

**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego**



ROZPRAWA DOKTORSKA
**WIELOKRYTERIALNA METODA WYZNACZANIA
GLOBALNEGO WSKAŹNIKA
ENERGOCHŁONNOŚCI BUDYNKÓW**

Autor: **mgr inż. Aleksandra Stachera**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Adam Stolarski**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Mariusz Owczarek**

Warszawa 2025

Spis treści

	str.
1. Wstęp	5
1.1. Problematyka badania energochłonności i energooszczędności budynków	5
1.2. Teza i cele rozprawy	8
1.3. Zakres rozprawy	11
2. Charakterystyka składników wpływających na efektywność energetyczną budynku	15
2.1. Składniki naturalne	15
2.1.1. Grunty	15
2.1.2. Gruntowy wymiennik ciepła	16
2.1.3. Poziom wody gruntowej	16
2.1.4. Geotermia	17
2.2. Materiały i wyroby budowlane	17
2.2.1. Konstrukcja nośna	18
2.2.2. Warstwa termoizolacyjna	23
2.2.3. Wyroby hybrydowe	31
2.3. Instalacje	33
2.3.1. Ogrzewanie	33
2.3.2. Chłodzenie	37
2.3.3. Wentylacja	38
2.4. Usytuowanie obiektu	40
2.4.1. Strefa klimatyczna	40
2.4.2. Strona świata	40
2.4.3. Lokalizacja w terenie	40
2.5. Kształt i funkcja budynku	41
2.5.1. Bryła budynku	41
2.5.2. Rozmieszczenie pomieszczeń	41
2.5.3. Wielkość i rozmieszczenie okien i drzwi	42
3. Charakterystyka metod optymalizacji wielokryterialnej	43
3.1. Historia optymalizacji wielokryterialnej	43
3.2. Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej	44
3.3. Charakterystyka metod doboru wag kryteriów	49
4. Charakterystyka kryteriów oceny energochłonności budynku	52
4.1. Budynek referencyjny (bazowy)	53
4.2. Względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową	54
4.3. Koszt	59

4.4.	Trwałość	61
4.5.	Czas zwrotu i czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych	62
4.5.1.	Czas zwrotu nakładów inwestycyjnych	62
4.5.2.	Czas i liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych	64
4.6.	Emisja dwutlenku węgla (CO ₂)	65
5.	Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków	67
5.1.	Hybrydowy sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków	67
5.1.1.	Etap 1: Przygotowanie zbioru danych	67
5.1.2.	Etap 2: Określenie wskaźników energochłonności składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego (bazowego)	68
5.1.3.	Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego)	70
5.2.	Bezpośredni sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków	71
5.2.1.	Etap 1: Przygotowanie zbioru danych	71
5.2.2.	Etap 2: Określenie wskaźników energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych budynku	71
5.2.3.	Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku	72
5.3.	Algorytm metody wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku	73
5.3.1.	Algorytm hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków	73
5.3.2.	Algorytm bezpośredniego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków	75
6.	Studium przypadku budynku modernizowanego z wykorzystaniem hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności	76
6.1.	Opis budynku referencyjnego	76
6.2.	Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych	82
6.3.	Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego	89
6.3.1.	Analiza na podstawie zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów	89
6.3.2.	Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych	96

6.3.3.	Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego	100
7.	Studium przypadku budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności	102
7.1.	Opis budynku bazowego	102
7.2.	Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych	106
7.3.	Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego	112
7.3.1.	Analiza na podstawie zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów	112
7.3.2.	Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych	119
7.3.3.	Analiza wpływu zmiany budynku bazowego	123
7.3.4.	Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych i zmiany budynku bazowego na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego	124
8.	Studium przypadku budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem bezpośredniego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności	126
8.1.	Opis budynku bazowego	126
8.2.	Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych	128
8.3.	Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego	130
8.4.	Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych	138
8.5.	Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego	142
9.	Zakończenie – Wnioski	144
	Wykaz literatury	149
	Streszczenie rozprawy doktorskiej	169
	Summary of Doctoral Dissertation	173

1. Wstęp

1.1. Problematyka badania energochłonności i energooszczędności budynków

Energooszczędność jest ściśle związana z energochłonnością, która określa ilość energii potrzebnej do utrzymania komfortu cieplnego w pomieszczeniach budynku.

Ionescu i in. (2015) przedstawili studium historycznej ewolucji budynków energooszczędnych umożliwiające zrozumienie zachodzących zmian w celu poprawy komfortu cieplnego oraz optymalizacji zużycia energii.

Historia budownictwa energooszczędnego sięga już czasów starożytnych ze względu na fakt, iż w ówczesnych budynkach dostrzega się stosowanie pewnych zasad obecnie stosowanych w tej dziedzinie budownictwa. Przykładano wagę do nasłonecznionej orientacji budynku czy zwartej bryły. W związku z tym już wtedy korzystano z najważniejszych zasad wykonania ówczesnych budynków energooszczędnych, a w szczególności idei maksymalnego wykorzystania energii słonecznej w bilansie cieplnym, Dubas (2006).

Na przestrzeni lat stwierdzono, że domy częściowo zagłębione w gruncie budowano już w 5500 r. p.n.e., co przyczyniło się do uzyskania stabilnej temperatury w pomieszczeniach, Pătraşcu (1984).

W wyniku doświadczeń przeprowadzanych w latach 30. XX wieku udowodniono w budynku istotne zyski ciepła pochodzące z energii słonecznej. Spostrzeżenie to zapoczątkowało ideę strumienia efektywności energetycznej, Jones, Bouamane (2012), Duffie, Beckman (2006).

W tamtych czasach przywiązywano uwagę do poprawy izolacyjności cieplnej. Istotną część budynków, dla których przeprowadzano pomiary bilansu energii stanowiły konstrukcje termiczne elementów i urządzeń, takich jak kolektory słoneczne. W późniejszym okresie liczba rozwiązań technicznych tego typu uległa zwiększeniu. Podstawową zasadą stawało się ulepszanie izolacji cieplnej, Marszał i inni (2011).

Zintensyfikowane zainteresowanie budownictwem energooszczędnym nastąpiło w wyniku kryzysu paliwowego w latach siedemdziesiątych XX wieku. Wówczas w Ameryce wykonywano pierwszą generację tzw. „domów słonecznych”, w których dążono do maksymalnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego w sposób pasywny. Podczas ich realizacji nie zwracano jednak uwagi na przegrzanie wnętrza, na istotność strat ciepła wskutek przenikania oraz wpływu mostków termicznych, Dubas (2006). Zaczęto zatem dostrzegać istotę szczelności budynków, izolacyjności cieplnej przegród, odzysku ciepła

z wentylacji. Vale, B. i Vale, R. (1975) zdefiniowali i opisali ówczesne propozycje budynków energooszczędnych.

Od tego czasu w różnych krajach podejmowano próby realizacji budynków energooszczędnych. Przykładem pionierskich działań w tym zakresie jest budowa w 1974 roku w Niemczech domu jednorodzinnego, w którym do ogrzania i przygotowania ciepłej wody użytkowej wykorzystano pompę ciepła pracującą na zasadzie próżniowego kolektora słonecznego. Zasady wykonywania tego obiektu spełniały większość aktualnie stosowanych wytycznych w budownictwie energooszczędnym, na przykład: odpowiednie ocieplenie i szczelność przegród zewnętrznych, wentylacja mechaniczna, spożytkowanie ciepła odpadowego i energii promieniowania słonecznego dostarczanego do wnętrza budynku przez okna, Dubas (2006).

W 1984 roku również w Niemczech dokonano realizacji projektu opracowanego już w latach 50. XX wieku budując pierwszy magazyn długotrwałego przechowywania energii cieplnej, Hahne (2000).

W latach 80. XX wieku Feist i Bo Adamson zachęceni myślą przewodnią budownictwa energooszczędnego wypracowali koncepcję budynku pasywnego, Feist i inni (2006).

W następnych latach podejmowano liczne próby budowy budynków o coraz lepszej efektywności energetycznej, a także rozwijano opracowane wcześniej technologie. W trakcie tych modernizacyjnych eksperymentów zaczęto mocniej skupiać się na zmniejszeniu zużycia energii oraz emisji dwutlenku węgla, Kontokosta (2016).

Obecnie w trakcie projektowania i wykonywania obiektów dąży się do ograniczenia ilości energii zużywanej podczas użytkowania, a w szczególności energii zużywanej na ogrzewanie budynku w okresie zimowym, Lipski (2008).

Ogólne ramy rozwoju nowoczesnego budownictwa niskoenergetycznego stworzone są w poszczególnych państwach poprzez tradycje budowlane, specyficzną sytuację energetyczną, a także charakterystyczne dla konkretnego położenia geograficznego warunki klimatyczne. Jednakże istnieją uniwersalne rozwiązania architektoniczne, konstrukcyjne, materiałowe, funkcjonalne, jak również instalacyjne, które można stosować wszędzie, Klemm (2007).

Nowoczesne budownictwo, niezależnie od typu czy przeznaczenia obiektów, wyróżnia się dużą energooszczędnością. Dotychczas nie sformułowano jednoznacznej definicji energooszczędności budynków i budowli, jednakże za pomocą różnych metod dąży się do zmniejszenia ich zapotrzebowania na energię i jej zużycie, Klemm (2007).

W Polsce regulacji podlegają takie parametry jak: maksymalny współczynnik przenikania ciepła przegród budynku oraz maksymalne zapotrzebowanie na energię pierwotną. Wartości tych wskaźników określone są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury (2002).

Podjęcie wieloparametrowego opisu właściwości budynku prezentowane jest przez Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków zwaną w skrócie EPBD (Energy Performance Buildings Directive), Dyrektywa Parlamentu (2010), López-Ochoa i inni (2021).

W ostatnich latach w obszarze budownictwa energooszczędnego podejmowane są liczne inicjatywy mające na celu projektowanie obiektów o znacząco niższym zużyciu energii w porównaniu do tradycyjnych standardów budowlanych, Wnuk (2007). W literaturze wyróżnia się kilka rodzajów budynków energooszczędnych, które charakteryzują się różnym poziomem efektywności energetycznej.

Budynki niskoenergetyczne cechują się zapotrzebowaniem na ciepło w przedziale 30-60 kWh/(m²·rok). Wykorzystuje się w nich zaawansowaną izolację przegród zewnętrznych oraz alternatywne źródła energii, takie jak kolektory słoneczne. W ramach tej grupy wyróżnia się również budynki samowystarczalne energetycznie, które dzięki zastosowaniu odpowiednich technologii stają się niezależne od zewnętrznych sieci ciepłowniczych i elektroenergetycznych. Zasady samowystarczalności energetycznej budynków zostały opisane w monografii Budownictwo ogólne, Klemm (2007).

Budynki pasywne, według definicji sformułowanej przez Bo Adamsona w 1987 określane są jako obiekty, które do ogrzewania i chłodzenia nie wykorzystują energii dostarczonej w sposób konwencjonalny, Piotrowski (2009). Budynki te cechują się ekstremalnie niskim zapotrzebowaniem na energię, wynoszącym zaledwie 15 kWh/(m²·rok), dzięki zastosowaniu mocno izolowanych przegród zewnętrznych, Feist i inni (2006).

Budynki zeroenergetyczne, których zapotrzebowanie na energię jest niemal zerowe, charakteryzują się tym, że pozyskiwana energia pochodzi w dużej mierze ze źródeł odnawialnych, wytwarzanych na miejscu lub w pobliżu budynku. Definicję tego typu obiektów określa Dyrektywa 2010/31/UE. Czynniki wpływające na zmniejszenie zużycia energii w budynkach opisał Piotrowski (2009).

Budynki inteligentne stanowią nowoczesną kategorię obiektów energooszczędnych. Pojęcie to odnosi się głównie do budynków niemieszkalnych, takich jak biurowce, w których nowoczesne technologie mają na celu optymalizację zużycia energii oraz poprawę komfortu użytkowania, Klemm (2007). Pierwsze definicje budynku inteligentnego zaproponował Robothan (1989). Amerykański Instytut Inteligentnego Budynku (I.B.I. of USA) podaje inną

definicję przedstawioną w opracowaniu pt. Inteligentny budynek. Integracja systemów (1993). Cechy charakterystyczne tego typu budynków to przede wszystkim zaawansowana automatyzacja i integracja systemów, takich jak ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja, oświetlenie czy systemy teletechniczne i bezpieczeństwa, Niezabitowska i inni (2014).

Istnieje konieczność doboru odpowiednich materiałów, technologii i instalacji spełniających zasady budownictwa energooszczędnego pozwalające na ograniczenie zużycia energii w wykonywanych obiektach. Przy wyborze parametrów budynku energooszczędnego należy brać pod uwagę fakt, że koszty budowy takiego budynku są wyższe w porównaniu do kosztów budowy budynku tradycyjnego. W następstwie tego użytkownik postawiony jest przed koniecznością wyboru pomiędzy wysokim kosztem początkowym i niskim zużyciem energii a niższymi kosztami początkowymi i większym zużyciem energii.

1.2. Teza i cele rozprawy

Przegląd literatury pokazuje, że autorzy artykułów i opracowań skupiają się na ogólnym zadaniu energooszczędności – analizie wpływu poszczególnych materiałów na energooszczędność oraz udoskonaleniu właściwości materiałów wpływających na energooszczędność budynków. Khoukhi (2018), przedstawił wyniki badań połączonego wpływu temperatury i wilgotności na zmianę przewodności cieplnej styropianu oraz na charakterystykę energetyczną budynku. Orzechowski T. i Orzechowski M. (2017), zajęli się ustaleniem optymalnej grubości różnych materiałów izolacyjnych dla różnych warunków temperaturowych i źródeł ciepła pod względem ekonomicznym.

Jednakże w literaturze nie udało się znaleźć opracowań poświęconych badaniom dotyczącym możliwości jednoznacznego wskazania optymalnego rozwiązania konstrukcyjno – budowlano – instalacyjnego z punktu widzenia efektywności energetycznej budynku. Wydaje się, że temu zadaniu najbardziej mogą sprostać systemy oceny budynków takie jak BREEAM czy LEED, Suzer (2019), których wynikiem jest pojedynczy parametr oceny, jednak są to systemy eksperckie, wymagające działania certyfikowanych audytorów. Tymczasem taki system można byłoby oprzeć na istniejących parametrach wejściowych, ale poprzez ocenę wielokryterialną uczynić je bardziej dostępnymi i jasnymi.

Dotychczasowa praktyka wyboru wariantu rozwiązania konstrukcji budynku energooszczędnego polega na bezpośrednim porównaniu poszczególnych wariantów rozwiązań użytych oddzielnie pod względem zapotrzebowania na energię końcową, kosztu wykonania i okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych. Opis taki jest wieloparametryczny i skomplikowany w odbiorze dla użytkownika nie będącego ekspertem, ale zainteresowanego

oceną energetyczną budynku. W przypadku częstych zmian warunków zewnętrznych odwoływanie się do parametrów średnich nie zawsze daje wiarygodne wartości zapotrzebowania na energię. Istnieje obecnie trend wykorzystania sieci neuronowych do przewidywania zapotrzebowania na energię w najbliższej przyszłości, Liu i inni (2021), Kathirgamanathan i inni (2021), na podstawie danych historycznych. Jednak te wszystkie modele potrzebują wielu parametrów budynku do opisu zapotrzebowania na energię. Ocena energetyczna budynku może być też konieczna do planowania modernizacji. W tym przypadku również proponowane są systemy wieloparametrowe, Stanica i inni (2021).

Wybór optymalnego rozwiązania z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej stanowi kluczowy problem w wielu dziedzinach nauki i techniki, w tym w inżynierii budowlanej, gdzie konieczność uwzględnienia różnych, często sprzecznych celów decyzyjnych jest powszechna. Metody optymalizacji wielokryterialnej stanowią skuteczne narzędzie w analizie i wyborze najlepszych rozwiązań w sytuacjach, gdzie decyzje muszą być podejmowane na podstawie wielu konkurujących ze sobą kryteriów. W literaturze przedmiotu ta dziedzina jest również określana mianem optymalizacji wektorowej, optymalizacji Pareto lub polioptymalizacji. Celem tych metod jest wyznaczenie zestawu rozwiązań, z których każde reprezentuje kompromis między różnymi celami, a ich analiza pozwala na dokonanie najlepszego możliwego wyboru, Khan (1989), Odu i Charles-Owaba (2013).

Optymalizacja wielokryterialna opiera się na założeniu, że wiele kryteriów, z którymi mamy do czynienia w rzeczywistych problemach, może być ze sobą w konflikcie. Zmiana wartości jednego z kryteriów w celu poprawy jednego z celów może prowadzić do pogorszenia wyników w innych obszarach. Tym samym metoda ta umożliwia nie tylko znalezienie najbardziej efektywnego rozwiązania, ale także dostarcza decydentowi szerszej wiedzy na temat relacji między różnymi celami oraz ich wzajemnych wpływów, Odu i Charles-Owaba (2013).

Pierwsze prace w dziedzinie optymalizacji wielokryterialnej sięgają końca XVIII wieku, kiedy to opracowano teorie użyteczności oraz dobrobytu, które stały się podstawą dalszego rozwoju tej dziedziny. Z kolei, za istotny moment przełomowy w rozwoju wielokryterialnych metod optymalizacji uznaje się publikacje Carla Mengera z 1871 roku oraz Léona Walrasa z 1874 roku, które wprowadziły matematyczne podejście do analizy problemów związanych z optymalnym wyborem w warunkach niepewności i konfliktu interesów, Khan (1989).

Jednak za najwybitniejszego przedstawiciela początkowego okresu rozwoju tej dziedziny uznawany jest Vilfredo Pareto, którego prace stanowiły fundamenty późniejszych teorii optymalizacji wielokryterialnej. Jego zasady optymalizacji, znane jako zasada Pareto, zyskały

szerokie uznanie w analizie problemów decyzyjnych, w których występuje konieczność uzyskania kompromisu między różnymi celami, Khan (1989).

Współczesne podejścia do optymalizacji wielokryterialnej można podzielić na dwie główne kategorie: metody oparte na podejściu Pareto oraz metody dekompozycji. Pierwsze z nich dążą do znalezienia zbioru rozwiązań optymalnych Pareto, z których żadne nie może zostać poprawione w jednym z kryteriów bez pogorszenia wartości w innych kryteriach. Metody dekompozycyjne, z kolei, dzielą problem na mniejsze podproblemy, które są rozwiązywane niezależnie, a wyniki są następnie łączone w celu uzyskania kompleksowego rozwiązania, Giagkiozis i Fleming (2015).

