniego etapu budowy inwestycji. Dzięki temu możliwe będzie bardziej zrównoważone i optymalne zaplanowanie finalnych działań budowlanych, z uwzględnieniem nowoczesnych standardów energetycznych i technologicznych.



Ilustracja 69 Pierwsza Dzielnica w Katowicach, podział na etapy  
Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów Medusa Group

## ROZDZIAŁ 7. PODSUMOWANIE

### 7.1 Wprowadzenie

Rozdział ten stanowi podsumowanie kluczowych elementów przedstawionych w rozprawie doktorskiej, uwzględniając zarówno wyniki badań literaturowych, jak i analizę przypadków oraz symulacji przeprowadzonych w trakcie pracy. Celem tego rozdziału jest usystematyzowanie uzyskanych rezultatów, które pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących badanych zagadnień.

### 7.2 Podsumowanie badań literaturowych

Badania literaturowe wykazały, że utrzymanie komfortu cieplnego w budynkach stanowi jedno z głównych wyzwań projektowych i eksploatacyjnych, a jego osiągnięcie zależy od wielu czynników. Świadome kształtowanie bryły, przemyślany dobór materiałów budowlanych, właściwa izolacja oraz eliminacja mostków cieplnych to podstawowe elementy, które mają kluczowe znaczenie dla efektywności energetycznej budynku. Regulacja zysków energii słonecznej, np. poprzez zastosowanie przeszkleń i magazynów ciepła, oraz odpowiednio zaprojektowane systemy HVAC, odgrywają istotną rolę w utrzymaniu komfortu cieplnego i optymalizacji zużycia energii. Badania danych statystycznych wskazały także znaczący udział instalacji wentylacji i przygotowania ciepłej wody, co wskazuje na potrzebę uwzględniania tych potrzeb energetycznych w większym stopniu.

Wprowadzenie obowiązkowej certyfikacji energetycznej budynków to krok w kierunku zwiększenia przejrzystości w ocenie efektywności energetycznej nowo powstających obiektów. Świadectwa energetyczne nie tylko informują o jakości energetycznej budynku, ale także zawierają rekomendacje dotyczące możliwości jej poprawy. Jak wskazują badania, informowanie kupujących o energochłonności budynku zwiększa zainteresowanie obiektami o wyższej efektywności energetycznej, co może prowadzić do wzrostu cen sprzedaży lub wynajmu tych nieruchomości. Aby certyfikacja była skuteczna, wskaźniki zawarte w świadectwach muszą być zrozumiałe i jednoznaczne, co obecnie często stanowi problem, jak podkreślają krytycy systemu.

Wyniki badań wskazują również na istotne wyzwania związane z praktycznym wdrożeniem certyfikacji. Często opracowywanie świadectw następuje na późnych etapach projektu, co ogranicza możliwość realnego wpływu na optymalizację energetyczną budynku. Dodatkowo, w przypadku budynków wielorodzinnych, certyfikaty sporządzane są dla całego obiektu, co może prowadzić do uproszczeń i zniekształcać realny obraz energochłonności poszczególnych mieszkań. Zauważono także problem z nadmiernie ogólnymi wskaźnikami, takimi jak współczynnik zużycia energii pierwotnej EP, który nie pozwala oszacować rzeczywistych kosztów eksploatacji. Dla użytkowników kluczowe są wskaźniki zużycia energii końcowej (EK) i użytkowej (EU), które dostarczają informacji o rzeczywistych kosztach użytkowania budynku oraz efektywności projektowanych rozwiązań.

Literatura przedmiotu sugeruje, że kluczowe wyzwania w zakresie komfortu cieplnego i efektywności energetycznej budynków obejmują nie tylko aspekty techniczne, ale także kwestie związane z regulacjami prawnymi i procesem certyfikacji. Upowszechnienie dynamicznych modeli energetycznych w procesie projektowym, jak również lepsze zrozumienie przez inwestorów i użytkowników znaczenia świadectw energetycznych, mogłoby znacząco poprawić efektywność energetyczną nowych budynków, przyczyniając się do redukcji zużycia energii i kosztów eksploatacyjnych.

Przeprowadzone badania wskazują także na potrzebę zmian w procesie projektowym rozpowszechnionym na rynku, również przez zwyczajowe sposoby rozliczania prac projektowych i rozłożenie nakładów pracy na poszczególne fazy projektowe. W praktyce, zintegrowane projektowanie umożliwia lepszą koordynację pomiędzy rozwiązaniami pasywnymi, takimi jak orientacja i izolacja, a systemami aktywnymi, jak HVAC czy systemy sterowania budynkiem. Co więcej, zastosowanie narzędzi symulacyjnych w zintegrowanym procesie projektowym pozwala na dynamiczne modelowanie i ocenę

energetyczną budynku jeszcze przed jego realizacją, co z kolei umożliwia dopasowanie rozwiązań technicznych do specyfiki obiektu oraz lokalnych warunków klimatycznych.

### 7.3 Podsumowanie badań analizy przypadków

Wnioski wynikające z analizy przypadków zarówno przeprowadzonych badań, jak i rzeczywistych obiektów wskazują na istotność różnych parametrów projektowych w procesie poprawy efektywności energetycznej. Analiza przywołanych badań pokazuje możliwości poprawy sprawności energetycznej w przypadku istniejących budynków oraz skalę potencjalnego wpływu metod optymalizacyjnych. Wnioski ze studium przypadków istniejących budynków, przy których projektowaniu zastosowano optymalizację energetyczną wykazały zbiór charakterystycznych cech i zakresy ich wartości.

Badania wskazują na konieczność wspólnego rozpatrywania wszystkich istotnych parametrów, ponieważ izolowanie jednego z nich, bez uwzględnienia wpływu innych, może prowadzić do zniekształconych wniosków. Nie można jednoznacznie ustalić jednej optymalnej metody formowania bryły budynku i niezbędne jest badanie proponowanych rozwiązań w odniesieniu do strategii stworzonej przez wielobranżowy zespół projektowy.

Wiodącymi cechami charakterystycznymi jest świadome kształtowanie bryły poprzez kontrolę proporcji elewacji i współczynnika A/V, stosowanie przeszkleń zorientowanych, maksymalizujących zyski słoneczne i odpowiednie formowanie udziału przeszkleń na poszczególnych elewacjach. Powszechną praktyką przy projektowaniu budynków energooszczędnych jest stosowanie odzysku ciepła w różnych postaciach, co ma szczególne znaczenie na tle analizy struktury zużycia energii w budynkach. Z tego samego powodu niezwykle istotne jest uzyskanie dużej szczelności budynku, co pozwala na minimalizację strat ciepła i zimna; natomiast należy podkreślić, że parametr ten jest bardziej zależny od jakości wykonania, doboru materiałów i urządzeń niż od opracowania optymalnego projektu architektonicznego.

### 7.4 Podsumowanie badań symulacji energetycznych

Podrozdział dotyczący przeprowadzonych badań symulacyjnych dostarczył cennych wniosków na temat optymalizacji zużycia energii na ogrzewanie w budynkach wielorodzinnych.

Jednym z głównych wyzwań był wybór odpowiedniego narzędzia symulacyjnego. Testowano różne programy, z których nie wszystkie były w stanie dokładnie odwzorować geometrię modelu lub oferowały scenariusze dostosowane głównie do rynków zagranicznych. Problemem okazał się także czasochłonny proces dostosowywania parametrów do specyfiki lokalnej, co utrudniało efektywną analizę na wczesnych etapach projektowania.

Badania wykazały, że spośród analizowanych wariantów, największe oszczędności energetyczne (nawet do 30% w stosunku do modelu bazowego) można uzyskać poprzez odpowiednie rozmieszczenie i zwiększenie powierzchni okien, a także poprawę izolacyjności przegród. Pomimo znacznych oszczędności, zastosowanie materiałów o bardzo niskim współczynniku przewodnictwa cieplnego, takich jak okna o współczynniku  $U=0,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , wiąże się z dużymi kosztami inwestycyjnymi oraz trudnościami wykonawczymi.

Wariant 9, który obejmował zwiększenie powierzchni przeszkleń zorientowanych na elewacjach południowej, wschodniej i zachodniej do 50% i zmniejszeniu WWR na elewacji północnej do 13%, przy jednoczesnym zachowaniu ich dotychczasowych parametrów przewodzenia ciepła, okazał się najbardziej efektywny pod względem oszczędności energetycznych w stosunku do nakładów inwestycyjnych.

Badania wykazały także, że prosta zmiana orientacji budynku względem osi północ-południe miała marginalny wpływ na zużycie energii. Wyniki te sugerują, że w przypadku obiektów o dużej kubaturze priorytetem nie jest dążenie do maksymalnej zwartości bryły, lecz świadome kształtowanie formy z uwzględnieniem wszystkich parametrów.

Wnioski podkreślają również konieczność zintegrowanego podejścia do procesu projektowania budynków, w którym od samego początku współpracują specjaliści z różnych dziedzin, w tym fizyki

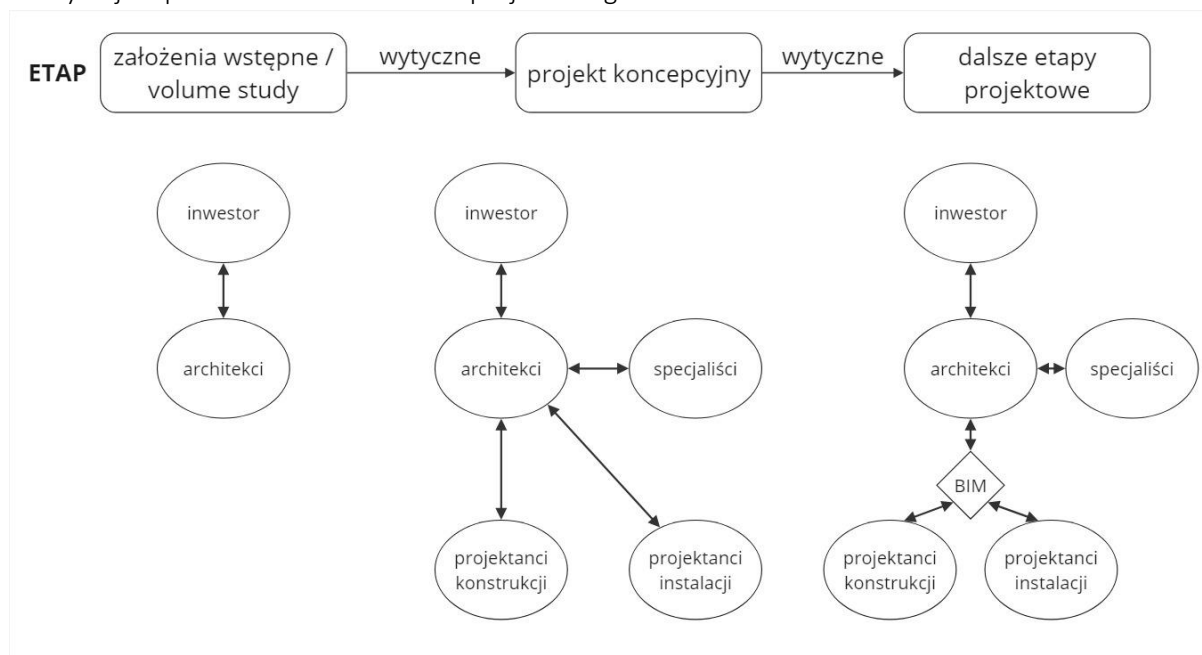
budowli i instalacji technicznych. Uzyskane wyniki symulacji mogą stanowić istotny wkład w proces projektowy przyszłych budynków o analogicznych parametrach do modelu bazowego, także dla kolejnego etapu budowy analizowanego zespołu mieszkaniowego.