Optymalizacja wielokryterialna znajduje również zastosowanie w budownictwie, gdzie decyzje muszą uwzględniać szereg kryteriów, takich jak koszty budowy, wydajność energetyczna, komfort użytkowników, wpływ na środowisko czy bezpieczeństwo. W literaturze przedmiotu, jak wskazuje autor publikacji Dytczak (2010), istnieje wiele przykładów zastosowania metod optymalizacji wielokryterialnej w analizie decyzji budowlanych. Przykłady te pokazują, jak różne metody optymalizacji mogą być używane do selekcji najlepszych rozwiązań projektowych, uwzględniających różnorodne cele i ograniczenia.

Mimo rozwoju tej dziedziny, w dostępnej literaturze przedmiotu brakuje jednak publikacji, które bezpośrednio odnosiłyby metody optymalizacji wielokryterialnej do oceny wpływu zbioru wielu składników na energochłonność budynków.

W odpowiedzi na tą otwierającą się przestrzeń badawczą, w niniejszej rozprawie sformułowano tezę rozprawy wraz z celami głównymi i szczegółowymi, które są podstawą rozwinięcia przedmiotu rozprawy pt. „Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków”.

Teza rozprawy

Możliwe jest wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku na podstawie metody optymalizacji wielokryterialnej.

Udowodnienie tezy rozprawy wymaga realizacji następujących celów głównych.

1. Opracowanie nowej, uniwersalnej metody wyboru optymalnej kombinacji składników określających energochłonności budynków za pomocą proponowanego, globalnego wskaźnika energochłonności budynku.
2. Weryfikacja zaproponowanej metody na podstawie studiów przypadków, obejmujących zarówno budynek modernizowany, jak i budynek nowoprojektowany.

Osiągnięcie celów głównych wymaga realizacji następujących celów szczegółowych.

1. Opracowanie bazy danych zawierającej wymagane parametry składników wpływających na energochłonność budynków wraz z charakterystyką ich właściwości, kosztów wbudowania, okresów trwałości, emisyjności CO₂ .
2. Opracowanie bazy danych obejmujących wymagane parametry architektoniczne, funkcjonalne, konstrukcyjne, budowlane i instalacyjne budynku referencyjnego / bazowego.
3. Wybór kryteriów oceny składników i wariantów rozwiązań konstrukcyjnych, budowlanych i instalacyjnych wpływających na energochłonność budynku i obliczenie bezwzględnych wartości kryteriów: względnego rocznego zapotrzebowanie na energię końcową, kosztu, trwałości, czasu zwrotu nakładu inwestycyjnego dla budynku referencyjnego lub liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego dla budynku bazowego, emisyjności CO₂ .
4. Opracowanie autorskiego programu obliczeniowego, którego podstawą jest algorytm zawierający wszystkie równania opisujące proponowaną metodę wielokryterialnej oceny energochłonności budynków.

1.3. Zakres rozprawy

Rozprawa składa się ze wstępu, 7 rozdziałów głównych, zakończenia i wykazu bibliograficznego. Główną część rozprawy stanowią: Rozdział 2 zawierający charakterystykę składników wpływających na efektywność energetyczną budynku; Rozdział 3 poświęcony charakterystyce metod optymalizacji wielokryterialnej; Rozdział 4 opisujący charakterystykę kryteriów oceny energochłonności budynku; Rozdział 5 zawierający sformułowanie wielokryterialnej metody oraz algorytm wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków; Rozdział 6 prezentujący studium przypadku budynku modernizowanego; Rozdziały 7 i 8 zawierające studium przypadku budynku nowoprojektowanego, w których przedstawiono dwa sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku: hybrydowy i bezpośredni.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono szczegółowy opis realizacji poszczególnych etapów pracy.

Rozdział 2 zawiera przegląd, systematykę i charakterystykę składników wpływających na efektywność energetyczną budynku. W ramach analizy uwzględniono łącznie pięćdziesiąt sześć grup składników w 3 głównych rodzajach, które są najczęściej rozpatrywane w procesie projektowania i budowy obiektów budowlanych. Przedstawiona charakterystyka umożliwia zrozumienie, w jaki sposób poszczególne składniki przyczyniają się do całościowej efektywności energetycznej budynku. Właściwy dobór materiałów oraz technologii w ramach

każdej z wymienionych grup składników stanowi kluczowy element procesu modernizowania i projektowania energooszczędnych budynków.

Rozdział 3 poświęcony jest charakterystyce metod optymalizacji wielokryterialnej. W rozdziale tym przedstawiono zarys historyczny rozwoju optymalizacji wielokryterialnej oraz dokonano szczegółowego przeglądu metod optymalizacji, klasyfikując je w trzech głównych grupach. W rozdziale przedstawiono również charakterystykę metod doboru wag kryteriów umożliwiających dokonanie preferencyjnego wyboru w ramach analizy wielokryterialnej.

Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis kryteriów oceny energochłonności budynku. Podstawowym punktem odniesienia w analizie energochłonności jest budynek referencyjny w przypadku rozwiązań modernizacyjnych lub budynek bazowy w przypadku rozwiązań projektowych. Przedstawiono systematykę i specyfikację parametrów opisujących te budynki. W ramach przeprowadzonej optymalizacji przyjęto pięć kluczowych kryteriów: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu nakładu inwestycyjnego dla budynku referencyjnego lub liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego dla budynku bazowego oraz emisję dwutlenku węgla. Zdefiniowane kryteria stanowią podstawę analizy efektywności energetycznej budynku, umożliwiając kompleksową ocenę jego wpływu na środowisko oraz ekonomiczne aspekty użytkowania.

Rozdział 5 poświęcony jest przedstawieniu metody wielokryterialnej wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku. Zaproponowano dwa sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności: sposób hybrydowy i sposób bezpośredni. Sposób hybrydowy jest ogólnym sposobem połączonej optymalizacji zarówno poszczególnych składników rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych jak i wariantów rozwiązań jako zbioru tych składników. Natomiast sposób bezpośredni jest uproszczonym sposobem optymalizacji wyłącznie wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych jako ustalonych zbiorów poszczególnych składników. Dla każdego sposobu przedstawiono szczegółowe formuły obliczania wartości poszczególnych kryteriów oraz sformułowanie funkcji celu optymalizacji umożliwiającej wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku. W rozdziale przedstawiono również propozycję określenia i kwalifikacji klas energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych. Rozdział zawiera schematy blokowe algorytmów obliczeniowych sposobem hybrydowym oraz sposobem bezpośrednim. Schematy określają kolejne etapy metody analizy wraz z odwołaniem do formuł obliczeniowych. Przedstawione algorytmy są podstawą opracowania autorskiej procedury obliczeniowej wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku.

Rozdział 6 prezentuje analizę studium przypadku budynku modernizowanego, w której wykorzystano hybrydowy sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku. W celu określenia globalnego wskaźnika energochłonności przyjęto budynek referencyjny jako dom jednorodzinny przeznaczony do modernizacji. Analizę obliczeniową przeprowadzono w trzech sytuacjach obliczeniowych. W pierwszej sytuacji obliczeniowej przyjęto założenie jednakowych wag dla wszystkich kryteriów. W drugiej sytuacji uwzględniono wpływ redystrybucji wag kryteriów na wskaźniki energochłonności. W trzeciej sytuacji obliczenia przeprowadzono na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych. Analiza wyników uzyskanych na podstawie tych sytuacji obliczeniowych, pozwoliła na szczegółową ocenę wpływu zmian wag na wskaźniki energochłonności budynku. W wyniku analizy uzasadniono rekomendację wyznaczenia globalnego wskaźnika energochłonności dla parametru redystrybucji wag kryterialnych, dla którego wagi kryterialne są jednakowe.

W następnych dwu rozdziałach przedstawiono analizę studium przypadku budynku nowoprojektowanego, w których wykorzystano dwa sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku: sposób hybrydowy – Rozdział 7 oraz sposób bezpośredni – Rozdział 8. W celu określenia globalnego wskaźnika energochłonności projektowanego budynku przyjęto podstawowe parametry budynku bazowego identyczne pod względem lokalizacji, wymiarów, powierzchni oraz programu funkcjonalnego jak w budynek referencyjny rozważany w Rozdziale 6. Jednak w zależności od wymagań procedury obliczeniowej realizowanej sposobem hybrydowym czy bezpośrednim, w różny sposób traktowane jest uzupełnienie tych parametrów przez uwzględnienie parametrów wariantów projektowych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych i instalacyjnych. Ponadto, w analizie wielokryterialnej – zgodnie z wymaganiami metody – stosowane jest kryterium liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego, zamiast kryterium czasu zwrotu nakładu inwestycyjnego jak dla modernizowanego budynku referencyjnego.

I tak, w Rozdziale 7, biorąc pod uwagę fakt, że w przypadku procedury projektowania wybór budynku bazowego zerowej iteracji projektowej jest dowolny, przyjęto, że budynek bazowy będzie stanowił jeden z wariantów rozwiązań projektowych. Analizę obliczeniową przeprowadzono w trzech sytuacjach obliczeniowych dotyczących uwzględnienia stopnia zróżnicowania wag kryterialnych, podobnie jak w Rozdziale 7. W wyniku analizy potwierdzono rekomendację stosowania jednakowych wartości wag kryterialnych oraz wykazano, że przyjęcie innego budynku bazowego, jakkolwiek będzie skutkować zmianą wartości kryteriów dla poszczególnych składników i złożonych z nich wariantów rozwiązań, to

nie wpływa na końcową ocenę wariantów rozwiązań projektowych pod względem kolejności uszeregowanych wartości wskaźnika energochłonności budynku.

Natomiast w Rozdziale 8 przyjęto, że każdy z wariantów rozwiązań projektowych będzie traktowany jak budynek bazowy, a więc będzie podlegał bezpośredniej ocenie wielokryterialnej. Analizę obliczeniową przeprowadzono w trzech sytuacjach obliczeniowych dotyczących uwzględnienia stopnia zróżnicowania wag kryterialnych, podobnie jak w Rozdziale 8. W wyniku analizy ponownie potwierdzono rekomendację stosowania jednakowych wartości wag kryterialnych. W takim przypadku wykazano, że w wyniku analizy sposobem bezpośrednim uzyskano identyczne kolejności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych, a zatem wskazano ten sam wariant rozwiązania nowoprojektowanego, który osiągnął globalny wskaźnik energochłonności budynku, jak w przypadku analizy sposobem hybrydowym.

W Rozdziale 9 przedstawiono podsumowanie wyników pracy oraz wnioski wynikające z jej realizacji. W podsumowaniu przeprowadzonych badań wskazano istotne cechy proponowanej metody wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków. Sformułowano główne wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz porównawczych dwóch sposobów: hybrydowego i bezpośredniego, wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności, w kontekście ich stosowania w budynkach modernizowanych i nowoprojektowanych. Wskazano kierunki dalszych badań, uwzględniające możliwość doskonalenia proponowanej metody oraz jej zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Podkreślono również znaczenie wyników pracy w kontekście zrównoważonego rozwoju oraz poprawy efektywności energetycznej w budownictwie.

2. Charakterystyka składników wpływających na efektywność energetyczną budynku

Składniki wpływające na energooszczędność budynku można podzielić na naturalne, wyroby budowlane, w tym organiczne i nieorganiczne, instalacje oraz usytuowanie, kształt i funkcje budynku.

2.1. Składniki naturalne

Składniki naturalne wpływające na energooszczędność budynku to przede wszystkim grunty oraz pozyskiwane z nich ciepło, za pomocą gruntowego wymiennika ciepła, a także woda w szczególności poziom wód gruntowych i energia geotermalna.

2.1.1. Grunty

Grunt to doskonały zasobnik ciepła, z którego można korzystać cały rok, ponieważ na pewnej głębokości ma on zawsze stałą temperaturę współmierną do średniej, rocznej temperatury powietrza w danej strefie.

Zgodnie ze zmianami temperatury powietrza zmienia się również temperatura górnych warstw gruntu. Jednakże amplituda wahań temperatury gruntu jest mniejsza niż temperatury powietrza, a dodatkowo jest ona przesunięta w czasie. Od właściwości fizycznych gruntu takich jak: współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i wilgotność zależy przebieg zmian temperatury gruntu oraz głębokość na jaką one docierają. Dodatkowo temperatura wierzchnich warstw gruntu jest zależna od jego struktury, nasiąkliwości i natężenia opadów w danej strefie klimatycznej.

Warto wspomnieć, że grunt jako dolne źródło ciepła jest bardziej osiągalne niż woda gruntowa.

Ciepło zostaje zakumulowane w warstwie gruntu grubości około 10 m i to właśnie na tej głębokości temperatura jest równa średniej rocznej temperaturze powietrza. W warunkach klimatycznych, w jakich znajduje się Polska, temperatura ta wynosi około 10°C. Biorąc pod uwagę koszty inwestycyjne wymienniki pozwalające odzyskać ciepło z gruntu umieszczane są na głębokości od 1 do 2 metrów. Na takiej głębokości wartości temperatury zmieniają się sinusoidalnie w przekroju rocznym i kształtuje się następująco: około 17°C w lipcu, a w styczniu około 5°C, Rubik (2006).

Możliwość wykorzystanie gruntów jako magazynu ciepła omówiona została w publikacji Poluloupatis i in. (2011).

2.1.2. Gruntowy wymiennik ciepła

Poziome gruntowe wymienniki ciepła mogą zostać wykonane w różnych konfiguracjach takich jak: układy płaskie szeregowe, a także węzownicowe i spiralne oraz głębinowe, pionowe. Gruntowe wymienniki ciepła są opisane przez: Aresti i in. (2018), Floridies i Kalogirou (2007).

Od głębokości ułożenia rur, a także od rodzaju gruntu oraz lokalnych warunków klimatycznych zależy średnia temperatura nośnika ciepła, Rubik (2006).

Gruntowy wymiennik ciepła stanowi najbardziej opłacalny system, w przypadku, gdy dostępna jest przestrzeń oraz łatwy sposób wykonania wykopów, Floridies i Kalogirou (2007).

Wielokrotne badania dostarczają informacji na temat tego, że na pewniej głębokości temperatura podłoża pozostaje stała przez cały rok, stąd pionowe wymienniki wymagają mniejszej długości rur niż poziome do uzyskania takiej samej wydajności, jednak wymuszają większe koszty instalacyjne związane z wymaganą głębokością instalacji, Poluloupatis i in. (2011).

Warto wspomnieć o publikacji Aresti i in. (2018), którzy przedstawili zagadnienie dotyczące aspektów projektowych gruntowego wymiennika ciepła.

2.1.3. Poziom wody gruntowej

Wody podziemne to te, które znajdują się poniżej skorupy ziemskiej i stanowią integralną część obiegu wody, a także oddziałują w sposób bezpośredni z wodą znajdującą się na powierzchni. W celu zmniejszenia ryzyka dla budynku powodowanego przez wody gruntowe wykonuje się odwodnienie podłoża, pozwala to chronić budynek przed przenikaniem wód przez niego oraz przed jego uszkodzeniem, Eno (2014).

Wzrost poziomu wód gruntowych został odnotowany w sporej liczbie krajów na całym świecie. Konstrukcje, które w czasie budowy znajdowały się powyżej poziomu wód gruntowych, podczas podnoszenia się poziomu wód gruntowych, napotykają szereg strukturalnych i funkcjonalnych wyzwań.

W większości przypadków problem wzrostu poziomu wód gruntowych wpływa na podziemne konstrukcje takie jak piwnice, tunele, urządzenia podziemne itp., a jego skutki widoczne są dopiero po tym, jak oznaki wzrostu poziomu wód gruntowych wystąpią w postaci wycieku wody i deformacji, Chaudhary (2012).

Kreibich i Thieken (2008) w swojej publikacji wskazali, że wzrost poziomu wód gruntowych obecnie nie jest traktowany jako znaczące zagrożenie naturalne.

Zmiany poziomów wód gruntowych zależą przede wszystkim od czynników opisanych przez Przysański (1981).

Obniżenie poziomu wód gruntowych wykonywane jest różnymi metodami opisanymi przez Przysański (1981) i należy przede wszystkim do nich zaliczyć:

- 1) bezpośrednio pompowanie wody z wykopów,
- 2) drenaż poziomy,
- 3) drenaż pionowy.

Wysoki poziom wód gruntowych ma niekorzystny wpływ na trwałość i funkcjonalność budynku, a co za tym idzie – prowadzi do obniżenia jego energooszczędności. Stąd już na początku budowy stosuje się metody obniżenia wpływu wód gruntowych na budynek.

2.1.4. Geotermia

Energia geotermalna to energia cieplna zakumulowana w skorupie ziemskiej, w postaci naturalnej pary, gorącej wody, bądź też w masie gruntu i skał, a w szczególności w gorących skałach magmowych. Źródła, z których pozyskiwana jest ta energia posiadają znacznie zróżnicowane wartości podstawowych parametrów energetycznych, z których najistotniejsze to temperatura, skład chemiczny nośnika, typ złoża. Ten rodzaj energii można wykorzystywać do celów grzewczych i wytwarzania energii elektrycznej.

W Polsce nośnikiem energii geotermicznej jest gorąca woda inaczej zwana wodą geotermalną. Niestety źródła te posiadają niską entalpie i nie są wykorzystywane do celów grzewczych. Eksploatacja tych źródeł polega na wykorzystaniu energii pochodzącej z odwiertów z wypływem naturalnym, bądź też w sposób wymuszony wykorzystując pompy. Niestety wody geotermalne zlokalizowane są na dużej głębokości, co powoduje konieczność stosowania stosunkowo drogich głębinowych technik drążeniowych. Ciepło, ze względu na dosyć dużą mineralizację i korozyjność wód geotermalnych, uzyskiwane jest z nich nie bezpośrednio, a za pomocą specjalistycznych (np. tytanowych) wymienników ciepła, Klemm (2007).

2.2. Materiały i wyroby budowlane

Składniki wpływające na energooszczędność, które można zakwalifikować jako wyroby budowlane to przede wszystkim materiały z jakich budynek jest wykonany. Można je podzielić przede wszystkim na te, które wykorzystuje się do wykonania konstrukcji nośnej oraz warstwy izolacyjnej budynku.