## 7.5 Wdrożenie efektów badań

### 7.5.1 Zmiana schematu procesu projektowego

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano propozycję wdrożenia rewizji procesu projektowego uwzględniającego założenia projektowania zintegrowanego takie jak: zmiana proporcji nakładów pracy na poszczególnych etapach związanych z zaangażowaniem bardziej interdyscyplinarnych zespołów projektowych, zwiększenie zakresu możliwych działań na etapie podejmowania decyzji i modyfikacja schematu koordynacji międzybranżowej. Propozycję przygotowano w celu umożliwienia podejmowania bardziej świadomych wyborów pod względem planowanej efektywności energetycznej projektowanych obiektów.

Poniższy schemat pokazuje przepływ informacji między zaangażowanymi stronami w tradycyjnym podziale ról i liniowym sposobie postępowania. Decyzje podejmowane na poszczególnych etapach zamykają konkretne fazy i stanowią ugruntowane wytyczne do dalszych działań. Na etapie prac przedprojektowych, często przed zakupem działki stronami zaangażowanymi jest inwestor i architekt bądź zespół architektów, między którymi następuje przepływ informacji i decyzje zostają podjęte zazwyczaj na podstawie doświadczenia projektowego.



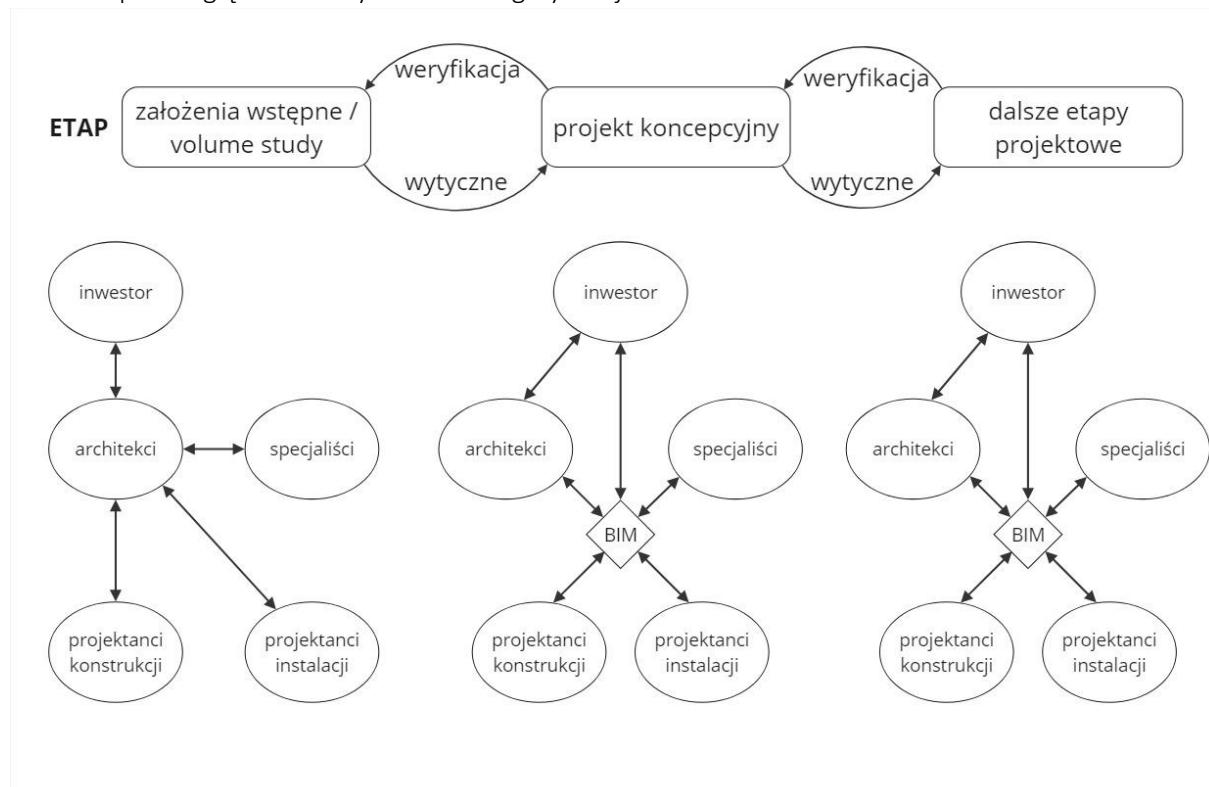
Ilustracja 70. Schemat przepływu informacji na poszczególnych etapach tradycyjnego procesu projektowego.

Źródło: opracowanie własne

Opracowane wytyczne służą jako podstawa do opracowania projektu koncepcyjnego, w którym architekt pełni rolę głównego koordynatora i pośrednika między inwestorem i zespołem projektowym, na który składają się projektanci konstrukcji, projektanci instalacji sanitarnych oraz specjaliści tacy jak np. rzeczoznawcy do spraw zabezpieczeń pożarowych. Wspólne działania prowadzą do stworzenia wstępnych schematów przebiegów instalacji, założeń układu konstrukcyjnego, kształtu bryły, układu funkcjonalnego, zagospodarowania terenu, zgodności z prawem miejscowym etc. Zaakceptowana koncepcja stanowi podstawę do dalszych prac, które mogą być prowadzone w oparciu o model BIM. Architekt w dalszym ciągu pełni rolę głównego koordynatora, a zespół powiększa się o kolejnych specjalistów z zakresu: akustyki, fizyki budowli, BHP, sanitarno-higienicznych i innych w zależności od

charakteru projektu. Zespół projektantów opracowuje szczegółowe projekty konstrukcji i instalacji wentylacji, ogrzewania, chłodzenia, elektrycznej, teletechnicznej, oddymiania, wody użytkowej, kanalizacji sanitarnej, deszczowej i innych instalacji specjalistycznych.

W alternatywnym schemacie zawarto istotne zmiany, które wprowadzają bardziej zintegrowane podejście i większe zaangażowanie różnych specjalistów już na wcześniejszych etapach projektowania. Wstępne konsultacje założone są od fazy prac przedprojektowych, aby zweryfikować przyjmowane założenia pod różnymi kątami. Rozszerzenie zespołu projektowego zaangażowanego do opracowania programu inwestycji oraz sporządzenia badania chłonności działki (volume study) pozwoli na bardziej szczegółowe zbadanie potencjału budynku, nie tylko pod względem optymalnego wykorzystania działki, ukształtowania gabarytów bryły i weryfikacja tych założeń pod kątem zgodności z prawem miejscowym, ale także pod względem efektywności energetycznej.



Ilustracja 71. Proponowana modyfikacja schemat przepływu informacji na poszczególnych etapach procesu projektowego.  
Źródło: opracowanie własne

Przygotowanie pełniejszej informacji i przeprowadzenie bardziej interdyscyplinarnej analizy chłonności działki pomaga unikać problemów wynikających z przyjęcia błędnych założeń. Model BIM rozwijany jest od etapu koncepcji, umożliwiając lepszy przepływ informacji za jego pośrednictwem. Regularna komunikacja między stronami zaangażowanymi w projekt pozwala na szybkie reagowanie na zmieniające się okoliczności i dostosowanie projektu do aktualnych wymagań. **Dzięki zawarciu większej ilości informacji na wcześniejszym etapie, zmiany wynikające z potrzeb i problemów diagnozowanych na dalszych etapach redefiniują przyjęte założenia, a nie tworzą je od nowa.** W ten sposób możliwa jest weryfikacja założeń z poprzednich faz i mniej inwazyjna w resztę postanowień reakcja. Podejście takie daje szansę na wczesne określenie energetyki budynku i dokładniejsze połączenie jej z wszystkimi aspektami projektowanego budynku.

Stosowanie tego rodzaju podejścia wymaga zbudowania znacznie większej świadomości korzyści, jakie może przynieść, co przekłada się na lepszą efektywność energetyczną. Tę świadomość należy kształtować zarówno wśród projektantów, inwestorów, jak i użytkowników, co stanowi dość duże wyzwanie. Kształtowanie świadomości wśród użytkowników jest kluczowe, ponieważ to właśnie od nich zależy wytworzenie popytu na bardziej energooszczędne budynki mieszkaniowe. Uświadamianie

inwestorów powinno polegać na wyjaśnieniu, jak zwiększone nakłady pracy na wcześniejszych etapach projektowania mogą przełożyć się na większą wartość końcowego obiektu.

Również sami projektanci, posiadając odpowiednią świadomość, byłiby w stanie efektywniej zarządzać procesem projektowym, unikając niepotrzebnych i trudnych do przeprowadzenia zmian na etapie wykonawczym lub w trakcie realizacji projektu.

Oprócz tego, konieczne jest promowanie alternatywnych standardów finansowania projektów, gdyż obecny rynkowy standard nie sprzyja przenoszeniu większego zaangażowania na wczesne fazy projektowe. Zgodnie z wytycznymi dotyczącymi wyceny prac projektowych Stowarzyszenia Architektów Polskich, udział procentowy poszczególnych faz projektowania przedstawia się następująco: projekt koncepcyjny (PK) – 7-15%, projekt budowlany (PB) – 30-45%, projekt wykonawczy (PW) – 40-60% (SARP, 2014). Taki podział jest niesprzyjający, ponieważ utrudnia przeniesienie punktu ciężkości zaangażowania zespołu projektowego na najwcześniejsze etapy prac.

Większa świadomość zarówno wśród projektantów, jak i inwestorów mogłaby pomóc w zmianie proporcji wyceniania prac projektowych. Dzięki temu możliwe byłoby zaangażowanie większych zespołów już na etapie początkowym, co z kolei skróciłoby czas potrzebny na przygotowanie ostatecznej dokumentacji projektowej, bez konieczności wprowadzania późniejszych kosztownych i czasochłonnych zmian.

### 7.5.2 Wykorzystanie opracowanej metodologii symulacji

W zrewidowanym procesie projektowym już na etapie analizy chłonności działki ułatwione jest przeprowadzenie symulacji BIM analogicznej do tej opisanej w rozdziale 6. Planowane wdrożenie tej metody obejmuje prototypowanie rozwiązań na przykładzie kolejnych projektów realizowanych przez biuro Medusa Group, co umożliwi stopniowe doskonalenie narzędzi i procedur. Symulacje BIM pozwolą na tworzenie modeli budynków, które obejmują kluczowe parametry architektoniczne i energetyczne. Informacja dotycząca wpływu podejmowanych działań na wydajność energetyczną będzie obecna od samego początku opracowywania projektu, a także przekazywana inwestorowi przy prezentacji stworzonych wariantów, w celu podjęcia bardziej świadomych wyborów.