2.2.1. Konstrukcja nośna

Konstrukcja nośna odpowiada za przenoszenie obciążeń zewnętrznych oraz własnego ciężaru. Konstrukcję nośną budynku stanowią przede wszystkim fundamenty, ściany nośne, słupy, stropy oraz dach. Materiały jakich używa się do wykonywania konstrukcji nośnej budynku przede wszystkim charakteryzują się dużą wytrzymałością i trwałością.

Zwykle duża wytrzymałość oznacza również dużą gęstość materiału, która wpływa na pogorszenie właściwości izolacyjnych. Dla niektórych materiałów konstrukcyjnych, a szczególnie żelbetu, poszukuje się metod zwiększenia izolacyjności cieplnej bez pogorszenia wytrzymałości.

Badacze Morales i in. (2014) zbadali możliwości poprawy równoważnego współczynnika przenikania ciepła dla ścian jednowarstwowych.

2.2.1.1. Ceramika budowlana tradycyjna

Ceramiką budowlaną nazywane jest tworzywo uformowane, a następnie kolejności wypalone i spieczone z glin naturalnych bądź też ich mieszanin. Ceramika budowlana to najstarsze wytwarzane przez człowieka tworzywa. Wybory ceramiczne biorąc pod uwagę ich wielowiekowe zastosowanie są materiałami wypróbowanymi i wysoce cenionymi w budownictwie, Szymański (2004).

Do ceramiki budowlanej tradycyjnej wykorzystywanej jako konstrukcja nośna można zaliczyć przede wszystkim cegły pełne, cegły kratówki, cegły dziurawki, pustaki ścienne i stropowe. Cegły budowlane mają kształt prostopadłościanu o prostych i równych krawędziach, a także płaskich powierzchniach. Materiały te opisane zostały w wielu pozycjach literatury, m.in. w monografiach Stefańczyk (2005) i Szymański (2004).

2.2.1.2. Ceramika poryzowana

Do ceramiki poryzowanej należy zaliczyć cegły, pustaki i elementy poryzowane, których gęstość nie przekracza $1,2 \text{ kg/dm}^3$ i bardzo małej przewodności cieplnej. Podczas produkcji cegły poryzowanej na wstępnym etapie przerobu gliny dodaje się do niej łatwo palne składniki takie jak mączkę drzewną, trociny albo inne materiały, które są na tyle sztywne, że podczas mieszania i formowania wyrobu nie ulegają zniszczeniu. W trakcie wypalania wyrobów składniki te ulegają utlenieniu, a powstałe wówczas wewnętrzne mikropory podnoszą izolacyjność termiczną wyrobów.

W normie PN-B 12069:1998, Az1:2002 można znaleźć podział wyrobów poryzowanych według grupy, rodzaju, klasy i sortymentu.

Wyroby z ceramiki poryzowanej dostępne są na rynku jako materiały budowlane i występują pod różnymi nazwami handlowymi między innymi jako: Citherm, Kintherm, Kroterm, Megaterm, Poromur, Porotherm, Poroton, Troterm, Stefańczyk (2005)

2.2.1.3. Beton

Betony są to sztuczne zlepienie powstające poprzez związanie oraz stwardnienie spoiwa bądź lepiszcza wymieszanego z wypełniaczami. Nazwa betonu zwykle związana jest z rodzajem użytego spoiwa czy kruszywa, a także od struktury samego betonu.

Minerały przypominające właściwościami betony produkowane i stosowane do wznoszenia budynków już w czasach starożytnych. Przykładem takiej budowli może być kopuła Panteonu w Rzymie, której rozpiętość wynosi około 43 metry i wykonana jest z mieszaniny okruchów skalnych, związanych zaprawą wapienną oraz dodatkiem popiołów wulkanicznych, Szymański (2005).

Historię betonu, od pierwszych prób jego otrzymania i pierwszych prób zastosowań opisano w monografii Stefańczyk (2005).

Beton to kompozyt wykonany na bazie cementu, wody, kruszywa grubego i drobnego, domieszek chemicznych oraz dodatków mineralnych. Dodaje się również krótkie, cienkie włókna stalowe lub polipropylenowe stanowiące zbrojenie rozproszone. Cement wraz z ewentualnymi dodatkami i domieszkami oraz wodą ma za zadanie utworzenie matrycy cementowej, czyli zaczynu łączącego ziarna kruszywa. Beton jako materiał jest kruchy jest przede wszystkim wykorzystywany do przenoszenia obciążeń ściskających, Stefańczyk (2005).

Rodzaje betonów zostały opisane przez Szymański (2005) i Stefańczyk (2005).

Beton jest materiałem o bardzo szerokim spektrum przewodności cieplnej, Asadi (2018).

2.2.1.4. Beton lekki

Betonem lekkim nazywany jest beton, którego gęstość objętościowa w stanie suchym nie przekracza 2000 kg/m^3 . Betony lekkie różnią się zarówno rodzajem zastosowanych materiałów do ich produkcji, a także sposobem wytwarzania.

Historia betonów lekkich sięga aż czasów starożytnych. Kolejne etapy historii betonów lekkich wraz z pierwszymi próbami zastosowań w budownictwie opisuje Stefańczyk (2005).

Podział betonów lekkich ze względu na typ kruszywa i strukturę można znaleźć w publikacji Jamróży (2005).

Alqahtani i in. (2017) w swojej publikacji przedstawili opracowany nowatorski beton lekki zawierający kruszywo wytworzone z tworzywa sztucznego.

2.2.1.5. Beton komórkowy

Betony komórkowe inaczej zwane są betonami mikro-kruszywowymi. Ich wspólną cechą jest to, że jako kruszywo stosowane są materiały o bardzo dużym rozdrobnieniu. Zazwyczaj miąższość zastosowanego kruszywa jest porównywalna do miąższości cementu. Stosowane mikrokruszywo stanowią: popiół lotny, mielony wielkopiecowy żużel granulowany, rozdrobniony piasek i szlam piaskowy. Za spoiwo może posłużyć cement, wapno albo mieszanka cementu z wapnem, mielony żużel wielkopiecowy, jak również gips, Jamróży (2005).

Pierwsze wzmianki o nasyceniu papki zaprawy wykonanej z cementu rzymskiego pianą z oliwy, jajek i albuminy z krwi można znaleźć już w starożytnym Rzymie w dziele architekta Vitruwius’a o tytule „De architectura”. Historię betonu komórkowego można znaleźć w monografii Stefańczyk (2005).

Bieżące trendy w budownictwie wskazują na coraz szersze wykorzystanie materiałów wykonanych z betonów lekkich. Spowodowane jest to ich stosunkowo niską gęstością objętościową, a także dobrymi parametrami izolacyjności cieplnej, co pozwala na oszczędności na etapie wykonania obiektów, a także podczas ich eksploatacji, Stefańczyk (2005).

Z betonu komórkowego wykonywane są bloczki bądź płytki, które są elementami prostopadłościennymi i w zależności od dokładności ich wykonania przeznaczone są do: murowania na zwykłe spoiny używając zapraw murarskich zwykłych lub lekkich, a także na cienkie spoiny z użyciem zapraw specjalnych, a w spoinach pionowych, prostopadłych do lica muru, połączenie między bloczkami wykonywane jest za pomocą zaprawy albo bez zaprawy na tak zwane pióro i wpust, Byrdy (2009).

Zalety i wady ścian wykonanych z elementów z betonu komórkowego zostały opisane przez Byrdy (2009).

2.2.1.6. Beton geopolimerowy

We wczesnych latach pięćdziesiątych XX wieku został opracowany materiał betonowy pierwotnie nazywany betonem gruntowym, który obecnie jest nazywany betonem geopolimerowym. Beton ten jest materiałem alternatywnym w stosunku do konwencjonalnego betonu z cementem i zawiera on kombinację różnych materiałów takich jak: popiół lotny, popiół denny, żużel wielkopiecowy, mielony granulowany żużel wielkopiecowy, popiół z łusek ryżowych, krzemionka dymna, metakaolin, tufy wulkaniczne, odpady kopalniane, zeolity, krzemiany i roztwory wiążące aktywowane alkaliami, takie jak krzemian sodu, i wodorotlenek sodu czy krzemian potasu i wodorotlenek potasu. Beton ten jest lepszy od zwykłego betonu pod względem wielu aspektów między innymi takich jak wytrzymałość na ściskanie, narażenie na

agresywne środowisko, urabialność i narażenie na wysoką temperaturę, Thamilselvi i in. (2017).

Dzięki zastąpieniu cementu portlandzkiego poprzez użycie geopolimerów można znacznie zmniejszyć emisję dwutlenku węgla z przemysłu cementowego, Cao i in. (2018). Autorzy tej publikacji badali właściwości betonu geopolimerowego zawierającego różne rodzaje materiałów termoregulacyjnych.

Na podstawie różnych badań zaobserwowano, że beton geopolimerowy składa się z przede wszystkim z popiołu lotnego i roztworu alkalicznego. Krzemian sodu (Na_2SiO_3) i wodorotlenek sodu (NaOH) w reakcji z popiołami lotnymi generują proces geopolimeryzacji i odpowiedzialne są za wytrzymałość materiału. Beton geopolimerowy wymaga wypiekania w temperaturze od 600°C do 1000°C przez 24 do 96 godzin, Kumar i in. (2015).

Udało się osiągnąć przyjazny dla środowiska beton geopolimerowy o wysokiej zdolności magazynowania energii cieplnej, zawierający mikrokapsułkowane materiały do przemiany fazowej, co zostało opisane przez Cao i in. (2018).

2.2.1.7. Keramzytobeton

Jednocześnie z gwałtownym wzrostem liczby budynków wysokich i budowanych na całym świecie konstrukcji wielkogabarytowych beton lekki z kruszywem keramzytowym stał się skuteczną odmianą betonu, pozwalającą na zapewnienie mniejszego ciężaru własnego, wyższej odporności ogniowej i niższych kosztów budowy, Youssf i in. (2018). Dodatkowo warto odnotować zastosowanie betonu lekkiego keramzytowego w budynkach odpornych na trzęsienia ziemi, co jest korzystne również ze względu na zmniejszenie masy samego betonu, a tym samym masy konstrukcji, Alqahtani (2017).

W publikacjach Al-Khaiat i Haque (1998) oraz De'Gennaro i in. (2005) pokazali, że lekki beton keramzytowy jest chętniej wykorzystywany ze względu na liczne zalety, takie jak łatwiejsze urabialność oraz wysoką odporność na ścieranie, co czyni go przydatnym w środowiskach morskich, a także w obszarach o wahaniach temperatury i wilgotności ze względu na jego właściwości termoizolacyjne.

Keramzytobeton oraz jego zastosowania zostały opisane przez Wegian (2012), Rossignolo i in. (2003), Chandra i Berntsson (2002), Topcu (1997), Sajedi i Shafigh (2012).

2.2.1.8. Pustak gipsowy

Wyroby wytwarzane z zaczynów gipsowych mogą być produkowane w poligonowych, a także w stałych zakładach prefabrykacji. W zależności od zastosowania wyróżnia się cztery

grupy wyrobów gipsowych: pustaki i elementy ściennie, pustaki i elementy stropowe, elementy ścianek działowych, elementy sufitów podwieszanych, Stefańczyk (2005).

Rozwój produkcji elementów gipsowych oraz systemy budowy domów z materiałów gipsowych można prześledzić w monografii Stefańczyk (2005).

2.2.1.9. Silikaty

Murowe elementy silikatowe wytwarzane są z masy pochodzącej z częściowo mielonego piasku kwarcowego i wapna o dużej aktywności, które wymieszane są z niewielką ilością wody. Powstała masa przechowywana jest przez określony czas, a następnie metodą prasowania pod dużym ciśnieniem formowane są z niej elementy murowe.

Po uformowaniu elementy poddawane są autoklawizacji, czyli działaniu przegrzanej pary wodnej pod dużym ciśnieniem. Podczas tych procesów z krzemionki i wapna powstaje związek – krzemian wapnia, który ma dużą wytrzymałość i nie jest rozpuszczalny w wodzie, Byrdy (2009).

Rodzaje elementów silikatowych, cechy charakterystyczne, w tym zalety i wady opisane zostały przez Byrdy (2009).

2.2.1.10. Betonowa perforowana cegła warstwowa

Biorąc pod uwagę niedoskonałości jakie posiada zewnętrzny system ociepleń, postanowiono zaproponować inny samonośny system izolacji termicznej. System ten został podzielony na dwie klasy: pierwsza – samoizolacja strukturalna oraz druga – samoizolacja materiałowa. Technologia samoizolacji strukturalnej opierała się na umieszczeniu materiału izolacyjnego w konstrukcji nośnej w trakcie budowy. Technologia ta sprawiała dużą trudność podczas budowy, stąd była rzadko stosowana. Właściwości stosowanych w technologii tej samouszczelniających się materiałów zależą głównie od izolacyjności cegieł oraz sposobu rozwiązania problemów z mostkami termicznymi. W systemach samoizolacji materiałowej tylko cegła stanowiła materiał izolacyjny, zatem proces budowy ścian zewnętrznych był jednocześnie procesem termoizolacji, co pozwalało na skrócenie okresu budowy, Xing i in. (2018).

Cegły lub bloki izolacyjne odgrywały w samonośnych systemach izolacji termicznej bardzo ważną rolę, zatem wielu uczonych prowadziło badania numeryczne i eksperymentalne chcąc poprawić właściwości izolacyjne tychże elementów, Zukowski i Haese (2010), Morales i in. (2014), Costa (2014), Diaz Coz i in. (2014).

Udało się opracować nową cegłę o nazwie: izolowana wielowarstwowa betonowa cegła dziurawka. Izolowana wielowarstwowa betonowa cegła dziurawka składała się z trzech części:

betonowej cegły dziurawki, warstwy izolacyjnej i pokrywy betonowej. Cegła ta została opisana przez Xing i in. (2018).

2.2.1.11. Stabilna cegła ziemna (SEB)

Żywotność budynku w dużej mierze zależy od właściwości mechanicznych materiałów budowlanych użytych do jego budowy. Na charakterystykę energetyczną budynku zarówno pod względem bezwładności termicznej, a także właściwości izolacyjnych wpływają w znacznym stopniu właściwości termiczne materiałów budowlanych. Koncepcja zrównoważonego budynku wymaga znajomości zarówno właściwości mechanicznych jak również termicznych materiałów budowlanych. Przeprowadzono wiele badań dotyczących charakterystyki właściwości mechanicznych i termicznych materiałów, Toure i in. (2017).

Aigbomian i Fan (2013) opracowali nowy materiał budowlany wykorzystując trociny, makulaturę oraz wapno. Wyniki przeprowadzonych przez nich badań wykazały, że lekkie wytrzymałe bloki mogą być wytwarzane łącznie z dobrą izolacją i mogą mieć gęstość mieszczącą się w przedziale od 356 do 713 kg/m³ oraz wytrzymałości na ściskanie od 0.06 do 0.80 MPa.

Millogo i in. (2014) opisali przeprowadzone eksperymentalne badania właściwości cegły wzmocnionej włóknami Hibiscus cannabinus, suszonej naturalnie „na słońcu”.

Tematem właściwości i zastosowania stabilizowanych cegieł zmiennych zajmowało się wielu badaczy m.in. Muntohor (2011), Alvares-Ramirez i in. (2012), Gouny i in. (2013), Benmansour i in. (2014), Mounir i in. (2014), Maskell i in. (2014), Bal i in. (2012).

2.2.2. Warstwa termoizolacyjna

Do głównych zadań materiałów termoizolacyjnych należy zaliczyć przede wszystkim poprawienie właściwości cieplnych głównie przegród, a zatem zmniejszenie strat ciepła przez przegrody, jak również oszczędność energii oraz kosztów. W trakcie użytkowania budynku oszczędność energii są znacznie wyższe niż zużycie energii w trakcie produkcji materiałów. Materiały izolacyjne powinny charakteryzować się przede wszystkim: dopasowaniem i wypełnieniem konstrukcji bez szczelin powietrznych, a także niezmiennym kształtem we wszystkich trzech wymiarach w okresie eksploatacji budynków. Dodatkowo materiały te muszą być odporne na wilgoć i korozję biologiczną. Ważne jest, aby materiał nie był promieniotwórczy, a także nie emitował substancji w stężeniach niebezpiecznych do wewnętrznego środowiska budynku. Istotne jest, żeby materiał izolacyjny charakteryzował się właściwościami ogniochronnymi, Schmidt (2004).

Rozważanie trwałości cech materiałów izolacyjnych w całym okresie eksploatacji budynków jest bardzo istotne w budownictwie zrównoważonym, Gangolells i in. (2020).

2.2.2.1. Materiały organiczne

Początkowo izolacje wykonywano z dostępnych produktów naturalnych stąd też można je nazwać izolacyjnymi materiałami organicznymi. Materiały te charakteryzują się niską nasiąkliwością wody, ale jednocześnie są bardziej narażone na proces starzenia pod wpływem zewnętrznych oddziaływań środowiskowych.

2.2.2.1.1. Pyty pilśniowe

Płyty pilśniowe produkowane są z włókien lignocelulozowych bez dodatku środków chemicznych albo ze środkami hydrofobowymi takimi jak: parafina, kalafonia, woski, asfalty. Płyty nasączone środkami hydrofobowymi oraz środkami grzybobójczymi stosuje się w miejscach narażonych na działanie wilgoci, Stadnik (2009). Podstawowy surowiec do produkcji tych płyt wykorzystywane są małowymiarowe odpady drewna iglastego.

Opis płyt pilśniowych i ich rodzaje można znaleźć w publikacjach Stefańczyk (2005), Gonzalez-Garcia i in. (2009), Widsten i Kandelbauer (2014).

2.2.2.1.2. Płyty wiórowo-cementowe

Płyty cementowo-wiórowe wytwarzane są poprzez sprasowanie cząstek drewna albo innych cząstek lignocelulozowych wiązanych za pomocą cementu.

Wyroby te produkowane są fabrycznie w postaci płyt sztywnych albo półsztywnych. Płyty cementowo-wapienne stosowane są jako warstwa termoizolacyjna pod tynkiem, jednakże nie wcześniej niż po upływie 6 tygodni od momentu wyprodukowania.

Stosowane są do izolacji cieplnej i dźwiękowej ścian, stropów oraz dachów, a dodatkowo również jako warstwy pod posadzki, aby tłumić dźwięki wywoływane uderzeniami. Gęstość pozorna płyt wiórowo-cementowych wynosi 1000 kg/m^3 , są one niepalne a podczas palenia ulegają tylko zwęgleniu.

Szczegółowe informacje o tym materiale można znaleźć w publikacji Szymański (2005).

2.2.2.1.3. Wyroby z włókna drzewnego

Wyroby z włókien drzewnych produkowane są fabrycznie jako maty, płyty miękkie i wołoki. Maty to elastyczne włókniste wyroby izolacyjne w postaci płaskiej bądź zrolowanej. Wyroby te stosowane są szczególnie do izolacji cieplnej wewnątrz budynków, a posiadany przez nie współczynnik ciepła waha się w przedziale od 0.037 do 0.042 W/mK, Szymański (2005).

Włókno drzewne charakteryzuje się interesującym zachowaniem jako izolacja termiczna w zimnych porach roku, a także dobrą kontrolą zjawisk przegrzania w gorących porach roku.

Ponadto, z punktu widzenia ochrony środowiska, włókno drzewne nadaje się do recyklingu i jest wytwarzane głównie z odpadów pochodzących z przemysłu drzewnego, Bianco i in. (2017).

2.2.2.1.4. Płyty i maty z wełny owczej

Wełna owcza jest zaliczana do bioproduktów, czyli do materiałów pochodzących ze zrównoważonych zasobów biologicznych lub naturalnych. Wykazuje ona pewien potencjał zastosowania w budownictwie, co spowodowało, że zaczęto promować i sprzedawać ją jako alternatywny materiał izolacyjny. Wełna posiada wiele cech fizycznych takich jak: wytrzymałość, właściwości hydrofobowe i hydrofilowe, właściwości termiczne oraz naturalną zdolność do regulacji temperatury i odporności ogniowej, przez to stanowi atrakcyjny surowiec do izolacji.

Opis właściwości tego materiału izolacyjnego można znaleźć w publikacji Corsadden i in. (2014). Desarnaulds i in. (2005) stwierdził, że wełna owcza posiada lepsze właściwości pochłaniania dźwięku niż wełna mineralna.

2.2.2.1.5. Materiały nasypowe z celulozy

Izolacje termiczne i akustyczne z zastosowaniem włókien celulozowych stosowano już od początków XX wieku. Stopniowo rozwijająca się technologia w Polsce nabrała największego znaczenia w latach 90, Woyciechowski i Krupa (2010).

Historię stosowania tego typu izolacji można znaleźć w publikacji Siddiqui (1989).

Metody stosowania izolacji z włókien celulozowych opisane zostały przez Salonvaara i in. (2010), CIMA (1998₁, 1998₂), a także w normie NF EN 15101-1 (2014).

Jedno z pierwszych badań zostało przeprowadzone przez Bomberg i Shirtliffe (1979) wykazało średnią gęstość wdmuchiwanego włókna 34.8 kg / m³ dla zastosowań w przegrodach poziomych. Średnia utrata grubości w wyniku osiadania wynosiła 21.5%, przy czym 10.5% pochodzi z testów udarnościowych, a 11% z cyklicznych testów wilgotności.

Chociaż typowa wartość przewodności cieplnej włókien celulozowych wynosi około 0.040 W/(m*K), to ich właściwości i wydajność mogą się różnić zależności od produkcji i metody instalacji. Wykazano, że różnica w jakości źródłowego papieru gazetowego może wpływać na parametry termiczne, Kwon i Yarbrough (2004).

Tematem izolacji z włókien celulozowych zajmowało się wielu badaczy m.in. Hurtado i in. (2016), Papadopoulos (2005).

2.2.2.1.6. Keramzyt

Lekkie kruszywo z gliny ekspandowanej o skrócie LECA produkowane jest w wielu krajach podobną metodą, jednakże pod różną nazwą i tak w np. Wielkiej Brytanii, Iranie, Portugalii, Niemczech czy Włoszech jako „leca”, natomiast w Polsce, Szwecji Rosji czy Chinach jako „Keramzite”. Niezależnie od nazwy kruszywo to produkowane jest ze specjalnej plastycznej gliny bez luz z bardzo małą zawartością wapna, Rashad (2018).

Proces produkcji dokładnie opisany został przez Alexander i in. (1999), Ozguven i Gunduz (2012), Ayati i in. (2018).

Literatura przedmiotu opisuje właściwości czy skład chemiczny keramzytu. Po informacje te warto sięgnąć do publikacji: Akroyd (1962), Alexander i in. (1999).

Ardakani i Yazdani (2014) w swoich badaniach udowodnili szeroki zakres odporności kruszenie oraz określili gęstość na sucho, 24-godzinną absorpcję wody oraz gęstość nasypową keramzytu. Można rozważać zróżnicowane gęstości keramzytu jako jedną z zalet stosowania tego rodzaju kruszywa, które sprawiają, że nadaje się zarówno do lekkich konstrukcji ochronnych, jak i strukturalnych betonów.

Keramzyt to imponujący wszechstronny materiał, który znalazł wiele różnych zastosowaniach. Na przykład w dziedzinie budownictwa może być szeroko wykorzystywany do produkcji lekkich bloków, betonu, prefabrykatów, a także do zasypywania warstw izolacyjnych konstrukcji pod fundamenty. Ponadto keramzyt może być wykorzystany do odprowadzania wód gruntowych i powierzchniowych, aby regulować ciśnienie wód gruntowych, Rashad (2018).

2.2.2.1.7. Korek ekspandowany

Korek to naturalny, ekologiczny, hydrofobowy i odnawialny produkt o wyjątkowo interesujących właściwościach termicznych oraz akustycznych dzięki swojej mikrostrukturze i porowatości, Mounir i in. (2014).

Wyroby z korka naturalnego uzyskuje się z kory dębu korkowego. Dąb korkowy można spotkać obrębnie basenu Morza Śródziemnego, czyli rośnie w takich krajach jak: Algieria, Maroko, Tunezja, południowa Francja, Włochy, Hiszpania czy Portugalia. Jednakże największe uprawy znaleźć można w Portugalii, gdzie wytwarzanych jest około 70% całości światowej produkcji wyrobów korkowych. Więcej informacji na temat pozyskania, produkcji i właściwości korka można znaleźć w publikacji Szymański (2005).

2.2.2.1.8. Perlit

Wypływająca z podmorskich wulkanów lawa stykając się z wodą absorbowwała jej nieznaczną ilość w swojej strukturze. Powstała w ten sposób skała nazywana jest perlitem albo szkłem wulkanicznym, a dzięki zawartości wody posiada interesujące właściwości w aspekcie praktycznego zastosowania w budownictwie.

Perlit składa się w szczególności z: tlenku krzemu - SiO_2 – około 72%, tlenku glinu – Al_2O_3 – około 14%, tlenku potasu - K_2O – około 4%, tlenku sodu – Na_2O – około 3%, tlenek żelaza (III) – Fe_2O_3 – około 1%, tlenek wapnia – CaO - około 1%, tlenek magnezu – MgO - około 1%. Pozostałą część stanowią inne składniki i woda związana chemicznie. Ze względu na porowatą strukturę materiał ten charakteryzuje mała wartość współczynnika przewodzenia ciepła, która mieści się w przedziale od 0.045 do 0.065 W/(m*K). Przedstawiona cecha perlitu spowodowała, że znalazł on szerokie zastosowanie szczególnie w przemyśle budowlanym, Żukowski (2011). Perlit to materiał neutralny, który nie wchodzi w reakcję chemiczną ze względu na stabilną strukturę chemiczną. Warto wspomnieć, że jest to materiał jałowy, co oznacza, że nie zawiera bakterii i innych zarasków, Demir (2017).

Sposób produkcji wyrobów z perlitu został opisany w sposób w publikacjach: Żukowski (2011), Król i in. (2014), Kapelusznia i in. (2016), Petranek i in. (2014).

2.2.2.2. Wyroby nieorganiczne

Nieorganiczne materiały izolacyjne charakteryzuje duża odporność na temperatury i w przeciwieństwie do organicznych materiałów nie posiadają zwiększonej higroskopijności.

2.2.2.2.1. Perlitobeton

Perlitobeton piaskowy, znany również jako beton z perlitu ekspandowanego, jest wykonany z piasku perlitowego jako lekkiego kruszywa, a także cementu portlandzkiego jako materiału wiążącego, Ningxia (2018).

Beton perlitowy jest stosowany do izolacji termicznej i dźwiękowej w budynku. Jest rozpuszczalny w zwykłych warunkach i ma wysokie właściwości termiczne i akustyczne, Tsekova i in. (1989).

2.2.2.2.2. Polistyren ekspandowany

Polistyren ekspandowany inaczej zwany styropianem, uzyskiwany jest poprzez spienienie polistyrenu na gorąco w obecności poroforów metodą dwuetapową: w pierwszym etapie przy użyciu pary wodnej w temperaturze od 80 do 100°C otrzymywany jest granulata o wielkości od 0.20 do 0.30 mm, a w drugim następuje dalsze spienianie wykonywane za pomocą niskowrzących węglowodorów, Stefańczyk (2005).

Proces produkcji, właściwości oraz zastosowanie wyrobów z polistyrenu ekspandowanego zostały opisane w publikacjach Stefańczyk (2005), Byrdy (2009).

2.2.2.2.3. Polistyren ekstrudowany

Styropian ekstrudowany to sztywny materiał o zamkniętych komórkach, który wytwarzany jest poprzez spienienie i ekstrudowanie polistyrenu. Wyrób ten charakteryzują bardzo korzystne właściwości fizyczno-mechaniczne i powoduje to, że przewyższa styropian ekspandowany. Na rynku można znaleźć wyroby barwione, które jako główną zaletę posiadają małą chłonność wody, co korzystnie wpływa na właściwości termoizolacyjne nawet przy długim działaniu wilgoci. Dodatkową zaletą wyrobu jest fakt, że jego właściwości nie zmieniają się wraz z upływem czasu.

Materiał ten cechuje niski współczynnik przewodzenia ciepła mieszczący się w przedziale od 0.030 do 0.035 W/mK, mała gęstość objętościowa od 28 do 35 kg/m³, mała chłonność wody przy długotrwałym zanurzeniu, duża wytrzymałość na ściskanie, odporność na pleśń oraz procesy gnilne, łatwość obróbki.

Więcej informacji o wyrobach z polistyrenu ekstrudowanego można znaleźć w publikacjach Stefańczyk (2005) i Szymański (2005).

2.2.2.2.4. Wełna mineralna

Wełna mineralna stanowi materiał izolacyjny sztywny i otrzymywany jest z mineralnych włókien impregnowanych olejem i połączonych lepiszczem organicznym. Struktura materiału zapewnia dobrą izolacyjność termiczną oraz akustyczną, ponieważ tylko 1.5% objętości wyrobu stanowią włókna mineralne, a pozostałą część objętości stanowi powietrze, które zamknięte jest pomiędzy włóknami, dzięki czemu stanowi zaporę dla przepływu ciepła oraz rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych. Wełna mineralna charakteryzuje się wieloma korzystnymi cechami ze względu na zastosowanie w budownictwie.

Wyróżnia się następujące rodzaje wyrobów: filce, płyty miękkie, półtwarde oraz twarde. Płyty stosowane do cieplenia ścian murowanych mają masę objętościową mieszczącą się w przedziale od 70 do 145 kg/m³. W warunkach suchych współczynnik ciepła dla płyt z wełny mineralnej wynosi 0.040 W/mK, a w warunkach mokrych 0.045 W/mK.

Wyrobu z wełny mineralnej zostały opisane przez Byrdy (2009).

2.2.2.2.5. Wełna skalna – kamienna

Głównym składnikiem wełny skalnej jest amfibolit. Początkowo przygotowywana jest mieszanina składająca się głównie z amfibolitu i niektórych dodatków, takich jak wapień (do 6% wagowo) i różnorodne tlenki wapnia (do 9%). Skład tej podstawowej mieszanki może się

różnić w zależności od producenta i konkretnego rodzaju produkowanej wełny skalnej, Karamanos i in. (2008).

Proces powstawania oraz właściwości materiału zostały opisane w pozycjach literaturowych m.in. patent Grove-Rasmussen (1999), Karamanos i in. (2008), Stefańczyk (2005).

2.2.2.2.6. Wata/przędza szklana

Włókna szklane mają zupełnie inne właściwości niż zwykłe szkło. Istotne jest to, że właściwości włókien szklanych zależą przede wszystkim od ich średnicy. Wytrzymałość mechaniczna włókien szklanych jest kilkukrotnie wyższa w porównaniu z wytrzymałością włókien naturalnych, a także tych z tworzyw sztucznych. Charakterystyka włókien szklanych, właściwości, metody produkcji oraz zastosowanie zostały omówione w monografii Stefańczyk (2005).

Cao (2015), wraz ze współpracownikami przeprowadzili badanie, które wykazało, że współczynniki przewodzenia ciepła próbek płyt z włókna szklanego wynosiły od 0.0287 W/mK do 0.0313 W/mK. Wyniki te pokazują, że przewodność cieplna płyt z włókna szklanego jest mniejsza niż przewodność cieplna tradycyjnych materiałów izolacyjnych, co pozwala na używanie płyt do wewnętrznych warstw izolacyjnych.

2.2.2.2.7. Pianka poliuretanowa

Piankowe poliuretany wytwarzane są z żywicy poliestrowej zmieszanej z izocyjanianami, a także z innymi substancjami takimi jak pigmenty, katalizatory i środki spieniające, które regulują wielkość oraz jednorodność porów. Uzyskać można wyroby poliuretanowe o różnych strukturach i właściwościach od słabo usieciowanych i miękkich aż do silnie usieciowanych i twardych.

Właściwości wyrobów poliuretanowych w tym zalety i wady, metody produkcji oraz zastosowania można znaleźć w publikacji Stefańczyk (2005).

2.2.2.2.8. Odblaskowe izolacje termiczne

Obecnie jako zamiennik tradycyjnych materiałów takich jak pianki czy włókna szklane stosuje się wielowarstwową izolację odblaskową. Tradycyjna izolacja termiczna poprzez blokowanie powietrza wewnątrz warstwy materiału izolacyjnego ogranicza przewodzenie ciepła, natomiast izolacja odblaskowa daje korzyść taką jak zmniejszenie przenoszenia ciepła przez promieniowanie. Izolacja odblaskowa składa się z powierzchni, która odbija ciepło, dzięki czemu chroni ucieczką ciepła promieniowania, albo zapewnia ochronę przed wysoką

temperaturą. Niestety izolacja tego typu posiada również wady i można do nich zaliczyć konwekcję naturalną występującą w szczelinach powietrznych, Piotrkowski i in. (2014).

Firma Reflective Insulation Manufacturers Association International podaje definicję izolacji odbłaskowej w publikacji RIMA-I (2002). Natomiast, zastosowanie, właściwości tego materiału można znaleźć w publikacjach Saber i in. (2011), Yarbrough (2010).

2.2.2.2.9. Płyty silikatowe

Płyty silikatowe – krzemianowo - wapniowe to lekki materiał budowlany, stosowany jako izolacyjny materiał ścienny, w szczególności w przypadku apartamentów o podwyższonym standardzie, hoteli lub biur. W ostatnim czasie niska masa objętościowa oraz redukcja hałasu stały się ważnym kryterium, które musi wziąć pod uwagę właściciel budynku i architekt, aby przy lekkiej konstrukcji ścian zapewnić ciche wnętrza pomieszczenia. Takie właśnie kryteria spełniane są przez płyty krzemianowo - wapniowe. Płyta silikatowa składa się głównie z materiałów nieorganicznych, takich jak: piasek kwarcowy, cement portlandzki, celuloza. Stosowana jest jako alternatywa dla płyt cementowo-gipsowych, Kristanto i in. (2017).

2.2.2.2.10. Szkło spienione Foamglass

Szkło spienione inaczej zwane szkłem piankowym uważane jest za jeden z najbardziej popularnych, progresywnych materiałów termoizolacyjnych. Materiał ten łączy w sobie niską gęstość, wysoką wytrzymałość i doskonałą zdolność izolacyjną. Dodatkowo charakteryzuje się odpornością ogniową, wysoką odpornością chemiczną, niską nasiąkliwością i praktycznie nieograniczoną trwałością w porównaniu do organicznych i włóknistych materiałów izolacyjnych, Ivanov (2018).

Proces produkcji, cechy charakterystyczne szkła spienionego opisane zostały w publikacjach: Stefańczyk (2005), Ivanov (2018), Szymański (2004).

2.2.2.2.11. Aerożel

W 1932 roku Kistler (1932) opracował aerożele krzemionkowe wykorzystując proces zol-żel i usuwając rozpuszczalnikowe suszenie nadkrytyczne. Uzyskany materiał był mezoporowaty, nanostrukturalny i utworzony z nanocząsteczek krzemionki tworzących sieci otwarte, mający pory o rozmiarach od 2 do 100 nanometrów.

Niestety ówczesnie stosowane metody uzyskiwania aerożeli były żmudne i czasochłonne. Wraz z rozwojem technologii procesu chemicznego zol-żel, aerożele krzemionkowe ponownie zyskały na znaczeniu w latach sześćdziesiątych, a kolejnymi badaczami tego materiału byli m.in. Peri (1966), Teichner i in. (1968), Tewari i in. (1985), Huang i in. (2018), Nocentini i in. (2018).

Ponadto, aerozele krzemionkowe mają stosunkowo wysoką cenę i niską wytrzymałość mechaniczną, co opisano w artykule Liang i in. (2017).

Właściwości mechaniczne materiałów aerożelowych opisał Fu i in. (2016).

Xie (2013), wraz ze współpracownikami badali teoretycznie wpływ gęstości aerożelu na przewodnictwo cieplne aerożeli krzemionkowych.

2.2.3. Wyroby hybrydowe

Obserwuje się postęp prac nad wynalezieniem nowych materiałów lub technologii pozwalających zapewniać lepszą izolację budynku, a tym samym oszczędzić energię.

2.2.3.1. Lekkie kompozytowe materiały na bazie cementu

W związku ze stale rozwijającą się technologią budynków energooszczędnych zachodzi potrzeba opracowania nowych materiałów termoizolacyjnych - kompozytów na bazie cementu.