W ramach wdrażania tej metody przewiduje się także zbieranie szczegółowej informacji zwrotnej na podstawie opracowanych modeli. W tym procesie kluczową rolę odgrywać będą specjaliści zajmujący się systemami instalacyjnymi, fizyką budowli, a także certyfikacją energetyczną. Ich wiedza i doświadczenie będą wykorzystywane do udoskonalania metody, co pozwoli na bieżąco optymalizować projekt pod kątem wydajności energetycznej. Współpraca tych ekspertów z zespołem projektowym pozwoli na stałe podnoszenie standardów, co przyniesie wymierne korzyści zarówno pod względem kosztów eksploatacji, jak i środowiskowych.

Pilotażowe wdrożenie musi odbywać się w ścisłej współpracy z projektantami branżowymi, odpowiedzialnymi za różne aspekty projektu, w tym architekturę, instalacje techniczne oraz inżynierię środowiskową. Kluczowe będzie tutaj zdefiniowanie zakresów odpowiedzialności i kompetencji poszczególnych członków zespołu projektowego. Dzięki temu każda faza projektu będzie efektywnie zarządzana, a odpowiedzialność za poszczególne elementy procesu będzie jasno przypisana.

Jednym z celów współpracy z branżowymi specjalistami będzie także lepsze zrozumienie, w jaki sposób różne elementy projektu – od wyboru materiałów, poprzez systemy instalacyjne, aż po projektowanie bryły budynku – wpływają na jego ogólną efektywność energetyczną. Wdrożenie tej wiedzy na wczesnym etapie procesu pozwoli na lepsze zintegrowanie różnych aspektów technicznych, co z kolei przełoży się na bardziej zrównoważone, energooszczędne i ekonomicznie opłacalne realizacje.

Potencjalnie, dzięki zastosowaniu metodologii uczestnicy procesu inwestycyjnego i projektowego zyskają nie tylko większą kontrolę, ale także będą w stanie lepiej ocenić korzyści wynikające z zastosowania innowacyjnych technologii i rozwiązań projektowych.

### 7.5.3 Opracowanie wytycznych do alternatywnej dokumentacji do budowy

Prowadzenie badań na podstawie wybranego projektu było świadomym wyborem, ze względu na potencjał wdrożeniowy wyników. Inwestycja ta realizowana jest etapami, co umożliwi ocenę zastosowanych rozwiązań, wyciąganie wniosków z procesu budowy oraz wprowadzenie modyfikacji przy kolejnych budynkach. Takie podejście pozwala na bieżącą optymalizację zarówno na poziomie projektowym, jak i wykonawczym, co znacznie ułatwia modularny charakter inwestycji, który daje większą swobodę w ewaluacji i implementacji zmian.

Zebrane dane z badań opisanych w dysertacji wskazują na możliwe kierunki działań, które mogą przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej budynków przed rozpoczęciem ich realizacji. Wyniki te, w połączeniu z wnioskami wyciągniętymi z dotychczasowych etapów budowy, zostaną przedstawione inwestorowi. Będą one stanowić fundament do przeprowadzenia interdyscyplinarnego procesu optymalizacji, mającego na celu precyzyjne określenie możliwych oszczędności energetycznych, jakie mogą zostać uzyskane w trakcie użytkowania obiektów. Wariant zakładający zmianę proporcji udziału okien na elewacjach na 50, 50, 50 i 13% wykazał potencjał na zmianę efektywności przy stosunkowo niskim nakładzie inwestycyjnym. Scenariusz zakładał zwiększenie powierzchni szklenia na poziomie 20%, ale warte zbadania są także alternatywne schematy rozłożenia okien bez zmiany ilości i wymiarów okien.

Następnym krokiem będzie wprowadzenie alternatywnych parametrów do projektu wykonawczego, a następnie realizacja budynku z uwzględnieniem opracowanych zmian i strategii, co pozwoli na skuteczne wdrożenie zoptymalizowanych rozwiązań.

## 7.6 Weryfikacja założeń pracy

### 7.6.1 Weryfikacja realizacji celów pracy

Wszystkie założone cele, opisane w podrozdziale 1.2 zostały zrealizowane.

#### **Cel 1. Systematyzacja wiedzy dotyczącej efektywności energetycznej oraz metod jej optymalizacji w przemyśle architektoniczno-budowlanym.**

Cel został zrealizowany dzięki przeprowadzeniu przeglądowych badań literatury, opisanych w rozdziałach 2, 3 i 4. Literatura przedmiotu została przelanizowana w zakresie zagadnienia optymalizacji, efektywności energetycznej, ich roli w procesie projektowym i zastosowaniu technologii BIM. Przedstawiono rys historyczny energochłonności budynków, wyjaśniono zagadnienie komfortu cieplnego i wynikających z niego ograniczeń optymalizacji. Przeanalizowano uwarunkowania formalnoprawne w Unii Europejskiej i w Polsce, co stanowiło tło do omówienia charakterystycznych parametrów budynków energooszczędnych. Omówiono zagadnienie certyfikacji energetycznej, w odniesieniu do praktyki architektonicznej.

#### **Cel 2. Zestawienie metod służących optymalizacji energetycznej w różnych fazach procesu projektowo-budowlanego oraz w różnych fazach cyklu życia budynku.**

W oparciu o wnioski płynące z analizy źródeł i ewaluacji poszczególnych metod optymalizacyjnych dokonano ich podziału (tabela 15). Przypisano im również stan uszczegółowienia projektu, w którym mogą zostać zastosowane. Wyznaczono fazy procesu projektowo-budowlanego, w których architekt może przeprowadzić optymalizację efektywności energetycznej.

#### **Cel 3. Wyznaczenie kompetencji architekta spośród zestawionych metod optymalizacji efektywności energetycznej w budynkach na etapie projektowym.**

W oparciu o tabelę 15 oraz analizę przypadków opisanych w literaturze (podrozdział 5.2) wyodrębniono kompetencje architekta w zakresie optymalizacji efektywności energetycznej.

#### **Cel 4. Zbadanie zasadności użycia oprogramowania BIM w celu optymalizacji efektywności energetycznej.**

Za pomocą schematu badawczego służącego do analizy 8 budynków zoptymalizowanych energetycznie, który uwzględniał wykonanie uproszczonego modelu BIM każdego z nich, przetestowano możliwość wyznaczenia w ten sposób cech architektonicznych budynku.

#### **Cel 5. Opracowanie metodologii optymalizacji efektywności energetycznej w praktyce architektonicznej oraz określenie niezbędnych narzędzi architekta.**

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach przypadków (rozdział 5.3) opracowano scenariusze optymalizacji budynku mieszkalnego wielorodzinnego. W rozdziale 6 przedstawiono metodologię przeprowadzenia symulacji wpływu decyzji projektowych na wydajność energetyczną.

#### **Cel 6. Oszacowanie skali oszczędności wydatków energetycznych w budynku dzięki zaproponowanej metodologii efektywności energetycznej.**

W wyniku przeprowadzonych symulacji określono skalę potencjalnych oszczędności zużycia Energii Użytkowej na cele ogrzewania w stosunku do modelu bazowego (podrozdziały 6.5 i 6.6).

#### **Cel 7. Rozważenie zagadnienia optymalizacji efektywności energetycznej jako kompetencji architekta w kontekście projektowania zintegrowanego.**

W trakcie badań literaturowych porównano modele tradycyjnego procesu projektowego z modelem zintegrowanym (podrozdział 4.4). Na tej podstawie zarekomendowano wdrożenie polegające na zmianie schematu procesu projektowego (podrozdział 7.5.1).

#### **Cel 8. Wyznaczenie zaleceń i wytycznych dotyczących metod pracy architekta w celu optymalizacji efektywności energetycznej.**

Przedstawiono scenariusz pilotażowego wdrożenia metod optymalizacji efektywności energetycznej przez architekta w zintegrowanym procesie projektowym (podrozdział 7.5.2). Wyodrębniono charakterystyczne wskaźniki umożliwiające potencjalne oszczędności wydatków energetycznych dzięki decyzjom dotyczącym cech architektonicznych budynku (podrozdział 7.5.3).

### **7.6.2 Weryfikacja realizacji tezy**

W wyniku przeprowadzonych badań tezy postawione na początku pracy zostały potwierdzone

Teza główna:

**Projektowanie architektoniczne obiektów mieszkaniowych wielorodzinnych, w oparciu o technologię BIM na wczesnych etapach koncepcyjnych, może ułatwić proces optymalizacji efektywności energetycznej budynku. Pozwala ono na bardziej świadomą kontrolę wartości parametrów dotyczących elementów architektury budynku decydujących o jego wydajności energetycznej.**

Główna teza pracy zakłada prowadzenie procesu projektowego w środowisku BIM od samego zainicjowania tego procesu. Korzystanie z tej technologii nie jest rozumiane jedynie jako trójwymiarowe przedstawienie geometrii modelu, ale równoczesne rozwijanie kompleksowej informacji dotyczącej rozwijanego obiektu. Istotą takiego podejścia jest wcześniejsze sformułowanie większej ilości danych, które pozwala na ich przekształcanie, analizę, zestawianie w celu pełniejszej ewaluacji ograniczeń, zysków, strat i zagrożeń. W tym kontekście zainicjowanie procesu optymalizacji efektywności energetycznej jest możliwe na wcześniejszym etapie rozwijania koncepcji, przez co proces może być pełniejszy i brać pod uwagę większą ilość zmiennych, które rewizja na danym etapie nie niesie za sobą szerokich konsekwencji jak w projekcie wykonawczym - bez konsekwencji utrudniających bądź



opóźniających założony harmonogram prac czy budżet. Druga część postawionej tezy, bazując na założeniu posiadania bardziej złożonej informacji, dotyczy możliwości dokładniejszej ewaluacji każdej podejmowanej decyzji. Zakłada kontrolę wartości parametrów dotyczących elementów architektury budynku, rozumianych jako zespół cech, których zmiana znajduje się w kompetencji architekta i niesie za sobą konsekwencje w postaci zmiany ilości energii potrzebnej do funkcjonowania obiektu zgodnie ze swoim przeznaczeniem.

Przeprowadzone badania literaturowe wskazują, że technologie cyfrowe pełnią rolę katalizatora, przyspieszającego rozwój zrównoważonego projektowania. Wśród nich technologia BIM wskazywana jest jako jedno z kluczowych narzędzi umożliwiających ewolucję w podejściu do projektowania polegającej na tym, że opracowywana dokumentacja nie składa się jedynie z poszczególnych rysunków i opisów, a stanowi kompleksową bazę danych rozwijaną przez interdyscyplinarny zespół projektowy. W takim kontekście przeprowadzenie procesu optymalizacji energetycznej jest ułatwione dzięki dysponowaniu bardziej dokładną informacją wejściową oraz możliwości wielowątkowej symultanicznej analizy pod kątem każdej dyscypliny. Badania opisane w rozdziale 6 potwierdzają te obserwacje poprzez otrzymanie wyników na podstawie przeprowadzonych symulacji bazujących na modelu BIM. Dzięki zastosowaniu opracowanych scenariuszy do modelu bazowego uzyskano wyniki wskazujące na potencjalne obszary podatne na przeprowadzenie zmian ulepszających wydajność energetyczną budynku.