Ogólny sposób poprawy skuteczności izolacji termicznej materiału lub kompozytu polega na wbudowanie izolatora termicznego w matrycę cementową, aby przeciwdziałać przepływowi ciepła przez materiał. Lekkie wypełniacze można podzielić na nieorganiczne: takie jak kulki szklane (GB), perlit ekspandowany, agregat pumeksowy, popiół lotny, cenosfera, kulka nanokrzemionki i aerożel nanokrzemionkowy (NSA) lub organiczne: takie jak celuloza, spieniony polistyren, guma i włókno drzewne, Zeng i in. (2018).

Wielu badaczy podejmuje problematykę technologii lekkich materiałów kompozytowych na bazie cementu, Hanif i in. (2016), Hanif i in. (2017), Zhang i in. (2018).

2.2.3.2. Izolowane płyty warstwowe z betonu z łącznikami z włókna szklanego

Prefabrykowane betonowe płyty warstwowe znane są również jako izolowane ściany betonowe albo integralnie izolowane ściany to termicznie wydajne prefabrykowane elementy spełniające obie te potrzeby. Płyty te zazwyczaj składają się z dwóch płyt z betonu zbrojonego otaczających centralną warstwę sztywnej pianki izolacyjnej. Strukturalna ciągłość między warstwami betonu zapewniona jest poprzez mechaniczne wiązania zwane również złączami ścinanymi. Więcej informacji opisał Woltman i in. (2017).

Kosny i in. (2001), stwierdzili, że konstrukcje zbudowane przy użyciu prefabrykowanych betonowych płyt warstwowych z użyciem włókna szklanego wymagają znacznie mniej energii, w celu zapewniania komfortu cieplnego w pomieszczeniach, w porównaniu do tradycyjnej konstrukcji ramy drewnianej.

Przeprowadzono eksperymentalne badania w celu zbadania odporności termicznej nowego typu prefabrykowanych betonowych płyt warstwowych z łącznikami ścinanymi z włókna szklanego, Woltman i in. (2017).

2.2.3.3. Kompozytowe panele izolacyjne

Warstwowe płyty izolacyjne z kompozytów są coraz częściej stosowane w nowoczesnych fasadach budynków ze względu na posiadane właściwości takie jak izolacyjność cieplna i akustyczna, lekkość, estetyczność, łatwość produkcji oraz instalacji. Płyty te wcześniej wytwarzane były poprzez łączenie polimerowych pianek, włókien mineralnych albo rdzeni o strukturze plastra miodu z metalowymi albo też niemetalicznymi zewnętrznymi okładzinami. Obecnie płyty stosowane w fasadach budynków wykonywane są z lekkiego materiału rdzenia wykonanego z pianki o niskiej gęstości lub włókien spajanych pomiędzy dwoma warstwami zewnętrznymi. Wydajność izolacyjna tego wyrobu mierzona jest za pomocą ich współczynnika przenikania ciepła, a jego niska wartość oznacza wyższą izolacyjność termiczną. O’Flaherty i Alam (2018) zajmuje się oceną izolacyjności cieplnej i akustycznej kompozytowych płyt izolacyjnych izolowanych próżniowo dla fasad budynków.

2.2.3.4. Ściana z wbudowanymi rurami cieplnymi

Ściana to jedna z najbardziej podstawowych form budynku, przez co stanowi kluczowy element oszczędzania energii w konstrukcji obudowy budynku, Zhung i in. (2014).

Rura cieplna (ciepłowód) stanowi jeden z najbardziej efektywnych systemów przenoszenia ciepła, który może przenosić dużą ilość ciepła bez dodatkowego zużycia energii, gdy temperatura otoczenia jest zróżnicowana, Noie (2005).

Wychodząc powyższych założeń badacze Niu i Yu (2016), zbadali ścianę budynku, gdzie sieć rur kapilarnych została zainstalowana wewnątrz ściany, aby sterować termodynamiką i wykorzystać potencjał ściany do akumulacji ciepła.

Zhung i in. (2014) opisali technologię wykonania ściany implantowanej rurkami cieplnymi. Urządzenia te zmniejszają degradację środowiska oraz wpływają na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Jest to nowy rodzaj pasywnej technologii wykorzystania energii słonecznej. Technologię tę opisali również: Zengrui i Zhigang (2018), Albanese i in. (2012), Fiaschi i Bertolli (2012).

Badacze Yufeng i in. (2007), Zhao i in. (2008), Bian (2013), korzystając z podobnych założeń przeprowadzili badania nad podłogą z wbudowanym termosyfonem.

2.3. Instalacje

Instalacje, w które wyposażony jest budynek, stanowią kolejny składnik wpływający na energooszczędność budynku. Do najważniejszych instalacji należy zaliczyć ogrzewanie, chłodzenie i wentylację. Parametrem świadczącym o energooszczędności instalacji ogrzewania i chłodzenia jest jej wysoka sprawność zdefiniowana w polskich, a także europejskich normach jako iloczyn sprawności wytwarzania, przesyłania energii, jej akumulacji oraz systemów sterowania i regulacji. W przypadku instalacji wentylacyjnej najistotniejszym parametrem jest sprawność odzyskiwania energii z powietrza usuwanego.

2.3.1. Ogrzewanie

Od najdawniejszych czasów ludzie zamieszkujący Europę musieli zmagać się z problemem ogrzewania pomieszczeń. Wykorzystywali do tego ogrzewanie miejscowe i ogrzewanie centralne.

Do ogrzewania miejscowego można zaliczyć paleniska, kominki bądź piece czy grzejniki. Dzięki wykorzystaniu współczesnych technologii i wykorzystaniu do ogrzewania oprócz stałych paliw także energii elektrycznej czy gazu, grzejniki uzyskały wysokie sprawności. Oprócz tego znacznemu uproszczeniu uległa ich eksploatacja.

Do drugiej grupy zalicza się rozwiązania z centralnym źródłem ciepła (kocioł, pompa ciepła w budynku, kotłownia osiedlowa i miejska), od którego ciepło rozprowadzane jest do poszczególnych pomieszczeń lub domów. Systemy te obecnie są zautomatyzowane i bardzo często niemal bezobsługowe.

Cechy charakterystyczne oraz historię i zastosowanie systemów ogrzewania opisano w monografii Klemm (2007).

2.3.1.1. Kolektory słoneczne

Kolektory słoneczne mają za zadanie absorbować promienie słoneczne i przekształcać je w ciepło, będące następnie oddawane przepływającemu nośnikowi ciepła, Broszkiewicz i in. (2007).

Kolektory w zależności od czynnika roboczego dzielą się na cieczowe i powietrzne. Kolejnym podziałem w zależności od temperatury maksymalnej, jaką osiąga się od czynnika roboczego dzieli się na niskotemperaturowe oraz wysokotemperaturowe. Następny podział jaki można wyróżnić jest zależny od konstrukcji kolektora – są to kolektory płaskie oraz kolektory próżniowe, Dąbrowski (2009).

Budowę i sposób działania oraz typy budowy kolektorów słonecznych opisane zostały przez Broszkiewicz i in. (2007).

2.3.1.2. Ogniwa fotowoltaiczne

Ogniwa fotowoltaiczne są częścią instalacji fotowoltaicznej zwanej instalacją PV, Broszkiewicz i in. (2007).

Zachodzi w niej konwersja fotowoltaiczna, czyli przemiana bezpośrednia energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną, poprzez zastosowanie odpowiednich przetworników i przekaźników. Fotowoltaiczna przemiana energii promieniowania słonecznego zachodzi wówczas, kiedy energia promieniowania zmieniana jest w sposób czysto elektronowy na energię elektryczną, Klemm (2007).

W instalacji solarnej do przekształcania energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną służą ogniwa fotowoltaiczne. Budowa oraz zasada działania ogniw fotowoltaicznych opisana została przez Broszkiewicz i in. (2007).

2.3.1.3. Pompa ciepła

Pompa ciepła w literaturze technicznej została zdefiniowana jako maszyna cieplna bądź jako urządzenie chłodnicze do przekazywania energii ciepła albo chłodu na drodze procesów termodynamicznych z elementów o niższej temperaturze do elementów o wyższej temperaturze. W pompach ciepła może odbywać się konwersja energii na różnych poziomach energetycznych, Mroziński (2016).

Historię rozwoju tego rozwiązania opisano w publikacji Brodowicz i Dyakowski (1990).

Podstawowym zadaniem pompy ciepła jest transport ciepła ze źródła dolnego o niższej temperaturze do źródła górnego o temperaturze wyższej i może ono być realizowane różnymi sposobami. Dokładnie proces ten opisał Rubik (2006).

Ze względu na rodzaj wymiennika ciepła, a tym samym źródło pobieranej energii cieplnej wyróżnia się następujący podział pomp ciepła na: powietrzną (powietrze - woda), gruntową (solanka – woda) oraz wodną (woda - woda).

2.3.1.3.1. Powietrzna

Powietrzna pompa ciepła pobiera ciepło z powietrza. Powietrze atmosferyczne to najłatwiej dostępne źródło energii odnawialnej, dlatego też często jest ono stosowane do zasilania parowaczy pomp o małej i średniej mocy wykorzystywanych do ogrzewania budynków jednorodzinnych, bądź przygotowania c.w.u. Szczegółowe informacje dotyczące powietrznych pomp ciepła opisane zostały przez Rubik (2006).

2.3.1.3.2. Gruntowa

Gruntowa pompa ciepła energię cieplną do ogrzewania pomieszczeń pobiera z gruntu, czyli opiera się na energii geotermalnej jako przyjaznym dla środowiska źródle ciepła, Bryś i in. (2018).

Zgromadzone w gruncie ciepło jest wykorzystywane do zasilania parowaczy pomp ciepła w sposób bezpośredni bądź pośredni – najczęściej stosowane rozwiązanie w praktyce. Działanie systemu opisano w publikacji Rubik (2006).

Na głębokości od 1.20 do 1.80 metra p.p.t. odnotowany jest średnioroczny równomierny rozkład temperatury, umożliwiający ekonomiczne wykorzystanie pomp ciepła, Broszkiewicz i in. (2007).

Technologia gruntowych pomp ciepła w coraz większym stopniu jest wykorzystywana jako technologia energooszczędna oraz technologia energii odnawialnych w różnych strefach klimatycznych mogąca zapewnić znaczącą oszczędność energii i zmniejszenie globalnej emisji CO₂, Bryś i in. (2018).

2.3.1.3.3. Wodna

Wodna pompa ciepła swoje działanie opiera na cieple uzyskiwanym z wód powierzchniowych lub wód gruntowych.

Woda będąc źródłem ciepła niskotemperaturowego posiada szczególnie korzystne właściwości, a dzięki dużym współczynnikom przejmowania ciepła pozwala na budowę wymienników ciepła o zwartej konstrukcji.

Systemy wodnych pomp ciepła opisane zostały przez Rubik (2006).

2.3.1.4. Kotły gazowe kondensacyjne

Kotły kondensacyjne w najlepszym stopniu odpowiadają obecnym wymaganiom stawianym przez Niemieckie Rozporządzenie w sprawie oszczędzania energii, EnEV (2002) w aspekcie sprawności kotłów grzewczych. Praca tych kotłów polega na kondensacji, czyli skraplaniu się w nich pary wodnej. Wykorzystana zostaje dzięki temu prawie cała zawarta w paliwie energia cieplna. Stąd też należy w sposób ciągły schładzać paliwo poniżej punktu rosy pary wodnej za pomocą dodatkowych powierzchni grzewczych. Materiały z jakich wykonany jest kocioł oraz system spalinowy w tym rozwiązaniu muszą odpowiadać wysokim wymaganiom odnośnie wytrzymałości na korozję ze względu na właściwości chemiczne tworzącego się kondensatu.

Dwa systemy konstrukcyjne kotłów kondensacyjnych, jak również zasadę ich działania opisał Broszkiewicz i in. (2007).

2.3.1.5. Kotły gazowe pulsacyjne

Kotły pulsacyjne to urządzenia grzewcze przystosowane do spalania gazu stosując technologię kondensacji z pulsacyjnym systemem spalania. W tym kotle na miejscu tradycyjnego palnika, zainstalowana jest komora spalania, do której przez klapę zaworową zostaje doprowadzona mieszanka gazowo-powietrzna. Kiedy klapa się zamknie następuje zapłon mieszanki, a następnie powstałe spaliny wyrzucone zostają z dużą szybkością do nagrzewnicy wytwarzając wówczas podciśnienie. Ponad 100 takich cykli zachodzi w ciągu jednej sekundy. W momencie wydmuchu do nagrzewnicy temperatura spalin wynosi ponad 800°C. Nagrzewnica składa się ze specjalnie wyprofilowanych rurek. W sposób nieregularny powstałe impulsy ciepłe przesuwają się stopniowo poprzez rurki nagrzewnicy, pozwalając na bardzo skuteczny odbiór ciepła. Przechodząc przez rurki spaliny schładzają się do temperatury około 25°C. Wówczas skrapla się para wodna zawarta w spalinach gazowych i zamienia w ciecz. Sprawia to, że komora spalania oraz nagrzewnica są zanurzone w cieczy odbierającej ciepło od nagrzewnicy rurowej. Charakterystyczną cechą kotła pulsacyjnego jest duża wydajność wynosząca średnio powyżej 109%, utrzymująca się w czasie jego eksploatacji. Pracą kotła steruje elektroniczny system, Węglarz (2014).

2.3.1.6. Kotły na biomasę

W krajach europejskich coraz większe zastosowanie do ogrzewania mają kotły na biomasę. Kotły te mogą być zasilane automatycznie w paliwo zasypywane bezpośrednio z silosu, a dzięki zastosowaniu elektronicznych systemów sterowania nie potrzebują bezpośredniej obsługi przez użytkownika, Wnuk (2006).

Kotły te wykorzystują energię zgromadzoną w biomasie. Energia biomasy do celów energetycznych pochodzi z wykorzystania substancji organicznych pochodzenia roślinnego bądź zwierzęcego, a także powstałych w wyniku „metabolizmu społecznego”.

Spalanie biomasy uważane jest za proces ekologiczny, ponieważ w czasie jej spalania emisja dwutlenku węgla równa jest ilości jaka pochłaniania jest w procesie fotosyntezy odnawiania tych paliw. Dodatkowo pozwala to na ograniczenie emisji tlenków pierwiastków takich jak azot czy siarka, ze względu na ich małą zawartość w biomasie.

Zasadę działania kotłów na paliwa z biomasy opisano w monografii Klemm (2007).

2.3.1.7. System drewnianych paneli ogrzewania promiennikowego

Ogrzewanie promiennikowe w porównaniu do ogrzewania konwekcyjnego nie wprowadza cząstek zawieszonych w powietrzu do przestrzeni. Nowo opracowany system drewnianych

paneli ogrzewania promiennikowego ze względu na wykorzystanie źródeł odnawialnych charakteryzuje się ekologiczną trwałością, Bishara i in. (2017).

Promienniki podłogowe z osadzonymi rurami wypełnionymi wodą zostały zbadane przez Sattari i Farhanieh (2006), poprzez analizę wrażliwości.

Kolejne badania mające na celu opracowanie nomogramów projektowania paneli ogrzewania zostały przeprowadzone przez Shin i in. (2015).

Za pomocą eksperymentów oraz modelowania numerycznego Seyam i in. (2014), przeanalizowali wpływ rozmiaru i położenia panelu grzewczego na komfort cieplny w pomieszczeniu.

Następne badania zostały przeprowadzone przez Bojić, i in. (2013), i polegały one na tym, że za pomocą modeli symulacyjnych analizowali panele ogrzewania podłogowego, ściennego i sufitowego oraz ich charakterystykę energetyczną, środowiskową i ekonomiczną.

Laouadi (2004), opracował model numeryczny pozwalający w precyzyjny sposób przewidzieć temperaturę kontaktu między rurą, a sąsiednim materiałem.

Metoda modelowania procesów wymiany ciepła w panelach promieniujących z układem węży serpentynowych została opracowana przez Tye-Gingras i Gosselin (2011).

Od kilku lat w budownictwie stosowane są wielowarstwowe płyty z litego drewna do usztywnienia deskowania w ścianach czy też podłogach bądź jako elementy wykończeniowe. Wzrostowi popytu towarzyszył wzrost ich funkcjonalności. W celu stworzenia promiennikowego systemu ogrzewania i chłodzenia do kontroli temperatury w pomieszczeniu zintegrowano funkcję ogrzewania oraz chłodzenia w środkowej warstwie panelu z litego drewna. Materiał ten został opisany dokładnie w pracy Bishary i in. (2017).

2.3.2. Chłodzenie

Poza instalacjami grzewczymi oraz instalacjami wentylacji w procesie formowania mikroklimatu, istotne jest również zastosowanie klimatyzacji. Dopiero połączenie tych instalacji pozwala na formowanie dowolnego mikroklimatu. Dzięki zastosowaniu odpowiednich urządzeń możliwe są zmiany parametrów mikroklimatu, które wpływają na modyfikację parametrów powietrza wentylacyjnego, Klemm (2007).

Urządzenia klimatyzacji mogą zapewnić nie tylko właściwą czystość powietrza, ale także wymaganą temperaturę w okresie letnim, jak również w zimowym. Wynika stąd, że muszą one wykazywać sprawność nie tylko do ogrzewania, ale także i do chłodzenia powietrza, Pelech (2011).

2.3.2.1. System wentylacji z kondensacyjnym osuszaczem powietrza z ciekłym czynnikiem chłodniczym

Dzięki wielu zaletom systemy chłodzenia osuszaczem powietrza z ciekłym czynnikiem chłodniczym stają się coraz to bardziej atrakcyjne porównując je do konwencjonalnych technologii chłodzenia. Technologia chłodzenia z osuszaczem powietrza z ciekłym czynnikiem chłodniczym swoje zastosowanie znalazła w przemyśle oraz rolnictwie. W systemach klimatyzacyjnych również odgrywa ona coraz większą rolę. System chłodzenia opiera się na osuszaczu z ciekłym czynnikiem chłodniczym, który może być zasilany przez źródło ciepła poniżej 80°C w celu chłodzenia i osuszania powietrza. Zasady działania tego rodzaju instalacji oraz ich zastosowanie opisano w publikacjach: Fekadu i Subudhi (2018), Mohamed i in. (2016), Mahammad Abdulrahman (2013), Thosapon i Kaumar (2008).