Stosowanie metod optymalizacyjnych szeroko omawianych w literaturze przedmiotu ma konkretny wpływ na poszczególne parametry kształtowanych budynków. Warunkiem koniecznym do ich kontroli jest posiadanie wiedzy na temat ich wartości, która może być łatwo dostępna przy odpowiednim rozwijaniu modelu. W ten sposób możliwa jest weryfikacja skuteczności stosowania poszczególnych metod optymalizacyjnych na konkretny projekt. Indywidualny charakter każdego budynku i przeprowadzanego w celu jego powstania procesu inwestycyjnego utrudnia formułowanie uniwersalnych przepisów i zasad przynoszących zawsze najlepsze efekty, dlatego konieczna jest nieustanna ocena podejmowanych decyzji, będących następstwem przyjętych strategii. Badania przeprowadzone w rozdziale 6 udowadniają, że stosowanie różnych metod optymalizacyjnych niesie ze sobą korzyści o różnej skali. W tym konkretnym przypadku zmiana orientacji budynku czy zwiększanie zwartości geometrii mogą być źródłem ograniczonych korzyści dotyczących zapotrzebowania na energię do ogrzewania w porównaniu do modyfikacji udziału przeszkleń na poszczególnych elewacjach. Dostęp do takiej informacji na wczesnym etapie projektowym pozwala na ukierunkowanie działań optymalizacyjnych prowadząc do zmaksymalizowania ich potencjału.

Tezy pomocnicze:

- 1. Projektowanie zintegrowane jest katalizatorem procesu optymalizacji efektywności energetycznej budynku mieszkalnego wielorodzinnego w początkowych fazach procesu projektowo-budowlanego.**
- 2. Symulacje wykonywane na podstawie modelu BIM stanowią adekwatne narzędzie do przeprowadzania optymalizacji efektywności energetycznej w ramach kompetencji architekta.**

Pierwsza teza pomocnicza zakłada pozytywny wpływ zastosowania zintegrowanego procesu projektowego na przeprowadzenie procesu optymalizacji efektywności energetycznej. Badania literaturowe potwierdzają potencjał stosowania tego podejścia w kontekście zwiększania wydajności energetycznej budynku. Rozszerzając wnioski opisane powyżej, dysponowanie pełniejszą informacją dotyczącą efektów zastosowania poszczególnych metod, umożliwia wieloparametrową ocenę potencjału przeprowadzoną z perspektywy różnych dyscyplin.

Taka optymalizacja jest bardziej kompleksowa, umożliwiając priorytetyzację działań i uniknięcie sytuacji, w której poszczególni projektanci nie mają pełnej wiedzy o konsekwencjach swoich decyzji dla innych. Badania danych statystycznych wykazały znaczący udział systemów instalacyjnych w ogólnym

bilansie zużycia energii w nowopowstających budynkach, co podkreśla istotność przeprowadzania optymalizacji energetycznej w bardziej interdyscyplinarny sposób.

Druga teza pomocnicza określa rolę modelu BIM jako podstawę do przeprowadzenia symulacji pozwalającej architektom na weryfikację skuteczności działań podejmowanych w celu ograniczenia zużycia energii w projektowanych budynkach. Badania literatury przedmiotu wykazały, że metody optymalizacji energetycznej przynależne do dziedziny architektury są w dużej mierze związane z kształtowaniem geometrii budynku z uwzględnieniem warunków lokalnych oraz założeń materiałowych. W tym kontekście model BIM stanowi odpowiednie medium mogące zawierać wszystkie potrzebne informacje do przeprowadzenia procesu optymalizacji efektywności energetycznej i ma wystarczający potencjał do ich przeprowadzenia. Kształtowanie tych parametrów w ramach współpracy międzybranżowej leży w kompetencji architektów.

## 7.7 Kierunki dalszych badań

Kierunki dalszych badań obejmują aplikacje teoretyczne, praktyczne oraz dotyczą kwestii popularyzacji nauki.

Po pierwsze, przedstawione symulacje znalazły zastosowanie w specyficznym rodzaju budynku – wielorodzinnym budynku mieszkalnym, który ma określoną typologię, zestaw charakterystycznych wymagań dotyczących elementów architektury i instalacji oraz jest wpisany w rygorystyczne wymagania formalnoprawne pod względem m.in. ilości doświetlenia, minimalnych powierzchni czy sposobów zapewnienia bezpieczeństwa w budynkach. Stanowi to szczegółową wytyczną i pomogło w kategoryzacji badanych parametrów budynku, jednak stanowi również limitację pracy. Proponuje się wdrożenie opracowanej metodologii w przypadkach budynków o innej funkcji i typologii w myśl zasad reflective practice, którą zastosowano w omawianym w dysertacji przypadku. Ewaluacja optymalizacji efektywności energetycznej przedstawionej w niniejszej pracy powinna zostać transponowana również do kolejnych etapów projektowych, na każdym z nich powinna zostać zweryfikowana i w razie potrzeb zoptymalizowana i ulepszona.

Po drugie, ze względu na dynamiczny postęp związany z BIM oraz rosnącą standaryzacją procesów modelowania w polskich i europejskich pracowniach projektowych, schemat opracowany w dysertacji można w nieskomplikowany sposób replikować dzięki jednolitemu oprogramowaniu oraz wysokiemu stopniu ujednoczenia wymagań formalno-prawnych w Unii Europejskiej. Ze względu na podkreślenie wagi początkowych faz projektowych, w tym koncepcji architektonicznej, rekomenduje się transfer wiedzy w edukacji architektonicznej wśród studentów studiów magisterskich, którzy są zapoznani z takimi pojęciami jak optymalizacja energetyczna, zrównoważone projektowanie oraz ze środowiskiem BIM.

Po trzecie, zgodnie z uwarunkowaniami formalnoprawnymi w Unii Europejskiej, autor zauważa potrzebę zobowiązania architektów do wykonywania optymalizacji energetycznej w formie wytycznych odgórnych. W przypadku standardowego procesu projektowego, projektanci branżowi często nie biorą udziału w projektowaniu na etapie koncepcji architektonicznej. Niniejsza dysertacja proponuje schemat badawczy do sprawdzenia podstawowych parametrów budynku, który jest w kompetencjach architekta. Zobowiązanie do udokumentowania przeprowadzenia prostych metod optymalizacyjnych lub symulacji informujących o wydatkach energetycznych budynku na etapie formowania geometrii budynku, spowodowałyby nie tylko poszerzenie wiedzy i narzędzi projektantów, ale również miałyby swój wkład w rozwijanie zrównoważonej nowoczesnej architektury. W Polsce takie zobowiązania dla architektów może wdrożyć np. Stowarzyszenie Architektów Polskich we współorganizowanych przez siebie konkursach.

Po czwarte, nawet nieskomplikowany model BIM ze zmiennymi parametrami wskazanymi w pracy może zostać skonwertowany do formatów, dzięki którym może być przeglądany w rozszerzonej rzeczywistości (AR) lub wirtualnej rzeczywistości (VR). Wariantowanie zgodnie ze scenariuszami umożliwia sprawdzenie nie tylko wpływu zmiennych parametrów na zużycie energii w budynku, ale

również efektu wizualnego w dużej skali lub skali człowieka, co ułatwia podjęcie decyzji związanych z formą budynku, a następnie z proponowanymi rozwiązaniami funkcjonalnymi, doбором materiałów wykończeniowych i decyzjami estetycznymi. Za pomocą sztucznej inteligencji (AI), każdy ze scenariuszy może zostać opracowany koncepcyjnie, ale rozwinięty wrażeniowo na cele prezentacji w sposób czytelny dla inwestorów czy innych uczestników procesu projektowo-budowlanego niedysponujących wiedzą specjalistyczną.

## BIBLIOGRAFIA

1. Amecke H. (2012): The impact of energy performance certificates: A survey of German home owners. *Energy Policy* 46, 4–14.
2. Bać A. (2020a): Wstęp, w: Architektura energoaktywna po 2021. Tom 1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
3. Bać A. (2020b): Architektura aktywna energetycznie, w: Architektura energoaktywna po 2021. Tom 1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
4. Bać A. (2020c): Architektura energoaktywna po 2021. Tom 2. Zagadnienia instalacyjno-projektowe, Politechnika Wroclawska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
5. Bać A. (2016): Zrównoważenie w architekturze. Od idei do realizacji na tle doświadczeń kanadyjskich. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
6. Bać A. (2014): Idea zrównoważenia i jej wybrane przejawy. *Architectus*.
7. Bać A., Michalski P. (2022): Zabudowa wielorodzinna blisko zeroenergetyczna–tendencje projektowe. *Śr. Mieszk.* 42–52.
8. Bahadori-Jahromi A., Salem R., Mylona A., Hasan A.U., Zhang H. (2022): The Effect of Occupants' Behaviour on the Building Performance Gap: UK Residential Case Studies. *Sustainability* 14, 1362.
9. Baranowski A. (1998): Projektowanie zrównoważone w architekturze. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
10. Barber D.A. (2014): Tomorrow's House: Solar Housing in 1940s America. *Technol. Cult.* 55, 1–39.
11. Barber D.A. (2008): Experimental Dwellings: Modern Architecture and Environmental Research at the MIT Solar Energy Fund 1938–1963. *History* 32, 561–584.
12. Barelkowski R. (2017): Complex Issues in Architectural Design. *Space Form* 2017, 47–62.
13. Bizzarri M., Conti P., Glicksman L.R., Schito E., Testi D. (2023): Radiant Floor Cooling Systems: A Critical Review of Modeling Methods. *Energies* 16, 6160.
14. Bochnia K. (2017): Budynki niemal zeroenergetyczne. *Builder* 237, 64–65.
15. Borkowski A.S., Maroń M. (2023): Zastosowanie cyfrowego bliźniaka w zarządzaniu obiektem użyteczności publicznej studium przypadku przedszkola w gminie Secemin. *Builder*.
16. Borkowski A.S., Michalak M. (2024): Błędy poznawcze i nowa emfatyczna definicja BIM. *Builder*.
17. Borkowski A.S., Michałkiewicz A. (2022): Technologia BIM w procesie realizacji inwestycji budowlanych: studia przypadków firmy SXD Polska. *Builder* R.26, nr 2.
18. Borkowski A.S., Osińska N., Szymańska N. (2022): Analizy energetyczne w modelach BIM 6D. *Mater. Bud.* 1.
19. Borowska J., Kulczewska S. (2016): Wpływ rodzaju paliwa na wartość wskaźnika energii pierwotnej w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych. *Tech. Issues* 3–8.
20. Brager G., Zhang H., Arens E. (2015): Evolving opportunities for providing thermal comfort. *Build. Res. Inf.* 43, 274–287.
21. Brager G.S., De Dear R.J. (1998): Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy Build.* 27, 83–96.
22. Brophy V., Lewis J.O. (2011): A Green Vitruvius: Principles and Practice of Sustainable Architectural Design, 2. red. Routledge, London.
23. Brounen D., Kok N. (2011): On the economics of energy labels in the housing market. *J. Environ. Econ. Manag.* 62, 166–179.
24. Brundtland G.H. (1987): Our Common Future- Call for Action. *Environ. Conserv.* 14, 291–294.
25. Butala V., Novak P. (1999): Energy consumption and potential energy savings in old school buildings. *Energy Build.* 29, 241–246.
26. Casals X.G. (2006): Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences. *Energy Build.* 38, 381–392.
27. Chen X., Yang H., Lu L. (2015): A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, 1425–1436.
28. Chou J.-S., Bui D.-K. (2014): Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design. *Energy Build.* 82, 437–446.
29. Chrapka R. (2010): Sposoby oddawania ciepła przez grzejniki.

30. Chruściel M.S. (2023): Świadectwo charakterystyki energetycznej budynku jako instrument prawa zapewniający energooszczędność budynków–analiza zmian w prawie polskim. *Prawne Probl. Gór. Ochr. Śr.* 1–20.
31. Criminale A., Langar S. (2017): Challenges with BIM implementation: a review of literature, w: 53rd ASC annual international conference proceedings. s. 329–335.
32. Cristino T.M., Neto A.F., Wurtz F., Delinchant B. (2022): The evolution of knowledge and trends within the building energy efficiency field of knowledge. *Energies* 15, 691.
33. Danielski I., Fröling M., Joelsson A. (2012): The impact of the shape factor on final energy demand in residential buildings in nordic climates, w: World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conference; Denver, CO; 13 May 2012 through 17 May 2012; Code 94564. s. 4260–4264.
34. De Wolf C., Ramage M., Ochsendorf J. (2016): Low carbon vaulted masonry structures. *J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct.* 57, 275–284.
35. Dopke J. (2010): Obliczanie liczby stopni odnośnika grzewczego według metody Eurostat. *Cent. Inf. O Rynku Energii*.
36. Dubisz S. (2003): Uniwersalny słownik języka polskiego. *No Title*.
37. Dulak L., Żuchowski R. (2013): Miejski Budynek Jutra 2030 – próba podwyższenia komfortu akustycznego w budynku wielorodzinnym. *Mater. Bud.* 48–51.
38. Eberle D., Hueber E., Feireiss K., Steiner D., Widerin P., Aicher F. (Red.) (2016): Die Temperatur der Architektur: be 2226 ; Portrait eines energieoptimierten Hauses = The temperature of architecture. Birkhäuser, Basel.
39. Erickson V.L., Lin Y., Kamthe A., Brahma R., Surana A., Cerpa A.E., Sohn M.D., Narayanan S. (2009): Energy efficient building environment control strategies using real-time occupancy measurements, w: Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, BuildSys '09. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, s. 19–24.
40. Fanger P.O. (1970): Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen.
41. Fedorowicz L., Pokorska-Silva I. (2016): Wspomaganie symulacją oceny energetycznej budynku. *Zesz. Nauk. Wyższej Szk. Tech. W Katowicach*.
42. Feist W., Ebel W. (1998): Low Electricity Houses- A Real Case: The Passive House in Darmstadt-Kranichstein, w: Nørgård, J.S., Gula, A., Almeida, A.T. (Red.), Development with Sustainable Use of Electricity. Springer Netherlands, Dordrecht, s. 187–204.
43. Felski B. (2019): Tradycyjna architektura gliniana jako narzędzie mitygacji zmian klimatycznych. Studium przypadku na podstawie historycznej zabudowy zagrodowej z połowy XIX w. *Przestrz. Ekon. Społecz.* 9–28.
44. Ferrara M., Sirombo E., Monti A., Fabrizio E., Filippi M. (2017): Influence of Envelope Design in the Optimization of the Energy Performance of a Multi-family Building. *Energy Procedia, 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, Italy* 111, 308–317.
45. Fidorów-Kaprawy N., Kostka M., Szulgowska-Zgrzywa M., Piechurski K. (2017): Koncepcja energetyczna budynku jako element budownictwa zrównoważonego. *Architectus* 115–130.
46. Fiedorenko N.P. (Red.) (1975): Słownik matematyki i cybernetyki ekonomicznej. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
47. Firląg S., Staniaszek D. (2015): Finansowanie poprawy efektywności energetycznej budynków w Polsce. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Warsaw.
48. Franke D., Kuczera A. (2024): ZRÓWNOWAŻONE CERTYFIKOWANE BUDYNKI. PLGBC, Gliwice.
49. Fuerst F., McAllister P., Nanda A., Wyatt P. (2015): Does energy efficiency matter to home-buyers? An investigation of EPC ratings and transaction prices in England. *Energy Econ.* 48, 145–156.
50. Furtak M., Fedorczyk-Cisak M., Różańska B., Bocheński P., Gintowt J. (2021): Certyfikacja budynków energooszczędnych. *Przegląd Bud.* 92.
51. Gebczyk O. (2008): Analiza porównawcza budynków tradycyjnych i pasywnych. *Przegląd Nauk. Inż. Kształt. Śr.* 17.

52. Gillingham K., Newell R.G., Palmer K. (2009): Energy Efficiency Economics and Policy. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 1, 597–620.
53. Glück B. (1993): Sensed temperature and its measurability. Empfindungstemperatur und ihre Messbarkeit. *Gesundh.-Ing. Haustechn.-Bauphys.-Umwelttech.* 114.
54. Glück B., Windisch K. (1982): Strahlungsheizung, Theorie und Praxis. Müller, Karlsruhe.
55. Górka A. (2002): Zrównoważone formy funkcjonowania miasta i jego otoczenia (przegląd współczesnych koncepcji). *Archit. Kraj.* 1, 36–46.
56. Górka A. (2000): Ścienne grzejniki hypokaustyczne dla budynków o niskim zużyciu energii. POLITECHNIKA POZNAŃSKA WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, ARCHITEKTURY I INŻYNIERII ŚRODOWISKA INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA, Poznań.
57. Górski J., Klimowicz J. (2018): Kształtowanie architektury proekologicznej–budownictwo z surowej ziemi. Realizacja i eksploatacja doświadczalnego budynku w Parku Ekologicznym w Pasłęku. *Śr. Mieszk.* 54–62.
58. Górski J., Klimowicz J., Nowak A. (2020): Application of Pro-Ecological Building Technologies in Contemporary Architecture, w: XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020).
59. Guyon G. (1997): Role of the model user in results obtained from simulation software program, w: Proceedings of the 5th International IBPSA conference, Prague, Czech Republic. s. 377–384.
60. Gzell S. (2015): Europejskie miasto potrzebuje pomocy. *Wiad. Konserw.* 33–43.
61. Hamdi M., Lachiver G., Michaud F. (1999): A new predictive thermal sensation index of human response. *Energy Build.* 29, 167–178.
62. Hausladen G., Saldanha M. de, Liedl P. (2008): ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy, ClimateSkin. Birkhäuser.
63. Heisel F., Hebel D.E. (2022): Building Better-Less-Different: Circular Construction and Circular Economy: Fundamentals, Case Studies, Strategies. De Gruyter.
64. Holloway D. (2021): Sun Tempered Architecture. A Simple Design Methodology for Passive Solar Houses [WWW Document]. URL <http://www.dennishollowayarchitect.com/SimpleDesignMethodology.html> (dostęp 8.17.22).
65. Imam S., Coley D.A., Walker I. (2017): The building performance gap: Are modellers literate? *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 38, 351–375.
66. Ionescu C., Baracu T., Vlad G.-E., Necula H., Badea A. (2015): The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 243–253.
67. Jadwiszczak P. (2013): Standard energetyczny NF15 i NF40 oraz dopłaty do budownictwa energooszczędnego. *Rynek Instal.* 29–34.
68. Jagiełło-Kowalczyk M. (2017): Zintegrowane projektowanie zrównoważone. *Śr. Mieszk.* nr 19.
69. Jagiełło-Kowalczyk M. (2010): Zdrowie środowiskowe a zrównoważone środowisko mieszkaniowe. *Przestrz. Forma* 89–98.
70. Jamróży M. (2021): Wpływ metodyki BIM na kształtowanie architektury w zintegrowanym procesie projektowym. Politechnika Krakowska Wydział Architektury, Kraków.
71. Janota-Bzowski J. (2015): Klasyczne projektowanie a modelowanie budynku. *Rynek Instal.* 24–25.
72. Jevremovic L., Turnsek B.A., Vasic M., Jordanovic M. (2015): Passive design applications-industrial architecture perspective. *Facta Univ. Ser. Archit. Civ. Eng.* 173–182.
73. Juchimiuk J. (2019): Wpływ odnawialnych źródeł energii na architekturę wybranych obiektów w Polsce po roku 2004. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin.
74. Jung D.K., Lee D.H., Shin J.H., Song B.H., Park S.H. (2013): Optimization of Energy Consumption Using BIM-Based Building Energy Performance Analysis. *Appl. Mech. Mater.* 281, 649–652.
75. Kaczmarzyk M. (2017): Wpływ współczynnika kształtu A/V na wielkość strat ciepła w budynku w świetle rosnących wymogów dotyczących izolacyjności termicznej przegród budowlanych. *Czas. Inż. Łąkowej Śr. Archit. J. Civ. Eng. Environ. Archit.* z. 64, nr 2/II.
76. Kajewska-Szkudlarek J., Stańczyk J., Domańska M. (2024): Modelowanie zużycia energii na cele c.o. i c.w. w budynkach wielorodzinnych na tle sytuacji meteorologicznej we Wrocławiu. *Instal.*
77. Karimi H., Adibhesami M.A., Bazazzadeh H., Movafagh S. (2023): Green Buildings: Human-Centered and Energy Efficiency Optimization Strategies. *Energies* 16, 3681.