Kessling i in. (1998) poszukiwali możliwości magazynowania energii dla systemów chłodzenia i opracowali eksperymentalny system chłodzenia osuszaczem z ciekłym czynnikiem chłodniczym, odpowiedni dla wykorzystania energii słonecznej jako źródła ciepła.

2.3.3. Wentylacja

Najważniejszą funkcją systemu wentylacji jest wymiana powietrza w budynku, aby zapewnić spełnienie wymagań higienicznych dotyczących ilości, jakości i czystości powietrza wewnętrznego. Jest to związane ze stałym zanieczyszczeniem powietrza w pomieszczeniach spowodowanym ich użytkowaniem, jak również realizowanymi w nich procesami technologicznymi, emisją szkodliwych związków z elementów wykończenia i wyposażenia pomieszczeń.

W działaniu wentylacji istotne jest zapewnienie właściwego przepływu powietrza w pomieszczeniach i w budynku pomiędzy pomieszczeniami. Prawidłowe działanie wentylacji w obiektach mieszkalnych powinno opierać się na zapewnieniu doprowadzenia świeżego i czystego powietrza zewnętrznego do pomieszczeń zwanych czystymi takich jak: pokoje mieszkalne, sypialnie, salony, gabinety itp. i odprowadzenia zużytego i zanieczyszczonego powietrza z pomieszczeń użytkowych, komunikacyjnych i sanitarnych takich jak: kuchnie, garderoby, w których powstaje najwięcej zanieczyszczeń, Koc (2014).

Skuteczność wentylacji związana jest ściśle z takimi parametrami jak: komfort cieplny, oszczędność energii i zminimalizowanie zanieczyszczeń, np.: CO₂ lub aerozole, przyczyniających się do rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych, Yang i in. (2021).

Technologie wentylacji opisano w monografii Klemm (2007).

Wymagania dotyczące wentylacji w budynkach zawarte są w Rozdziale 6 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

Wyróżnia się następujące trzy typy wentylacji: grawitacyjną, mechaniczną, hybrydową.

2.3.3.1. Wentylacja grawitacyjna

Wentylacja grawitacyjna inaczej zwana jest naturalną. Jej działanie opiera się na naturalnym zjawisku konwekcji, to znaczy na ruchu powietrza wywołanym przez różnicę gęstości i ciśnienia. W przypadku, gdy powietrze zewnętrzne posiada niższą temperaturę od temperatury powietrza wewnętrznego, a właściwie, jeśli temperatura w kanałach wentylacji grawitacyjnej jest wyższa od temperatury powietrza zewnętrznego, wtedy powstaje tzw. ciąg kominowy. Dokładnie zasady działania wentylacji grawitacyjnej, jej wady i zalety opisali Opaliński i Rabczak (2003).

2.3.3.2. Wentylacja mechaniczna

Działanie wentylacji mechanicznej opiera się na wymuszeniu wymiany powietrza przy użyciu wentylatorów. Ich zadaniem jest tłoczenie lub zasysanie powietrza za pośrednictwem odpowiednich przewodów wentylacyjnych, Jamiołkowski (2015).

Do tego rodzaju wentylacji zalicza się następujące systemy: nawiewny, wywiewny, nawiewno-wywiewny.

Wentylacja mechaniczna, zasady jej działania oraz cechy zostały scharakteryzowane przez Pełech (2011).

2.3.3.3. Wentylacja hybrydowa

Najczęściej jako wentylację hybrydową określa się układ, w którym wentylacja grawitacyjna jest wspomagana mechanicznymi urządzeniami, aby zapewnić jej wydajność na wymaganym poziomie, niezależnie od warunków atmosferycznych, a także w pewnej mierze sterowanie jej wydajnością w zależności od potrzeb.

W takich układach wentylacja naturalna wspomagana jest najczęściej wentylatorami napędzanymi energią elektryczną albo różnego typu nasadami kominowymi nakładanymi na kanały wentylacyjne.

Do zalet tego systemu można zaliczyć możliwość kontroli wielkości strumienia powietrza wentylacyjnego. Pozwala to uzyskać pewne korzyści w postaci mniejszych strat ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego. Dodatkowo daje możliwość usprawnienia wentylacji, w szczególności w okresach tzw. przejściowych i letnich, gdy ustają naturalne siły

wymuszające obieg powietrza. Do niekorzystnych cech można zaliczyć konieczność dostarczenia energii elektrycznej do napędu wentylatorów i brak możliwości odzysku ciepła.

Więcej informacji na temat instalacji wentylacji hybrydowej można znaleźć w artykule Koc (2014).

2.4. Usytuowanie obiektu

Istotnym składnikiem mogącym mieć wpływ na energooszczędność budynku jest jego usytuowanie. W szczególności warto skupić się na strefach klimatycznych, stronach świata oraz dokładnej lokalizacji w terenie.

2.4.1. Strefa klimatyczna

Na świecie wyróżnia się 5 stref klimatycznych oraz 15 typów klimatu, z czego w samej Europie występują 3 strefy klimatyczne i aż 10 typów klimatu, Peel i in. (2007)

Polska znajduje się w strefie klimatycznej umiarkowanej i w typie klimatu ciepłego przejściowego. W normie PN-EN 12831 oraz w normie PN-82/B-02403 Polska została podzielona na 5 projektowych stref klimatycznych. Dodatkowo terytorium Polski zostało podzielone na 5 stref obciążenia śniegiem zgodnie z normą PN-EN 1991-1-3:2005 oraz na 3 strefy obciążenia wiatrem zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4:2008.

Podziały te w istotny sposób wpływają na projektowanie konstrukcji oraz charakterystyczne parametry oddziaływań środowiskowych.

2.4.2. Strona świata

Istotnym składnikiem wpływającym na energooszczędność budynku jest jego usytuowanie względem stron świata.

W Polsce najlepszym wariantem usytuowania budynku energooszczędnego względem stron świata jest zorientowanie jego dłuższych ścian i połaci dachowych na południe, Wnuk (2006). Pozwala to na zmniejszenie zużycia energii konwencjonalnej i wykorzystanie odnawialnych źródeł pozyskiwania energii.

2.4.3. Lokalizacja w terenie

Wybierając lokalizację działki pod budowę budynku energooszczędnego należy kierować się miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego bądź - w przypadku jego braku - decyzją o warunkach zabudowy zgodnie z wymaganiami zawartymi w Ustawie o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym z dnia 27 marca 2003 r. Warto zwrócić uwagę także na kierunki i siłę wiatrów przeważających w danym obszarze.

Ze względu na zorientowanie największej liczby okien na elewacji południowej. Warto przed nią zasadzić drzewa liściaste, które w lecie ochronią budynek przed nadmiernym przegrzaniem, ale nie przesłonią dostępu promieniowania słonecznego do instalacji solarnych, a w zimie konary nie ograniczą dostępu słońca do budynku. Dodatkowo będą one stanowiły barierę wiatrochronną, Borucińska-Bieńkowska (2017).

2.5. Kształt i funkcja budynku

Istotnymi składnikami mającymi wpływ na energooszczędność budynku są kształt jego bryły i układ funkcjonalny. Budynki energooszczędne charakteryzuje przede wszystkim zwarta bryła.

Problem optymalizacji kształtu budynku ze względu na minimum kosztów energii, materiałów i wzniesienia budynku był podejmowany też w badaniach krajowych, Marks i Owczarek (1999).

2.5.1. Bryła budynku

Bryła budynku energooszczędnego zazwyczaj jest zwarta o niezbyt dużej powierzchni przegród zewnętrznych, dzięki czemu pozwala na ograniczenie strat ciepła. Warto zwrócić uwagę na kubaturę obiektu, aby była stosunkowo duża, co przyczyni się do wolniejszego wychłodzenia ogrzanego powietrza.

Teoretycznie najlepszym rozwiązaniem byłoby projektowanie budynków energooszczędnych w kształcie kuli bądź sześcianu, ponieważ te bryły posiadają w stosunku do swojej objętości najmniejszą powierzchnię zewnętrzną.

W związku z powyższym, budynek energooszczędny powinien być optymalnie duży, zaplanowany na planie figur geometrycznych, tj. kwadrat lub prostokąt, z dachem płaskim albo o niewielkim kącie nachylenia połaci dachowych. Przy projektowaniu tego typu budynków należy unikać rozbudowanej bryły z podcieniami, wykuszami czy lukarnami, ponieważ elementy te nadmiernie zwiększają powierzchnię przegród zewnętrznych i generują powstawanie mostków termicznych, Stachniewicz (2014).

Publikacja Parasonis i in. (2011), opisuje zależność pomiędzy kształtem budynku a jego charakterystyką energetyczną.

2.5.2. Rozmieszczenie pomieszczeń

Budynek zlokalizowany w układzie północ – południe pozwala na rozmieszczenie pomieszczeń pozytywnie wpływających na energooszczędność. Od południowej strony obiektu

należy zaplanować pomieszczenia przeznaczone na pobyt ludzi, natomiast od północnej warto rozmieścić takie pomieszczenia jak: wiatrołap, garaż, ogród zimowy, Borucińska-Bieńkowska (2017).

2.5.3. Wielkość i rozmieszczenie okien i drzwi

Okna pomimo znacznie mniejszej powierzchni niż ściany budynku mają porównywalny z nim wpływ na bilans cieplny budynku.

Obecnie dopuszczalny, maksymalny współczynnik przenikania ciepła dla okien zewnętrznych określony jest w Rozporządzeniu, (2002). Na rynku istnieją okna określane jako pasywne, dla których współczynnik ten jest dużo niższy niż wymagany przepisami.

Opis konstrukcji nowoczesnych okien wpływającą na doskonałą charakterystykę energetyczną budynku zawarł Mańko (2014).

W budownictwie energooszczędnym istotne jest również rozmieszczenie okien. Okna zlokalizowane na północną stronę powodują największe straty ciepła. Najlepiej, aby okna o dużej powierzchni zostały usytuowane w południowej elewacji, ponieważ powodowane przez nie straty rekompensowane są poprzez zyski z promieniowania słonecznego. Trzeba jednak uwzględnić, że rozmieszczenie okien to kompromis między energooszczędnością, a względami użytkowymi. Więcej informacji na temat rozmieszczenia okien znaleźć można w artykule Dąbrowska (2015).

Z kolei, współczynnik przenikania ciepła drzwi zewnętrznych ma znacznie mniejszy wpływ na energochłonność budynku niż okna. W szczególności dlatego, że ich powierzchnia jest stosunkowo mała. Kolejnym istotnym faktem jest to, że zazwyczaj drzwi zewnętrzne prowadzą do przedsionka, w którym temperatura jest niższa niż w innych pomieszczeniach. Dzięki temu tworzy się strefę buforową pozwalającą na ograniczenie strat ciepła. Istnieją jednak przypadki, w których parametry drzwi stają się istotniejsze, a mianowicie wówczas, gdy prowadzą one wprost do pomieszczeń użytkowych lub ich powierzchnia jest duża i wypełnia całą powierzchnię ściany.

Dla drzwi wewnętrznych, oddzielających pomieszczenia o tej samej lub bardzo zbliżonej temperaturze izolacyjność cieplna nie ma znaczenia. Wyjątkiem są sytuacje, w których drzwi prowadzą z pomieszczeń mieszkalnych do piwnicy lub na strych; wówczas montuje się drzwi o lepszych parametrach termoizolacyjnych. Warto zastosować drzwi o lepszej termoizolacyjności pomiędzy wiatrołapem, a resztą domu, co pozwala na zmniejszenie strat ciepła i zwiększenie komfortu cieplnego. Poglębione informacje na temat zasad rozmieszczania drzwi w budynkach zawarte są w artykule Antkiewicz (2014).

3. Charakterystyka metod optymalizacji wielokryterialnej

Wszystkie składniki wpływające na energochłonność budynków będą analizowane pod względem kryteriów: zapotrzebowania na energię końcową, kosztu, trwałości, czasu zwrotu kosztów i emisyjności CO₂. Taka analiza jest pracochłonna i wymaga opracowania odpowiedniej metody porównania i oceny składników użytych do wykonania lub modernizacji energetycznej budynków. W niniejszej pracy analizę energochłonności budynków przeprowadzono z wykorzystaniem metody optymalizacji wielokryterialnej. Poniżej przedstawiono przegląd wybranych metod optymalizacji wielokryterialnej.

3.1. Historia optymalizacji wielokryterialnej

Optymalizacja wielokryterialna jest pewną dyscypliną matematyki stosowanej, w której poszukuje się ekstremalnych wartości kryteriów projektowych. W literaturze dyscyplina ta nazywana jest również „optymalizacją Pareto”, „polioptymalizacją” lub metodą podejmowania decyzji z wieloma kryteriami (MCDM), Khan (1989), Odu i Charles-Owaba (2013).

Optymalizacja wielokryterialna polega na podejmowaniu decyzji na podstawie wielu często konkurujących lub sprzecznych kryteriów (celów). Metoda ta umożliwia wybór najlepszego rozwiązania. Możliwość konkurowania (sprzeczności) kryteriów powstaje ze względu na fakt, że poprawa jednego celu niesie za sobą szkodę dla innego, Odu i Charles-Owaba (2013).

Wielu naukowców za początek tej dyscypliny uznaje koniec XVIII wieku, czyli moment opracowania teorii użyteczności i teorii dobrobytu. Inni badacze uważają, że rozsądniej byłoby przyjmować za czas opracowania optymalizacji wielokryterialnej momenty publikacji książek Mengera w 1871 r. oraz Walrasa w 1874 r., Khan (1989).

Należy wspomnieć, że pierwotna wersja optymalizacji wielokryterialnej powstała z wykorzystaniem trzech obszarów badań: teorii równowagi ekonomicznej i dobrobytu, teorii gier oraz czystej matematyki, Marler i Arora (2004).

W początkowym okresie historii tej dziedziny za najwybitniejszego naukowca uznawany jest Vilfredo Federico Damaso Pareto. Wydane przez niego publikacje uważane są za podstawę optymalizacji wielokryterialnej, Khan (1989). Pareto (1848 - 1923) był francusko-włoskim ekonomistą. Stworzył on koncepcję optymalności w dziedzinie ekonomii opierając się na wielu celach, Mohammad (2005). Metoda Pareto-optimal front (metoda frontalna zbioru rozwiązań optymalnych Pareto) pozwala badaczom na dokonanie kompromisu między jednym celem a drugim, Kalyanmoy (2011). Pareto sformułował uniwersalną regułę 80/20 stanowiącą, że

większość efektu (80%) pochodzi z niewielkiej części przyczyn (20%) zdarzenia. Następnie Joseph M. Juran zinterpretował to jako zasadę Pareto, Odu i Charles-Owaba (2013).

Wielu naukowców uważa, że metoda podejmowania decyzji z wieloma kryteriami (MCDM) ewoluowała na dwa główne obszary, z których oba koncentrują się na podejmowaniu decyzji według kilku kryteriów: podejmowanie decyzji w wielu celach (MODM) i podejmowanie decyzji w wielu atrybutach (MADM), Zimmermann (1991).

W dziedzinie ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej stosuje się dwa główne podejścia do rozwiązania tego problemu: metody oparte na zbiorze rozwiązań optymalnych Pareto i oparte na dekompozycji, Giagkiozis i Fleming (2015).

W publikacji Dytczak (2010), autor opisał wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie. Przedstawił zasady stosowania tych metod oraz zilustrował ich użyteczność na podstawie przykładów.

Wielu badaczy stara się wkorzystać metody optymalizacji do badań budownictwa energooszczędnego. Na przykład Zhao i Du (2020), badali optymalizację konfiguracji okien i zacielenia z uwzględnieniem zużycia energii i komfortu cieplnego dla budynku biurowego. Mahdy i Nikolopoulou (2014), oceniali parametry okien pod kątem energochłonności i długoterminowej opłacalności w Egipcie. Zhang i in. (2019), przedstawili wyniki badań zależności pomiędzy typologią bloków mieszkalnych, potencjałem pozyskiwania energii słonecznej oraz efektywnością wykorzystania energii w budynku w kontekście miasta Singapur. Neofytou i in. (2020), przedstawili badania oparte na modelu wielokryterialnej analizy decyzyjnej (MCDA) w celu wspierania decydentów w opracowaniu polityki efektywności energetycznej poprzez wybór najskuteczniejszych środków technologii zrównoważonego rozwoju dla budynków w Grecji. Roulet i in. (2006), zajmowali się wielokryterialną analizą warunków zdrowotnych, komfortu oraz efektywności energetycznej budynków.

3.2. Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej

Wyróżnia się metody optymalizacji wielokryterialnej, które klasyfikowane są pod kątem artykulacji preferencji w rozwiązywaniu problemów inżynierskich:

- A. Metody z ustaleniem preferencji a priori. Metody te pozwalają użytkownikowi lub projektantowi określić preferencje, które mogą zostać wyrażone w kategoriach względnego znaczenia różnych celów. Do przykładowych metod tej grupy należy zaliczyć metodę sumy ważonej i metodę ważoną min-max.
- B. Metody artykulacji preferencji a posteriori. Zdarza się, że decydentowi trudno jest wyrazić wyraźne przybliżenie funkcji preferencji, wówczas skuteczne może stać się zezwolenie

decydentowi na rozszerzenie wyboru spośród szeregu rozwiązań. Preferencje decydenta przypuszczalnie mieszczą się w zestawie parametrów. Przykłady optymalizacji wielokryterialnej należącej do tej grupy to fizyczna metoda programowania, algorytm genetyczny, normalna metoda przecięcia granic (NBI) i normalna metoda ograniczenia (NC).

- C. Metody bez artykulacji preferencji. W większości przypadków osoba decydująca nie jest w stanie zdefiniować swoich preferencji. Ta grupa metod optymalizacji nie wymaga artykulacji preferencji. Większość metod tej grupy stanowi uproszczenia metod z uprzednim wyartykułowaniem preferencji poprzez ustawienie wszystkich wag jednakowych. Przykładowymi metodami są metoda kryterium globalnego, funkcja kompromisowa, suma celu, metoda min-max oraz iloczyn celu, Odu i Charles-Owaba (2013).