78. Kasperkiewicz K. (2007): Zużycie energii w sektorze budowlanym—teraźniejszość i przyszłość. *Izolacje* 12, 26–31.
79. Kasznia D., Magiera J., Wierzowiecki P. (2017): BIM w praktyce: standardy, wdrożenie, case study, Wydanie 1. red. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
80. Kęskiewicz P. (2020): Podstawy instalacyjnych rozwiązań energoaktywnych, w: Bać, A. (Red.), *Architektura energoaktywna po 2021. Tom 2. Zagadnienia instalacyjno-projektowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
81. Kim Y.K., Bande L., Tabet Aoul K.A., Altan H. (2021): Dynamic Energy Performance Gap Analysis of a University Building: Case Studies at UAE University Campus, UAE. *Sustainability* 13, 120.
82. Klimowicz J. (2018): Chosen case studies of nZeb retrofit buildings, w: *Design Solutions for nZEB Retrofit Buildings*. IGI Global, s. 209–227.
83. Kok N., Jennen M. (2012): The impact of energy labels and accessibility on office rents. *Energy Policy* 46, 489–497.
84. Kolarevic B., Malkawi A. (Red.) (2004): *Performative Architecture*. Routledge, London.
85. Kolb D.A., Fry R.E. (1975): Towards an applied theory of experiential learning, w: Cooper, C.L. (Red.), *Theories of group processes*, Wiley series on individuals, groups, and organizations. Wiley, London ; New York, s. 33–58.
86. Komorowska A., Mirowski T. (2016): Instrumenty poprawy efektywności energetycznej w Polsce. *Zesz. Nauk. Inst. Gospod. Surowcami Miner. Energii PAN* nr 92.
87. Kopaliński W. (1994): Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych z almanachem. *No Title*.
88. Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030 (2024).
89. Kronenberg J., Bergier T., Sendzimira F. (2010): Wyzwania zrównoważonego rozwoju w Polsce. Fundacja Sendzimira.
90. Kuczera A. (2020): CERTYFIKACJA ZIELONYCH BUDYNKÓW W LICZBACH. PLGBC, Gliwice.
91. Kuczyński T., Ziembicki P., Misztal G., Benysek G. (2011): Komputerowa symulacja energetyczna budynków. *Przegląd Bud.* 82, 42–46.
92. Kurtz K. (2012): Projektowanie budynków niskoenergetycznych. *Izolacje* 17, 16–21.
93. Kwapisz H. (2020): Polityka energetyczna w Polsce i Unii Europejskiej, w: Bać, A. (Red.), *Architektura energoaktywna po 2021. Tom 1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
94. Kwiatkowski J., Rucińska J. (2020): Estimation of Energy Efficiency Class Limits for Multi-Family Residential Buildings in Poland. *Energies* 13, 6234.
95. La Roche P., Milne M. (2004): Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller. *Sol. Energy, The American Solar Energy Society's Solar 2003 Special Issue* 77, 421–434.
96. Laskowski L. (2008): Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
97. Laustsen J. (2008): Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. IEA Information Paper.
98. Leutgöb K. (2013): Introduction to Integrated Design (ID).
99. Li X., Wen J. (2014): Review of building energy modeling for control and operation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 517–537.
100. Lis A. (2016): Ocena komfortu cieplnego osób w budynkach mieszkalnych na podstawie wskaźników PMV i PPD. *Zesz. Nauk. Politech. Częstochowskiej Bud.* 213–222.
101. Lis A. (2007): Ocena wskaźników komfortu cieplnego ludzi w pomieszczeniach. *Fiz. Budowli W Teor. Prakt.* T. 2, 189–194.
102. Lis A., Lis P. (2018): Ograniczanie zużycia energii do ogrzewania budynków mieszkalnych. *Bud. O Z optymalizowanym Potencjale Energ.* 7.
103. Lovins A.B. (1977): Soft energy paths: Toward a durable peace.
104. Maglad A.M., Houda M., Alrowais R., Khan A.M., Jameel M., Rehman S.K.U., Khan H., Javed M.F., Rehman M.F. (2023): Bim-based energy analysis and optimization using insight 360 (case study). *Case Stud. Constr. Mater.* 18, e01755.

105. Mahato N., Ansari M.O., Cho M.H. (2015): Production of utilizable energy from renewable resources: Mechanism, machinery and effect on environment. *Adv. Mater. Res.* 1116, 1–32.
106. Majerska-Paľubicka B. (2014): Dążenie do optymalizacji metod zrównoważonego projektowania architektonicznego.
107. Majerska-Paľubicka B. (2013): Świadome kreowanie zrównoważonej architektury, w: Kasperski, J., Bać, A. (Red.), Kierunki rozwoju budownictwa energooszczędnego i wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenie Dolnego Śląska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
108. Marchwiński J., Zielonko-Jung K. (2014): Współczesna architektura proekologiczna. Wydawnictwo Naukowe PWN.
109. Marincu C., Dan D., Moga L. (2024): Investigating the influence of building shape and insulation thickness on energy efficiency of buildings. *Energy Sustain. Dev.* 79, 101384.
110. Markiewicz P. (2016): Zintegrowane projektowanie energetyczne budynków energooszczędnych. *Czas. Inż. Łódzkiej Śr. Archit. Civ. Eng. Environ. Archit.* 271–278.
111. Marks W. (1997): Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Build. Environ.* 32, 331–339.
112. Mehta C. (2021): A Case Study in Actual Building Performance and Energy Modeling with Real Weather Data (thesis). Toronto Metropolitan University.
113. Michalski P. (2019): Cechy budynków wielorodzinnych blisko zeroenergetycznych. Politechnika Wrocławska Wydział Architektury, Wrocław.
114. Mostafavi N., Farzinmoghadam M., Hoque S. (2015): Envelope retrofit analysis using eQUEST, IESVE Revit Plug-in and Green Building Studio: a university dormitory case study. *Int. J. Sustain. Energy* 34, 594–613.
115. Murphy L. (2014): The influence of the Energy Performance Certificate: The Dutch case. *Energy Policy* 67, 664–672.
116. Naamane A., Boukara A. (2015): A Brief Introduction to Building Information Modeling (BIM) and its interoperability with TRNSYS. *Renew. Energy Sustain. Dev.* 1, 126–130.
117. Nazar K., Kozłowski S. (1984): Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. Państw. Zakład Wydawnictw Lekarskich.
118. Nicol J.F., Humphreys M. (1998): Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Trans.* 104, 991–1004.
119. Nikolopoulou M., Steemers K. (2003): Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy Build.* 35, 95–101.
120. Nowak K., Nowak-Dzieszko K. (2014): Wpływ szczelności budynków na ich bilans energetyczny. *Mater. Bud.* 24–26.
121. Nowak Ł. (2020): Wpływ obudowy budynku na jego charakterystykę energetyczną, w: Bać, A. (Red.), Architektura energoaktywna po 2021. Tom 1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
122. Oldewurtel F., Parisio A., Jones C.N., Gyalistras D., Gwerder M., Stauch V., Lehmann B., Morari M. (2012): Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy Build.* 45, 15–27.
123. Oldewurtel F., Parisio A., Jones C.N., Morari M., Gyalistras D., Gwerder M., Stauch V., Lehmann B., Wirth K. (2010): Energy efficient building climate control using Stochastic Model Predictive Control and weather predictions, w: Proceedings of the 2010 American Control Conference. Zaprezentowano na Proceedings of the 2010 American Control Conference, s. 5100–5105.
124. Olesen B.W., Parsons K.C. (2002): Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy Build.* 34, 537–548.
125. Østergård T., Maagaard S.E., Maagaard S.E. (2019): Energy labels and energy efficient properties Methods for identification and definition of energy efficient properties in Denmark.
126. Pacheco R., Ordóñez J., Martínez G. (2012): Energy efficient design of building: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3559–3573.
127. Palczewski J. (2018): Optymalizacja II.
128. Pallado J. (2016): Zabudowa wielorodzinna: podstawy projektowania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.



129. Parasonis J., Keizikas A., Kalibatiene D. (2012): The relationship between the shape of a building and its energy performance. *Archit. Eng. Des. Manag.* 8, 246–256.
130. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. (2008): A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* 40, 394–398.
131. PHI (2023): Criteria for Buildings.
132. Plutecki Z. (2011): Wieloparametryczna ocena warunków komfortu cieplnego. *Pomiary Autom. Kontrola* 57, 153–156.
133. Pogorzelski J. (2007): Kto się boi wdrożenia w Polsce Dyrektywy 2002/91/WE? *Mater. Bud.* nr 1, 4–5.
134. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. (2021).
135. Prindle B. (2007): The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy Technology and Policy 53.
136. Promińska M. (2023): Zdrowa urbanistyka: nowy standard planowania przestrzennego, Wydanie I. red. PWN, Warszawa.
137. Promińska M. (2021): Zdrowa architektura: nowy standard budownictwa zrównoważonego, Wydanie I. red. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
138. PWN (Red.) (2001): Wielka encyklopedia PWN, Wyd. 1. red. Wydawn. Nauk. PWN, Warszawa.
139. Rogoża A. (2014): Wpływ zmian w dokumentacji na proces inwestycyjny. *Przegląd Bud.* 85.
140. Rosicki R. (2010): Chiny i Indie a bezpieczeństwo energetyczne Europy. *Przegląd Bezpieczeństwa Wewnętrznego* 113–120.
141. Rucińska J., Kwiatkowski J., Wiszniewski A. (2019): Określenie referencyjnego standardu energetycznego budynków wielorodzinnych do wyznaczania ich klasy energetycznej. *Mater. Bud.* 1.
142. Rynska E., Klimowicz J., Kowal S., Lyzwa K., Pierzchalski M., Rekosz W. (2020): Smart Energy Solutions as an Indispensable Multi-Criteria Input for a Coherent Urban Planning and Building Design Process—Two Case Studies for Smart Office Buildings in Warsaw Downtown Area. *Energies* 13, 3757.
143. Ryńska E.D. (2017): Budynek na plusie. *Builder* 21, 54–56.
144. Ryńska E.D. (2001): Bioklimatyka a forma architektoniczna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
145. Sadowska B. (2015): Wskaźniki EU, EK, EP a jakość (klasa) energetyczna budynków. *Bud. Inż. Śr.* 6, 25–29.
146. Salehabadi Z.M., Ruparathna R. (2022): User-centric sustainability assessment of single family detached homes (SFDH): A BIM-based methodological framework. *J. Build. Eng.* 50, 104139.
147. SARP (2014): Zasady wyceny prac projektowych SARP. *Uchwała Nr 70*.
148. Schoeman R.C., Gunter A.W. (2018): Greenwashing: exploring the role of green building rating agencies on the building industry, the case of johannesburg. *South Afr. Geogr.* 1, 345.
149. Sikorski M. (2018): Kształtowanie domów energooszczędnych z zastosowaniem strategii pasywnych w klimacie umiarkowanym ciepłym. Politechnika Wrocławska Wydział Architektury, Wrocław.
150. Simó Miñana J. (2024): Identifying greenwashing in sustainability certificates and architecture solutions (B.S. thesis). Universitat Politècnica de Catalunya.
151. Słyk J. (2015): Design methodology and rules of cooperation in the digital environment : augmented space as a field of research and alternative environment for architectural creation. *Badania Interdyscyplinarne W Archit. BIWA 1 Monogr. Konf. T 3 Badania Przedprojektowe Okołoprojektowe W Kształt. Śr. Zbudowanego Red Beata Komar Joanna Biedrońska Anna Szewczenko Wyzd. Archit. Politech. Śląskiej Gliw. 2015*.
152. Sowa J., Narowski P.G., Rubik M., Ziętek P. (2017): Budynki o niemal zerowym zużyciu energii. null, Warszawa.
153. Stangel M. (2013): Kształtowanie współczesnych obszarów miejskich w kontekście zrównoważonego rozwoju. ISBN 978-83-7880-140-5.
154. Steemers K. (2003): Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy Build.* 35, 3–14.
155. Sudół-Szopińska I., Chojnacka A. (2007): Określanie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD. *Bezp. Pr. Nauka Prakt.* 19–23.