Do metod optymalizacji wielokryterialnej z ustaleniem preferencji a priori zaliczają się przede wszystkim:

1. Metoda sum ważonych (Weighted Sum Method). Metoda została wprowadzona przez Zadeh'a (1963). Metoda ta stanowi najbardziej popularne podejście do optymalizacji wielocelowej, Marler i Arora (2004). Metoda może być stosowana do rozwiązywania problemów jednowymiarowych, Triantaphyllou i in. (1998). W literaturze można odnaleźć większość ogólnych analiz, które przedstawiają podejście sumy ważonej i wskazują, że zapewnia ona optymalne rozwiązanie Pareto, Marler i Arora (2009). Wielu badaczy opracowało jednak systematyczne podejście do wybierania wag opisane na przykład przez Hwang i Yoon (1981) oraz Voogd (1983).
2. Ważona metoda min-max (Weighted min-max Method). Naukowcy opracowali możliwość zmodyfikowania ważonej metody min-max, aby złagodzić potencjał rozwiązań, które są tylko słabo optymalne w Pareto, stosując metodę rozszerzonej ważonej Tchebycheffa, Steuer i Choo (1983), Kaliszewski (1985), Romero (1998) lub zmodyfikowaną metodę ważonej Tchebycheffa, Kaliszewski (1987). Ważona metoda Tchebycheffa i jej odmiany są jedną z najpowszechniejszych metod skalaryzacji w optymalizacji wielokryterialnej. Jedną z jej głównych zalet może być fakt, że poprzez odpowiednie zróżnicowanie wag lub punktu odniesienia można wygenerować każdy niedominujący punkt ogólnego problemu optymalizacji wielokryterialnej. Obejmuje to wyraźnie problemy niewypukłe i dyskretne, które mogą mieć duży procent nieobsługiwanych punktów niedominujących. Wadą metody ważonej Tchebycheffa jest jednak to, że oprócz punktów niedominujących generowane są również punkty słabo niedominujące, Dachert i in. (2010).

3. Metoda produktu ważonego (Weighted Product Method). Metoda ta jest bardzo podobna do metody sum ważonych. Główną różnicę stanowi rodzaj działania w modelu – mianowicie, zamiast dodawania występuje mnożenie współczynników. Każda alternatywa porównywana jest z innymi poprzez pomnożenie pewnej liczby współczynników, po jednym dla każdego kryterium. Każda proporcja jest podnoszona do potęgi równej względnej wadze odpowiedniego kryterium. Metoda produktu ważonego została wprowadzona przez Bridgeman’a (1922) i była określana jako produkt mocy wag. Inni badacze, np. Gerasimov i Repko (1978), z powodzeniem zastosowali tę metodę w celu zminimalizowania ciężaru, przemieszczenia i trudność konstrukcji, gdzie powierzchnie przekroju prętów są zmiennymi projektowymi, a ograniczenia to wytrzymałość i stateczność. W przeciwieństwie do metody sum ważonych, w tej metodzie różne jednostki miary nie muszą być przekształcane w skalę bezwymiarową w procesie normalizowania. Dzieje się tak, ponieważ w tej metodzie atrybuty są łączone przez mnożenie. Wagi stają się wykładnikami powiązаныmi z każdą wartością kryterium (moc dodatnia dla kryteriów korzystnych i moc ujemna dla kryteriów niekorzystnych), Odu i Charles-Owaba (2013).
4. Metoda programowania celów (Goal Programming Method). Programowanie celów stało się jedną z najpotężniejszych i najbardziej popularnych metod teoretycznych programowania wielozadaniowego, Min i James (1991). Programowanie celów to technika oparta na programowaniu liniowym, która ma zdolność radzenia sobie z sprzecznymi celami zarówno w sposób zapobiegawczy, jak i ważony, Kogar i Sobh (2008). Wielu badaczy odegrało kluczową rolę w rozwoju różnych form metody programowania celów na przykład Charnes i in. (1955), Charnes i Cooper (1961), Ijiri (1965), Charnes i in. (1967). Charnes i Cooper (1961) przedstawili ideę metody programowania celów „Archimedes”, w której cele są określone dla każdej funkcji celu. Programowanie celów Archimedes (lub programowanie celów ważonych) stanowi wariant programowania celów, gdzie wagi przypisane są odchyleniu każdego celu od jego celu perspektywicznego, Charnes i Cooper (1977). Programowanie celów szuka sposobu, aby zbliżyć się jak najbliżej osiągnięcia celów, celem tej techniki jest zminimalizowanie sumy odchyleń dla wszystkich celów, Chen i Shyu (2006).

Istnieją dwa przypadki metod programowania celów:

- (1) Nie wywłaszczające programowanie celów: w tym przypadku nie jest możliwe osiągnięcie wszystkich celów ze względu na ich spreczny charakter oraz z uwagi na fakt, że wszystkie cele mają w przybliżeniu porównywalne znaczenie, a wszystkie lub

niektóre odpowiedzi będą miały odchylenia od ich wartości docelowych, Odu i Charles-Owaba (2013).

- (2) Prewencyjny model programowania celów: podstawowe założenia opierają się raczej na „satysfakcjonowaniu” niż na „optymalizacji”. Zamiast minimalizować lub maksymalizować różne funkcje celu, metoda określa warunki osiągnięcia wcześniej określonych celów, Verma i in. (2009).

Do metod optymalizacji wielokryterialnej z artykulacją preferencji a posteriori przede wszystkim zaliczają się:

1. Programowanie fizyczne (Physical Programming). Metoda została opracowana przez Messac'a (1996). Programowanie fizyczne odwzorowuje ogólne klasyfikacje celów i zadań oraz werbalnie wyrażane preferencje do funkcji użyteczności. Zapewnia sposób włączania preferencji bez konieczności używania względnych wag. Uwzględniane są funkcje celu, ograniczenia i cele równoważnie z metrykami projektowymi. Messac i in. (2001), dowiedli, że programowanie fizyczne zapewnia wystarczający warunek optymalności Pareto. Ponadto, Messac i Mattson (2002), wskazują sposób w jaki programowanie fizyczne może być używane jako warunek konieczny dla optymalności Pareto, zapewniając wszystkie punkty optymalne Pareto, Odu i Charles-Owaba (2013).
2. Metoda normalnego przecięcia granic (Normal Boundary Intersection Method). Metoda ta pozwala zapewnić środki do uzyskania równomiernego rozkładu punktów optymalnych Pareto dla spójnej zmienności wektora parametrów wag, Das (1999), Das i Dennis (1998), nawet przy niewypukłym zbiorze optymalnym Pareto (stwierdzony niedobór w metodzie sum ważonych). W celu znalezienia optymalnego punktu dla parametru metoda jest rozwiązywana dla każdej wagi, gdy wynik przecina się z kryteriami dopuszczalnej granicy przestrzeni. Jednak w przypadku problemów niewypukłych niektóre rozwiązania mogą być nieoptymalne w sensie Pareto, Mohammad (2005).
3. Metoda ograniczenia normalnego (NC). Metoda wykorzystuje znormalizowane funkcje celu z filtrem Pareto, aby wyeliminować rozwiązania optymalne inne niż Pareto, Messac (2003). Indywidualne minimum dla znormalizowanych funkcji celu służą do konstruowania wierzchołków hiperpłaszczyzny idealnego rozwiązania. Dobry przykład równomiernie rozłożonych punktów na hiperpłaszczyźnie idealnego rozwiązania można znaleźć z liniowej kombinacji wierzchołków o konsekwentnie zmieniających się wagach w przestrzeni kryteriów. Każdy punkt optymalny w Pareto znajduje się rozwiązując każdą oddzielną znormalizowaną funkcję pojedynczego celu z dodatkowymi ograniczeniami nierówności dla pozostałych znormalizowanych funkcji celu, Mohammad (2005).

Do metod optymalizacji wielokryterialnej bez artykulacji preferencji przede wszystkim zaliczają się:

1. Metoda kryterium globalnego (Global Criterion Method). Celem tej metody jest zminimalizowanie funkcji, która definiuje globalne kryterium, które jest miarą odległości do idealnego rozwiązania, Umarusman i Turkmen (2013). Metodę kryterium globalnego po raz pierwszy przedstawili Yu (1973) i Zeleny (1973), a następnie została rozszerzona i przyjęta w obecnej formie przez Hwang'a i Masud'a (1979). W kolejnych latach Shih i Chang (1995) przedstawili globalną metodę kryterialną za pomocą logiki rozmytej, aby uzyskać rozwiązania dla wielokryterialnego ostrego lub rozmytego projektu strukturalnego. Freitas Gomes i in. (2012), przedstawili metodę globalnych kryteriów opartą na głównych komponentach jako alternatywę do optymalizacji procesów produkcyjnych z wieloma skorelowanymi odpowiedziami. Wielu badaczy również przeprowadzało badania teoretyczne dotyczące metody kryterium globalnego, w tym między innymi: Mahapatra (2009), Costa i Pereira (2010), Saraj i Safaei (2012) oraz Umarusman i Türkmen (2013), Arsu i Umarusman (2020).
2. Metoda Min - Max (Min – Max Method). Problemy optymalizacji min-max były badane przez wiele dziesięcioleci, Wald (1945), a większość proponowanych metod zakłada dostęp do informacji pierwszego rzędu w celu znalezienia lub przybliżenia niezawodnych rozwiązań. Wśród badaczy zajmujących się tą metodą należy wymienić przede wszystkim: Nesterov (2007), Gidel i in. (2017), Hamedani i in. (2018), Qian i in. (2019), Rafique i in. (2018), Sanjabi i in. (2018). W odróżnieniu od optymalizacji standardowej, optymalizacja min-max zajmuje się kompozycją problemu wewnętrznej maksymalizacji i problemu minimalizacji zewnętrznej, Liu i in. (2020). W publikacji Booranawong i in. (2020), zastosowali metodę min-max do określania nieznanego położenia oraz zbadali ograniczenia tej metody.

W celu poznania większej liczby metod optymalizacji można wykorzystać publikacje: Tiainen i in. (2012), Turskis i in. (2009), Stadnicki (2006), Veldhuizen i Lamont (1998), Zitzler (1999), Zitzler i Thiele (1999).

W literaturze nie są jednak znane publikacje wykorzystujące wprost metody optymalizacji wielokryterialnej do oceny wpływu zbioru wielu składników na energochłonność budynku.

3.3. Charakterystyka metod doboru wag kryteriów

Optymalizacja związana jest z minimalizacją lub maksymalizacją funkcji w celu znalezienia ekstremum tej funkcji. Optymalizacja wielokryterialna opiera się na kilku funkcjach celu - kryteriach. Wiele metod optymalizacji wielokryterialnej wykorzystuje wagi kryteriów. Wagi stanowią istotną część opisu preferencji decydenta, a proces doboru wag kryteriów może wówczas stwarzać pewne problemy związane z nieobiektywnością oceny. W literaturze opisanych zostało wiele metod subiektywnych, obiektywnych oraz integracyjnych szacowania wskaźników wagowych, których zadaniem jest ułatwienie decydentowi tej części procesu analizy preferencji, Brzostowski i Roszkowska (2014), Tzeng i in. (1998).

W artykule Choo i in. (1999), przedstawiono przegląd różnych metod oceny wag kryteriów, które są następnie bezpośrednio wykorzystywane do agregowania wyników priorytetów specyficznych dla tych kryteriów. Zatem prawdziwe znaczenie i ważność tych wag kryterialnych są kluczowe, aby uniknąć niewłaściwego wykorzystania modeli wielokryterialnych metod podejmowania decyzji. Niestety wagi kryteriów są często błędnie rozumiane i niewłaściwie stosowane a zatem nie ma powszechnej zgody co do ich znaczenia.

Roberts i Goodwin (2002) w swojej publikacji dokonali przeglądu badań, w których omówione zostały zalety oraz wady poszczególnych metod wyznaczania wag kryteriów. Autorzy rozważanych analiz stwierdzają, że wartości wag kryterialnych są w istotny sposób uwarunkowane sposobami ich wyznaczania. Ponadto, nie ma zgody co do najlepszej metody wyznaczania wag kryteriów ani co do metody bezpośredniego wyznaczania „rzeczywistego” zestawu wag. W literaturze panuje jednak zgoda co do tego, że wagi obliczone określonymi metodami są dokładniejsze od wag uzyskanych metodami bezpośredniego przypisywania wag w oparciu o eksperckie zrozumienie znaczenia kryteriów.

Zaproponowano kilka podejść metodologicznych określania wag kryteriów związanych z sytuacjami decyzyjnymi. Po pierwsze, istnieją metody wymagające mniejszej ilości informacji na temat względnej ważności kryteriów oceny. Po drugie, istnieją metody przeprowadzające analizę wrażliwości wag w celu wykazania stabilności wyników, pomagając decydentom w wyrażaniu własnego osądu. Metody te uwzględniają fakt, że każda sytuacja decyzyjna ma pewne szczególne cechy, niezależne od sposobu myślenia decydenta.

Bardziej obiektywne podejście polega na określeniu wag bez interwencji decydenta. Stwierdzenie zapisane przez Zeleny (1982), że „Ważność atrybutu jest w równym stopniu właściwością atrybutu, jak i decydenta”, wskazuje na fakt, że atrybuty można postrzegać jako

źródła informacji, a wagi ważności odzwierciedlają ilość informacji zawartej w każdym z nich, Diakoulaki i inni (1995).

Ostatnio powszechnie stosuje się w tym celu metody ilościowe (Ginevičius, Podvezko, 2001). Składają się one z kilku stosunkowo prostych podejść opartych na:

- całkowitym rankingu wszystkich kryteriów – najprostsza metoda, w której ustala się ranking analizowanych kryteriów według wartości każdego wskaźnika cząstkowego;
- metodzie addytywnego ważenia SAW (Simple Additive Weighting) – procedura wieloatrybutowa oparta na koncepcji sumowania ważonego, Ibrahim, Surya (2019), polegająca na znalezieniu ważonej sumy wyników każdej alternatywy dla każdego atrybutu.

Stosowane są również bardziej skomplikowane podejścia:

- TOPSIS – metoda zaproponowana przez Hwanga i Yoona w 1981. Główną ideą tej metody jest wykorzystanie dwóch punktów referencyjnych: rozwiązania idealnego (nazywanego również pozytywnym idealnym rozwiązaniem – PIS) oraz rozwiązania antyidealnego (nazywanego również negatywnym idealnym rozwiązaniem – NIS), jako punktów odniesienia dla rozważanych wariantów decyzyjnych. Rozwiązanie (wariant) optymalny, które powinno zostać wybrane jest to, które jednocześnie ma najmniejszą odległość do PIS i największą odległość do NIS, Kacprzak (2018);
- VICOR (Vise Kriterijumska Optimizajica i Kompromisno Resenje). Metoda została po raz pierwszy wprowadzona przez Serafima Opricovica w 1998 r. Stosowana jest jako jedna z wielokryterialnych metod podejmowania decyzji na podstawie najlepszego rozwiązania otrzymanego z najbliższego idealnego rozwiązania. Następnie etapy rankingu polegają na porównaniu odległości do idealnego rozwiązania. W metodzie VIKOR stosuje się normalizację liniową, której celem jest uzyskanie najlepszego rozwiązania, Mesran i inni (2019).

Metody te są jednak wrażliwe na zmienność danych początkowych i złożoną ocenę proporcjonalną. Proste podejścia opierają się na jednolitych kryteriach maksymalizowanych, gdy wartość maksymalna jest najlepsza, podczas gdy bardziej zaawansowane metody wykorzystują zarówno kryteria maksymalizowane, jak i minimalizowane, dla których wartość minimalna jest uważana za najlepszą, Ginevičius i Podvezko (2001).

Ocena konsekwencji dokonanego wyboru wag odgrywa bardzo ważną rolę w procesie podejmowania decyzji. W publikacji Jaroszewicz (2017), Autorka zaznacza, że wagi kryteriów określają względną ważność prawdopodobnych konsekwencji wyboru lepszych wartości

atrybutu kryterium nad spodziewanymi konsekwencjami wybrania lepszych wartości kryterium.

Biorąc pod uwagę konieczność zobiektywizowania wartości wag kryteriów w rozprawie zaproponowano sposób doboru wag za pomocą wprowadzonego współczynnika wpływu wartości wskaźnika kryterium na wartość wagi.

4. Charakterystyka kryteriów oceny energochłonności budynku

Kryteria analizy muszą być rozpatrywane w odniesieniu do konkretnego rodzaju budynku referencyjnego w przypadku rozwiązań modernizacyjnych lub budynku bazowego w przypadku rozwiązań projektowych, których cechy i parametry określają wartości wskaźników wyznaczanych na podstawie tych kryteriów.

W proponowanej metodzie oceny energochłonności budynków przyjęto pięć kryteriów optymalizacji: energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu nakładu inwestycyjnego dla budynku referencyjnego lub liczbę cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego dla budynku bazowego i emisję dwutlenku węgla. Wszystkie kryteria oprócz kryterium trwałości związane są z zużyciem energii końcowej.

W metodyce obliczania zapotrzebowania na energię dla budynku, Rozporządzenie (2015), określono trzy kategorie energii: użytkową, końcową i pierwotną. Kategorie te są ze sobą powiązane, ale jako pierwsze oblicza się zapotrzebowanie na energię użytkową. Energia użytkowa to energia wynikająca bezpośrednio z bilansu energetycznego budynku. W określaniu wartości tej energii brane są pod uwagę straty i zyski ciepła budynku, a także zapotrzebowanie na przygotowanie ciepłej wody użytkowej. Energia końcowa uwzględnia dodatkowo względem energii użytkowej również sprawność instalacji ogrzewania w budynku. Energia końcowa jest to całkowita ilość energii jaką należy dostarczyć w paliwie lub z zewnętrznej instalacji ciepłowniczej. Energia pierwotna uwzględnia obciążenie środowiska energią nieodnawialną lub użycie źródeł odnawialnych. Każdemu z tych trzech kategorii energii przypisany jest wskaźnik na jednostkę powierzchni użytkowej budynku.

Wymagania techniczne stawiane budynkom opierają się na wskaźniku energii pierwotnej i stanowią podstawę do wykazania stopnia zgodności z aktualnymi przepisami i ograniczeniami zużycia energii. Jednakże poziomem energii jaki odpowiada realnemu zapotrzebowaniu na energię jest energia końcowa. Dlatego energia końcowa została przyjęta w niniejszej pracy jako podstawowe kryterium analizy. Kryterium to jest również związane z kryterium kosztów, kryterium czasu zwrotu / liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego i kryterium emisji dwutlenku węgla, których obliczenie odbywa się na podstawie energii końcowej. Przyjmowanie energii końcowej jako podstawy analizy zapewnia spójność tych czterech kryteriów.