156. Szczechowiak E. (2022): Wpływ głównych komponentów w budynkach na obniżenie emisji ditlenku węgla. *Przegląd Bud.* 93, 151–159.
157. Szczechowiak E. (2015): Parametry budynków niemal zero-energetycznych w warunkach polskich. *POLITYKA PAŃSTWA Kierun. Rozw. BUDOWNICTWA ENERGOOSZCZĘDNEGO* 57.
158. Szczerbowski R. (2014): Modelowanie systemów energetycznych – charakterystyka wybranych modeli. *Polityka Energ.* T. 17, z. 3.
159. Śliwowski L. (1999): Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
160. Trząski A. (2021): Wymagania energetyczne dla budynków wielorodzinnych, a rozwiązania konwencjonalne. *Rynek Instal.*
161. Tverberg G. (2012): World Energy Consumption Since 1820 in Charts [WWW Document]. *Our Finite World*. URL <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/> (dostęp 9.12.23).
162. Wang B., Malkawi A. (2019): Design-based natural ventilation evaluation in early stage for high performance buildings. *Sustain. Cities Soc.* 45, 25–37.
163. Wang D., Pang X., Wang W., Qi Z., Ji Y., Yin R. (2020): Evaluation of the dynamic energy performance gap of green buildings: Case studies in China. *Build. Simul.* 13, 1191–1204.
164. Wehle-Strzelecka S., Korczyńska A. (2007): Ochrona środowiska w kształtowaniu współczesnej przestrzeni miejskiej w aspekcie idei ekologii miasta.
165. Wilkinson P., Smith K.R., Beevers S., Tonne C., Oreszczyn T. (2007): Energy, energy efficiency, and the built environment. *The Lancet* 370, 1175–1187.
166. Witczak K. (2020): Efektywność energetyczna i ekonomiczna budynków, w: Bać, A. (Red.), *Architektura energoaktywna po 2021. Tom 2. Zagadnienia instalacyjno-projektowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
167. Wodo M. (2015): Międzynarodowe systemy certyfikacji LEED, BREEAM i DGNB. Wstępna analiza porównawcza poparta studium przypadku. *J. Civ. Eng. Environ. Archit.* XXXII, 311–322.
168. Yin R.K. (1994): Discovering the Future of the Case Study. Method in Evaluation Research. *Eval. Pract.* 15, 283–290.
169. Zielonko-Jung K. (2020): Rola architektury w energetyce budynku, w: Bać, A. (Red.), *Architektura energoaktywna po 2021. Tom 1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 41–52.
170. Zielonko-Jung K. (2013): Kształtowanie przestrzenne architektury ekologicznej w strukturze miasta. *Pr. Nauk. Politech. Warsz. Ser. Archit.* 5–136.
171. Zuziak Z. (2007): Ekologiczne definiowanie urbanistyki. *Czas. Tech. Archit.* 104, 9–20.
172. Żurawski J. (2013): Efektywność energetyczna w budownictwie.
173. Żurawski J. (2009): Certyfikacja po polsku. *Izolacje* 14, 30–33.

## AKTY PRAWNE I NORMY

1. Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (2002): , DD.
2. Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz uchylająca dyrektywę Rady 93/76/EWG (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2006): , OJ L.
3. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywę 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2009): , OJ L.
4. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią (przekształcenie) (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2009): , OJ L.
5. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2018): , OJ L.

6. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2002 z dnia 11 grudnia 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej (Tekst mający znaczenie dla EOG.) (2018): , OJ L.
7. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona) (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2024).
8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (przekształcenie) (2010): , OJ L.
9. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, zmiany dyrektyw 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylecia dyrektyw 2004/8/WE i 2006/32/WE Tekst mający znaczenie dla EOG (2012): , OJ L.
10. Komisja Europejska (2019): KOMUNIKAT KOMISJI DO PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO, RADY EUROPEJSKIEJ, RADY, KOMITETU EKONOMICZNO-SPOŁECZNEGO I KOMITETU REGIONÓW Europejski Zielony Ład.
11. PN-B-03421:1978 Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi (1978).
12. PN-EN 12831:2017 Charakterystyka energetyczna budynków. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego (2017).
13. PN-EN ISO 6946:2017-10 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metody obliczania (2017).
14. PN-EN ISO 7730:2006 Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego (2006).
15. 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 (2013).
16. PN-EN ISO 52003-1:2017 Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Wskaźniki, wymagania, ocena i certyfikacja (2017).
17. PN-EN ISO 52016-1:2017 Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne. (2017).
18. PN-ISO 9836:2022-07 Właściwości użytkowe w budownictwie. Określanie i obliczanie wskaźników powierzchniowych i kubaturowych (2022).
19. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (2015).
20. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (2002).
21. Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 28 marca 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (2023).
22. Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 11 września 2020 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego (2020).
23. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r.- Prawo budowlane. (1994).
24. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (2016).
25. Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (2014).

## RAPORTY I BAZY DANYCH

1. ASHRAE (Red.) (2016): Standard 55-2013 user's manual: ANSI/ASHRAE standard 55-2013, thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Research, Atlanta, GA.

2. Eurostat (2022): Energy consumption in households [WWW Document]. URL [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households) (dostęp 8.17.22).
3. GUS (2024a): Efekty działalności budowlanej w 2023 roku.
4. GUS (2024b): Warunki mieszkaniowe w Polsce w świetle wyników Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań 2021.
5. GUS (2024c): Efektywność wykorzystania energii w latach 2012-2022.
6. GUS (2024d): Budownictwo w 1 kwartale 2024.
7. GUS (2022): Efektywność wykorzystania energii w latach 2010-2020.
8. IEA (2023a): Space cooling. IEA, Paris.
9. IEA (2023b): Tracking Clean Energy Progress 2023. IEA, Paris.
10. IEA (2022a): Residential behaviour changes lead to a reduction in heating and cooling energy use by 2030. IEA, Paris.
11. IEA (2022b): All countries targeted for zero-carbon-ready codes for new buildings by 2030. Paris.
12. IEA (2019a): Global Status Report for Buildings and Construction 2019. Paris.
13. IEA (2019b): The Critical Role of Buildings. IEA, Paris.
14. IEA (2018): Energy Efficiency 2018. Paris.
15. U.S. Department of Energy (2015): A common definition for zero energy buildings. US Department of Energy (USDOE), Washington DC (United States); National ....
16. U.S. Energy Information Administration (2023): Annual Energy Outlook 2023 [WWW Document]. URL <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/index.php> (dostęp 9.27.24).
17. United Nations (2016): The New Urban Agenda.
18. United Nations (2015a): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Department of Public Information, United Nations, New York, NY.
19. United Nations (2015b): Paris Agreement. UN Climate Change Conference (COP21) in Paris, Paris.
20. United Nations (2012): The future we want- Outcome document of the United Nations Conference on Sustainable Development. RIO +20 United Nations Conference on Sustainable Development, Rio de Janeiro.
21. United Nations (1992): Agenda 21: Programme of action for sustainable development ; Rio declaration on environment and development ; statement of forest principles ; the final text of agreements negotiated by governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 3- 14 June 1992, Rio de Janeiro, Brazil. Department of Public Information, United Nations, New York, NY.
22. United Nations Environment Programme (2021): 2021 Global Status Report for Buildings and Construction.

## SPIS ILUSTRACJI

Ilustracja 1. Schemat cyklu Kolba (reflective practice) .....	11
Ilustracja 2. Schemat pracy doktorskiej.....	12
Ilustracja 3. Światowe zużycie energii [PJ].....	15
Ilustracja 4. Tempo wzrostu światowego zużycia energii i zmiany populacji. ....	16
Ilustracja 5. Zużycie energii [PJ] i zmiana populacji w Polsce i na świecie w stosunku do 1990.....	17
Ilustracja 6. Globalne zużycie energii w budynkach na tle innych sektorów w 2022 roku.....	17
Ilustracja 7. Zużycie energii w budynkach mieszkalnych w Polsce, krajach członkowskich Międzynarodowej Agencji Energetycznej oraz globalnie.....	18
Ilustracja 8. Światowe zużycie energii według źródła.....	19
Ilustracja 9. Światowe zużycie energii na mieszkańca, obliczone przez podzielenie światowego zużycia energii zobrazowanego na ilustracji 9 przez szacunkową liczbę ludności. ....	20
Ilustracja 10. Cena baryłki ropy naftowej w dolarach od 1861.....	21
Ilustracja 11 Heliocaminus – pomieszczenie akumulujące ciepło słoneczne.....	24

Ilustracja 12 Schemat działania antycznego budynku solarnego- tzw. Domu Sokratesa.....	24
Ilustracja 13 Przewidywany procent niezadowolonych PPD w funkcji przewidywanej oceny średniej komfortu cieplnego PMV. ....	27
Ilustracja 14. Stosowanie regulacji formalno-prawnych dotyczących optymalizacji energetycznej w państwach świata. ....	32
Ilustracja 15. Kryteria charakterystyki energetycznej budynku. ....	37
Ilustracja 16 Średnia liczba stopniodni grzania w Unii Europejskiej w latach 1990-2023. ....	38
Ilustracja 17 Ilość stopniodni grzania w Polsce w latach 1990-2023. ....	39
Ilustracja 18. Obliczeniowe temperatury zewnętrzne przyjmowane w Polsce. ....	39
Ilustracja 19. Granice bilansowania energii. ....	42
Ilustracja 20. Zależności pomiędzy energią pierwotną (EP), końcową (EK) i użytkową (EU) ....	43
Ilustracja 21. Liczba budynków oddanych do użytku w 2023 roku [tys]. ....	53
Ilustracja 22. Powierzchnia budynków oddanych do użytku w 2023 roku [mln m <sup>2</sup> ]. ....	53
Ilustracja 23. Mieszkania oddane do użytku w 2023 wg formy budownictwa. ....	54
Ilustracja 24. Polski zasób mieszkaniowy wg roku budowy. ....	54
Ilustracja 25. EP- struktura zapotrzebowania. ....	56
Ilustracja 26. Porównanie zużycia energii na poszczególne cele (EK). ....	56
Ilustracja 27. Schemat struktury tradycyjnego procesu budowlano-inwestycyjnego. ....	61
Ilustracja 28. Projektowanie zintegrowane. ....	62
Ilustracja 29. Uproszczona bryła badanego budynku wielorodzinnego przeznaczonego na mieszkania socjalne. ....	74
Ilustracja 30 Budynek BelVista we Frankfurcie. ....	78
Ilustracja 31 Budynek Woodcube w Hamburgu ....	78
Ilustracja 32 Budynek ECO Silver House. ....	79
Ilustracja 33 Budynek Villa Nova. ....	79
Ilustracja 34 Budynek terasse 9 w Nanterre. ....	79
Ilustracja 35 Budynek Share Home Silesia w Katowicach. ....	79
Ilustracja 36 Budynek Campagne House B. ....	79
Ilustracja 37 Budynek Greenhouse w Salford. ....	79
Ilustracja 38. Mapa Europy z oznaczoną średnią temperaturą roczną w 2023 i lokalizacją analizowanych przypadków. ....	80
Ilustracja 39. BelVista ....	81
Ilustracja 40. Woodcube ....	81
Ilustracja 41. ECO Silver House. ....	81
Ilustracja 42. Villa Nova ....	81
Ilustracja 43. Terrasse 9. ....	82
Ilustracja 44. Share Home Silesia ....	82
Ilustracja 45. Campagne House B. ....	82
Ilustracja 46. Greenhaus ....	82
Ilustracja 47. Liczba kondygnacji nadziemnych w analizowanych studiach przypadków. ....	83
Ilustracja 48. Liczba mieszkań w analizowanych studiach przypadków. ....	83
Ilustracja 49. Odchylenie budynku. ....	84
Ilustracja 50. Orientacja (odchylenie od osi N-S i W-E) w analizowanych studiach przypadków. ....	85
Ilustracja 51 Powierzchnia całkowita (PC) oraz liczba mieszkań w analizowanych studiach przypadków. ....	86
Ilustracja 52 Zwartość A/V w analizowanych studiach przypadków. ....	86
Ilustracja 53 Proporcje elewacji w analizowanych studiach przypadków. ....	87
Ilustracja 54. Udział szklenia na elewacjach (WWR) w analizowanych studiach przypadków. ....	88
Ilustracja 55. Współczynnik przenikania U w analizowanych studiach przypadków. ....	90

Ilustracja 56. Szczelność w analizowanych studiach przypadków. ....	91
Ilustracja 57. Zapotrzebowanie na EU [kWh/m <sup>2</sup> rok] w analizowanych studiach przypadków. ....	91
Ilustracja 58 Pierwsza Dzielnica w Katowicach, podział na etapy .....	106
Ilustracja 59 Budynek – podstawa modelu bazowego .....	107
Ilustracja 60. Udział w rocznym zapotrzebowaniu na EU dla modelu bazowego. ....	109
Ilustracja 61. Udział strat energii przez przenikanie. ....	109
Ilustracja 62 Model bazowy .....	115
Ilustracja 63 Scenariusz 4 .....	115
Ilustracja 64 Scenariusz 5 .....	116
Ilustracja 65 Scenariusz 6 .....	116
Ilustracja 66. Wpływ zmiany WWR na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	117
Ilustracja 67. Wpływ zmiany współczynnika U na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	118
Ilustracja 68. Wartości współczynnika EU uzyskane w przeprowadzonych symulacjach. ....	120
Ilustracja 69 Pierwsza Dzielnica w Katowicach, podział na etapy .....	121
Ilustracja 70. Schemat przepływu informacji na poszczególnych etapach tradycyjnego procesu projektowego. ....	124
Ilustracja 71. Proponowana modyfikacja schemat przepływu informacji na poszczególnych etapach procesu projektowego.....	125

## SPIS ZDJĘĆ

Zdjęcie 1 Rzymski system centralnego ogrzewania – Hypocaustum w termach Konstantyna. Autor: Jerry Everard. ....	22
Zdjęcie 2. Pierwszy dom w USA ogrzewany energią słoneczną- MIT Solar House 1 (1939). ....	25
Zdjęcie 3. Dom przyszłości (House of Tomorrow) projektu G.F. Kecka .....	25
Zdjęcie 4. "Pierwszy dom pasywny" w Darmstadt-Kranichstein, Niemcy.....	26
Zdjęcie 5. Heliotrope- budynek podążający za słońcem. Proj. Rolf Disch.....	26
Zdjęcie 6. Budynek 2226, Lustenau, projektu pracowni Baumshlager Eberle. ....	69

## SPIS TABEL

Tabela 1. Skala zmienności komfortu cieplnego (PMV). ....	27
Tabela 2. Wartości oporów cieplnych typowych zestawów odzieży. ....	30
Tabela 3. Wskaźnik energii pierwotnej według standardów certyfikacji PHI. ....	40
Tabela 4. Częstkowe wartości wskaźnika zapotrzebowania energii pierwotnej (EP) na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej.....	41
Tabela 5. Zestawienie maksymalnego współczynnika przenikania ciepła dla wybranych przegród budowlanych na przestrzeni lat. ....	44
Tabela 6. Wartości współczynnika U określone w WT. ....	45
Tabela 7. Metody prezentacji wydajności energetycznej w Państwach Unii Europejskiej. ....	46
Tabela 8. Proponowane klasy energetyczne w Polsce dla budynków jednorodzinnych i wielorodzinnych. ....	49
Tabela 9. Klasy energetyczne określone w oparciu o wartości referencyjne wg wymogów prawnych i wg zasobu budowlanego.....	50
Tabela 10. Klasy energetyczne budynku.....	51
Tabela 11. Zestawienie wyników obliczeń na zapotrzebowanie na EK dla różnie zlokalizowanych mieszkań i całego budynku. ....	52

Tabela 12. Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych wg kierunków użytkowania [%]. ...	55
Tabela 13. Zapotrzebowanie energetyczne dla budynku spełniającego szczegółowe wymagania WT 2021. ....	55
Tabela 14. Zalecenia dotyczące proporcji powierzchni przeszklonych do pełnych. ....	58
Tabela 15. Podział metod optymalizacyjnych na obszary tematyczne powiązane z branżami wiodącymi wraz z oszacowaniem wymaganego stopnia uszczegółowienia projektu dla metod, gdzie wiodącą branżą jest architektura. ....	59
Tabela 16. Zestawienie kosztów wynikających z zaadaptowania projektowania zintegrowanego. ....	62
Tabela 17. Wartości EU, EK, EP osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy. ....	72
Tabela 18. Wartości Q max, Q min, Q osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy. ....	73
Tabela 19. Wartości współczynnika EU do ogrzewania [kWh/m <sup>2</sup> rok] osiągnięte w wyniku badania poszczególnych scenariuszy. ....	77
Tabela 20. Podstawowe informacje charakterystyczne dotyczące szczegółowych przypadków poddanych analizie. ....	78
Tabela 21. Aksonometrie szczegółowo analizowanych studiów przypadków, dla których wykonano uproszczone modele BIM. Oznaczono orientację względem stron świata. W prawym dolnym rogu opisano skalę rysunku. ....	81
Tabela 22. Odniesienie schematu badawczego do metod optymalizacyjnych w praktyce architektonicznej (tabela 15) ....	82
Tabela 23. Typologia przestrzenna analizowanych studiów przypadków w odniesieniu do kategoryzacji J. Pallado. ....	84
Tabela 24. Uzyskane wyniki badań zestawione z zaleceniami dotyczącymi proporcji powierzchni przeszklonych do pełnych wg. Zielonko-Jung (tabela 14). ....	89
Tabela 25. Zestawienie wymagań WT, NF15 i wyników badań U [W/m <sup>2</sup> K]. ....	90
Tabela 26. Źródła ciepła i sposób dystrybucji ciepła we wnętrzach analizowanych studiów przypadków. ....	92
Tabela 27. Sposób wentylacji oraz uzyskiwania ciepłej wody użytkowej w analizowanych studiach przypadków. ....	92
Tabela 28. Zakres wybranych parametrów budynków zoptymalizowanych energetycznie. ....	102
Tabela 29. Zakres badanych parametrów określony na tle wcześniejszych badań. ....	105
Tabela 30. Zestawienie parametrów modelu bazowego z zakresem z parametrów określonych w case studies. ....	110
Tabela 31. Zestawienie parametrów poszczególnych badanych scenariuszy. ....	111
Tabela 32. Zestawienie parametrów poszczególnych badanych scenariuszy. ....	113
Tabela 33. Wpływ zmiany orientacji na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	115
Tabela 34. Aksonometrie bazowego modelu BIM i modeli powstałych wskutek wdrożenia scenariuszy 4, 5 i 6. Oznaczono orientację względem stron świata. W prawym dolnym rogu opisano skalę rysunku. ....	115
Tabela 35. Wpływ zmiany formy na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	116
Tabela 36. Wpływ zmiany WWR na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	117
Tabela 37. Wpływ zmiany współczynnika U na stosunek wskaźnika EU w stosunku do modelu bazowego. ....	118
Tabela 38. Wartości współczynnika EU uzyskane w przeprowadzonych symulacjach. ....	119

## STRESZCZENIE

Tematem pracy doktorskiej jest zbadanie zagadnienia optymalizacji efektywności energetycznej budynków w procesie projektowym. Pomimo wysokiego poziomu wiedzy dotyczącego budownictwa energooszczędnego, publikacje odnoszące się do samego procesu projektowego, zadań, kompetencji i możliwości w zakresie optymalizacji efektywności energetycznej budynków, są niedostateczne, a transfer wiedzy teoretycznej do praktyki architektonicznej jest ograniczony. Dysertacja pisana jest w trybie doktoratu wdrożeniowego i stanowi zapis badań i analiz powiązanych z projektowaniem budynków mieszkaniowych wielorodzinnych. W pracy usystematyzowano wiedzę dotyczącą optymalizacji efektywności energetycznej oraz jej metod w praktyce architektonicznej. Zbadano zasadność użycia oprogramowania BIM w celu ograniczania energochłonności budynków i w oparciu o tą technologię zaproponowano metodologię optymalizacji efektywności energetycznej na początkowych fazach procesu projektowo-budowlanego. Przeprowadzono także badania przypadków budynków poddanych optymalizacji energetycznej, w celu określenia zakresów parametrów w ramach charakterystycznych cech budynku, w oparciu o badania literatury. Na tej podstawie stworzono scenariusze optymalizacji, które następnie zostały zastosowane w stosunku do modelu bazowego, opracowanego na podstawie cyfrowego bliźniaka istniejącego obiektu. Wykonane badania potwierdziły słuszność postawionych tez. Zagadnienie omówiono w kontekście projektowania zintegrowanego. Wyznaczono rekomendacje dotyczące procesu projektowego oraz metod pracy architekta.

## SUMMARY

The topic of the dissertation is to study the issue of optimizing the energy efficiency of buildings in the design process. Despite the high level of knowledge regarding energy-efficient construction, publications relating to the design process itself, tasks, competencies and opportunities for optimizing the energy efficiency of buildings, are insufficient, and the transfer of theoretical knowledge to architectural practice is limited. The dissertation is written in the mode of an implementation doctorate and is a record of research and analysis related to the design of multifamily residential buildings. The dissertation systematizes the knowledge of energy efficiency optimization and its methods in architectural practice. The validity of using BIM software to reduce the energy intensity of buildings was investigated and, based on this technology, a methodology for optimizing energy efficiency at the initial stages of the design-build process was proposed. A case study of buildings subjected to energy optimization was also conducted to determine the ranges of parameters within the building's characteristics, based on literature research. On this basis, optimization scenarios were created, which were then applied to a baseline model developed from a digital twin of an existing building. The research performed confirmed the validity of the theses. The issue was discussed in the context of integrated design. Recommendations were set for the design process and the architect's working methods.