Zgodnie z zapisami Rozporządzenia (2015), względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową to energia dostarczana do budynku w odniesieniu do powierzchni budynku. Jest to energia, która uwzględnia zarówno potrzeby budynku wynikające z jego bilansu cieplnego, jak i sprawności systemów grzewczych.

4.1. Budynek referencyjny (bazowy)

W celu przeprowadzenia analizy energochłonności przyjęto budynek referencyjny (bazowy) o następujących charakterystycznych parametrach wyspecyfikowanych w Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Charakterystyczne parametry obiektu referencyjnego (bazowy).

Parametry			
Funkcjonalne i Konstrukcyjne	1.1. Ogólne	1.1.1.	Rodzaj budynku (mieszkalny, użyteczności publicznej itp.)
		1.1.2.	Charakter użytkowania budynku (jednorodzinny, wielorodzinny itd.)
		1.1.3.	Czas wybudowania (nowy, modernizowany)
		1.1.4.	Liczba kondygnacji (L_k)
		1.1.5.	Rodzaj i liczba pomieszczeń
		1.1.6.	Powierzchnia użytkowa (A_u)
		1.1.7.	Kubatura całkowita (V)
		1.1.8.	Kubatura pomieszczeń (V_p)
		1.1.9.	Powierzchnia podłogi na gruncie
		1.1.10.	Powierzchnia dachu
		1.1.11.	Obmiar budynku wymagany do ustalenia ilościowych wartości dla materiałów warstwy konstrukcyjnej, warstwy izolacyjnej oraz instalacji
	1.2. Usytuowanie	1.2.1.	Lokalizacja
		1.2.2.	Usytuowanie względem stron świata
	1.3. Konstrukcja nośna i warstwy izolacyjne	1.3.1.	Grubości poszczególnych warstw – konstrukcyjnej oraz izolacyjnej
		1.3.2.	Współczynniki przewodności cieplnej dla wszystkich użytych materiałów (λ)
		1.3.3.	Współczynniki przenikania ciepła (U) dla wszystkich przegród budowlanych o powierzchni (A_p)
2. Urządzenia i Instalacje	2.1. Ogrzewanie	2.1.1.	Rodzaj źródła ciepła
		2.1.2.	Rodzaj instalacji, grzejników i regulacji
		2.1.3.	Parametry systemu ogrzewczego
		2.1.4.	Grubość izolacji termicznej przewodów grzewczych
		2.1.5.	Rodzaj systemu ogrzewczego – urządzenia przesyłu ciepła
		2.1.6.	Lokalizacja zbiornika buforowego i jego pojemność
	2.2. Ciepła woda użytkowa	2.2.1.	Rodzaj źródła ciepła
		2.2.2.	Temperatura ciepłej wody użytkowej i rodzaj przepływu
		2.2.3.	Grubość izolacji termicznej przewodów wodociągowych
		2.2.4.	Rodzaj systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej
		2.2.5.	Zasobnik ciepłej wody użytkowej w systemie przygotowania ciepłej wody użytkowej
		2.2.6.	Lokalizacja zasobnika ciepłej wody użytkowej i jego pojemność

	2.3. Chłodzenie	2.3.1.	Rodzaj systemu chłodzenia
		2.3.2.	Parametry zbiornika buforowego i jego usytuowanie
		2.3.3.	Rodzaj urządzenia przesyłu chłodu
		2.3.4.	Rodzaj instalacji i jej wyposażenie
	2.4. Oświetlenie	2.4.1.	Rodzaj instalacji oświetlenia
		2.4.2.	Parametry instalacji oświetlenia
		2.4.3.	Podział stref oświetlenia
	2.5. Systemy techniczne	2.5.1.	System ogrzewania (pompy obiegowe, nadmuchy powietrza w kotle, urządzenia mechanicznej regulacji zacinienia okien itp.)
		2.5.2.	System przygotowania ciepłej wody użytkowej (pompy cyrkulacyjne, pompy ładujące zasobnik itp.)
		2.5.3.	System chłodzenia (wentylatory tłoczące powietrze w skraplaczu i parowniku klimatyzacji itp.)

4.2. Względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową

Względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową E_i [kWh/m²/rok] zastosowanego składnika $\{i\}$ ze zbioru składników rozwiązania materiałowego, konstrukcyjnego lub instalacyjnego wpływających na energochłonność budynku, określana jest dla danego składnika w budynku referencyjnym (bazowym) w następujący sposób:

$$E_i = \frac{Q_i}{A_u} , \quad (4.1)$$

gdzie: Q_i [kWh/rok] – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku referencyjnego (bazowego) wyodrębniona dla każdego zastosowanego składnika $\{i\}$, przy założeniu ustalonych parametrów rocznego zapotrzebowania na energię końcową dla pozostałych systemów technicznych (materiałowego, konstrukcyjnego, instalacyjnego), A_u [m²] – powierzchnia użytkowa budynku, Rozporządzenie (2015).

Roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku dla każdego zastosowanego składnika $\{i\}$ określa się jako sumę zapotrzebowania energii końcowej dla systemu ogrzewania ($Q_{H,i}$), systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej ($Q_{W,i}$), systemu wbudowanej instalacji oświetlenia ($Q_{L,i}$) oraz opcjonalnie dla systemu chłodzenia ($Q_{C,i}$) i systemów technicznych ($E_{TS,i}$), Rozporządzenie (2015):

$$Q_i = Q_{H,i} + Q_{W,i} + Q_{L,i} + \langle Q_{C,i} \rangle + \langle E_{TS,i} \rangle . \quad (4.2)$$

Roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku dla systemu ogrzewania oblicza się następująco:

$$Q_{H,i} = \frac{Q_{uH}}{\eta_{Htot}} |_{,i} , \quad (4.3)$$

gdzie: Q_{uH} określa roczne zapotrzebowanie na energię użytkową, a η_{Htot} jest sprawnością całkowitą systemu ogrzewania.

Sprawność całkowita η_{Htot} jest definiowana jako iloczyn czterech sprawności: wytwarzania η_{Hg} , regulacji η_{He} , przesyłania η_{Hd} i akumulacji η_{Hs} ciepła:

$$\eta_{Htot} = \eta_{Hg}\eta_{He}\eta_{Hd}\eta_{Hs} . \quad (4.4)$$

Roczne zapotrzebowanie energii użytkowej na ogrzewanie Q_{uH} [kWh/rok] obliczane jest z bilansu energetycznego budynku zestawianego w okresach miesięcznych, przy założeniu, że w obliczaniu zapotrzebowania na ogrzewanie nie bierze się pod uwagę miesięcy letnich, tj. np. w Polsce – czerwca, lipca, sierpnia $6 \leq m \leq 8$:

$$Q_{uH} = \sum_{\substack{1 \leq m \leq 5 \\ 9 \leq m \leq 12}} Q_{uH,m} . \quad (4.5)$$

Miesięczne zapotrzebowanie energii użytkowej na ogrzewanie $Q_{uH,m}$ [kWh/miesiąc] oblicza się następująco:

$$Q_{uH,m} = Q_{tr} + Q_{ve} - \eta(Q_{sol} + Q_{int}) , \quad (4.6)$$

gdzie: Q_{tr} – ciepło wymieniane przez przenikanie, Q_{ve} – ciepło wymieniane przez wentylację, Q_{sol} – zyski ciepła słoneczne, Q_{int} – zyski ciepła wewnętrzne, η – współczynnik wykorzystania zysków ciepła.

Ilość ciepła wymienianego przez przenikanie Q_{tr} [kWh/miesiąc], Rozporządzenie (2015), Paraschiv i in. (2020), w okresie t godzin każdego miesiąca zależy od współczynnika strat mocy cieplnej przez przenikanie przez wszystkie przegrody zewnętrzne H_{tr} oraz różnicy temperatur pomiędzy środowiskiem wewnętrznym T_{int} i zewnętrznym T_{ext} i wyznaczane jest w następujący sposób:

$$Q_{tr} = \frac{H_{tr}(T_{int}-T_{ext})}{1000} t . \quad (4.7)$$

Temperaturę wewnętrzną T_{int} przyjmuje się stałą w ciągu całego roku, dla większości pomieszczeń jest to 20°C. Temperatura zewnętrzna T_{ext} jest określana na podstawie danych meteorologicznych. Przykładowo, w Polsce dla Warszawy temperatury zewnętrzne w kolejnych miesiącach można odnaleźć na stronie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, (strona internetowa IMiGW, 07.11.2021).

Współczynnik strat mocy cieplnej przez przenikanie H_{tr} [W/K] przez wszystkie przegrody zewnętrzne, Rozporządzenie (2015), oblicza się następująco:

$$H_{tr} = \sum_{p=1}^P [b_{tr,p}(U_p A_p + \sum_{p_m=1}^{P_m} l_{p_m} \psi_{p_m})] , \quad (4.8)$$

gdzie: $b_{tr,p} = 1$ – współczynnik redukcyjny obliczeniowej różnicy temperatur $p = 1, P$ przegrody zewnętrznej, U_p [W/m²K] – współczynnik przenikania ciepła przegrody budowlanej,

A_p – powierzchnia zewnętrznej przegrody budowlanej, l_{p_m} – długość $p_m = 1, P_m$ mostka cieplnego w przegrodzie budowlanej, ψ_{p_m} – współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego przyjęty według PN-EN ISO 14683:2008.

Współczynnik przenikania ciepła U_p , PN EN 6946 (2017), jest odwrotnością współczynnika oporu cieplnego materiału przegrody budowlanej R_p [m²K/W]:

$$U_p = R_p^{-1} . \quad (4.9)$$

Współczynnik oporu cieplnego materiału przegrody budowlanej R_p jest obliczany w zróżnicowany sposób w zależności od rodzaju przegrody. W przypadku ściany warstwowej składającej się z $j = (1, J)$ warstw, opór cieplny wynosi:

$$R_p = R_{s,int} + \sum_{j=1}^J \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{s,ext} , \quad (4.10)$$

gdzie: d_j – grubość warstwy, λ_j [W/mK] współczynniki przewodzenia ciepła materiału warstwy przyjmowane na podstawie danych producentów materiałów budowlanych, $R_{s,int}$ i $R_{s,ext}$ – współczynniki przejmowania ciepła odpowiednio od strony zewnętrznej i wewnętrznej określone na przykład według normy, PN EN 52016 (2016), a także normy, PN EN 6946 (2017).

Ciepło wymieniane przez wentylację Q_{ve} [kWh/miesiąc], Kurtz i Gawin (2009), Żarski (2010), w okresie t godzin każdego miesiąca oblicza się według formuły:

$$Q_{ve} = \frac{H_{ve}(T_{int} - T_{ext})}{1000} t , \quad (4.11)$$

gdzie: H_{ve} – współczynnik strat ciepła przez wentylację.

Współczynnik strat ciepła przez wentylację H_{ve} [W/K] oblicza się następująco:

$$H_{ve} = \rho c_p (q_{v,1} + q_{v,2}) , \quad (4.12)$$

gdzie: $\rho c_p = 0.34$ m³/h – pojemność cieplna powietrza, $q_{v,1}$ i $q_{v,2}$ – podstawowy i infiltrujący strumień wymieniany przez wentylację.

Podstawowy strumień wentylacji $q_{v,1}$ [m³/h] jest wielkością projektowaną dla danego budynku i może być wyznaczony z norm dotyczących wentylacji. Można go też przedstawić w funkcji krotności wymian powietrza w ciągu godziny n_v [1/h] i kubatury budynku V [m³]:

$$q_{v,1} = n_v V . \quad (4.13)$$

Dla budynków mieszkalnych i biurowych można przyjmować krotność wymian powietrza w zakresie $n_v = (0.3, 1.0)$.

Strumień infiltrujący przepływa do budynku poprzez nieszczelności w jego obudowie. W przypadku braku przeprowadzonej dokładnej próby szczelności budynku można go obliczyć jako ułamek kubatury budynku:

$$q_{v,2} = 0.2V . \quad (4.14)$$

Natomiast jeśli współczynnik szczelności budynku n_{50} jest znany to strumień infiltrujący oblicza się jako:

$$q_{v,2} = 0.05n_{50}V . \quad (4.15)$$

Zyski ciepła słoneczne Q_{sol} [kWh/miesiąc], Levison i Akbari (2010), Levison i in. (2010), Levison i in. (2005), są generowane w okresie każdego miesiąca przez promieniowanie słoneczne przez przegrody przeźroczyste i mogą być opisane równaniem:

$$Q_{sol} = IA_{tp}Cg , \quad (4.16)$$

gdzie: I – energia promieniowania słonecznego w miesiącu wg danych klimatycznych [kWh/m²/miesiąc], A_{tp} – powierzchnie przegród przeźroczystych, C – udział powierzchni szyby w całkowitej powierzchni okna/drzwi, g – współczynnik przepuszczania promieniowania słonecznego przez przegrody przeźroczyste, Życzyńska i Dyś (2016).

Zyski ciepła wewnętrzne Q_{int} [kWh/miesiąc], Carlander i in. (2020), generowane są w okresie t godzin każdego miesiąca przez wszystkie obiekty nie będące częścią systemu grzewczego oraz przez osoby przebywające w budynku. Zyski te można obliczyć na podstawie rzeczywistej mocy takich urządzeń jak kuchnie, pralki oraz osób albo w sposób zryczałtowany na podstawie normowych współczynników q określających moc zysków ciepła wewnętrznego na jednostkę powierzchni użytkowej A_u :

$$Q_{int} = qA_ut , \quad (4.17)$$

gdzie: q – jednostkowy zysk ciepła wewnętrznego zależny od rodzaju budynku – przykładowo: $q = 6.8 \frac{W}{m^2}$ dla budynku jednorodzinnego, $q = 12 \frac{W}{m^2}$ dla budynku oświatowego, Kaczmarzyk i in. (2020).

Współczynnik wykorzystania zysków ciepła η obliczamy dla każdego miesiąca w następujący sposób:

$$\eta = \begin{cases} \frac{1-\gamma_h^{a_h}}{1-\gamma_h^{1+a_h}} & \text{jeżeli } \gamma_h \neq 1 \\ \frac{a_h}{1+a_h} & \text{jeżeli } \gamma_h = 1 \end{cases} , \quad (4.18)$$

gdzie:

$\gamma_h = \frac{Q_{sol} + Q_{int}}{Q_{tr} + Q_{ve}}$ – proporcja zysków do strat ciepła, $a_h = a_{h,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}$, $a_{h,0} = 1$, $\tau = \frac{C_m}{H_{tr} + H_{ve}}$, $\tau_{H,0} = 15$ godz., C_m – pojemność cieplna budynku przyjmowana jako pojemność cieplną wewnętrzną warstwy o grubości 0.10 m ściany zewnętrznej budynku.

Roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną dla systemu przygotowania CWU oblicza się następująco:

$$Q_{W,i} = \frac{Q_{uW}}{\eta_{Wtot}} |_{,i} , \quad (4.19)$$

gdzie: Q_{uW} określa roczne zapotrzebowanie na energię użytkową systemu przygotowania CWU, a η_{Wtot} jest sprawnością całkowitą systemu przygotowania CWU.

Sprawność całkowitą η_{Wtot} jest definiowana jako iloczyn czterech sprawności: wytwarzania η_{Wg} , regulacji η_{We} , przesyłania η_{Wd} i akumulacji η_{Ws} ciepła:

$$\eta_{Wtot} = \eta_{Wg} \eta_{We} \eta_{Wd} \eta_{Ws} . \quad (4.20)$$

Roczne zapotrzebowanie na ciepło do energii użytkową do systemu przygotowania CWU Q_{uW} [kWh/rok] oblicza się następująco, Rozporządzenie (2015):

$$Q_{uW} = \frac{V_W A_u \rho_W c_W (T_W - T_0) k_r t_r}{3600} , \quad (4.21)$$

gdzie: V_W – jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na CWU, $\rho_W = 1$ kg/dm³ – gęstość i $c_W = 4.19$ kJ/kg/K – ciepło właściwe wody, $T_W = 55$ °C – temperatura wody ciepłej, $T_0 = 10$ °C – temperatura wody zimnej, k_r – współczynnik korekcyjny ze względu na przerwy w użytkowaniu CWU, $t_r = 365$ dni – liczba dni w roku, Rozporządzenie (2015).

Roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną dla systemu oświetlenia oblicza się następująco:

$$Q_{L,i} = \frac{Q_{uL}}{\eta_{Ltot}} |_{,i} , \quad (4.22)$$

gdzie: Q_{uL} określa roczne zapotrzebowanie na energię użytkową dla systemu oświetlenia, a $\eta_{Ltot} = 1$ jest sprawnością całkowitą systemu oświetlenia.

Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową dostarczaną do systemu oświetlenia Q_{uL} [kWh/rok] oblicza się z uwzględnieniem podziału na strefy oświetlenia, obliczany jest w następujący sposób, PN EN 15193-1 (2017):

$$Q_{uL} = \sum_{n=1}^N Q_{uL,n} A_n , \quad (4.23)$$

gdzie: N – liczba stref oświetlenia o powierzchni A_n i zróżnicowanych parametrach użytkowych, a $Q_{uL,n}$ – wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową na jednostkę powierzchni do systemu oświetlenia w każdej strefie [kWh/(m²rok)]

$$Q_{uL,n} = F_{cn} \frac{P_n}{1000} F_{0n} (t_{Dn} F_{Dn} + t_{0n}) + Q_{min,1} + Q_{min,2} , \quad (4.24)$$

gdzie: F_{cn} – współczynnik natężenia oświetlenia, P_n – gęstość mocy oświetlenia [W/m^2], F_{0n} – współczynnik wykorzystania powierzchni, F_{Dn} – współczynnik wykorzystania światła dziennego, t_{Dn} – sumaryczny roczny czas światła dziennego [godz.], t_{0n} – sumaryczny roczny czas braku światła dziennego [godz.], $Q_{min,1}=1.0$ kWh/(m^2 rok) - domyślna wartość energii w trybie czuwania dla ładowania akumulatora, $Q_{min,2}=1.5$ kWh/(m^2 rok) – domyślna wartość energii w trybie czuwania dla sterowania.

W niniejszej pracy przyjęto założenie, że rozważane rodzaje budynków referencyjnych (bazowych) nie będą dotyczyć budynków przemysłowych z zainstalowanymi systemami chłodzenia i systemami technicznymi. Zatem w pracy nie przedstawiono szczegółowych rozważań dotyczących obliczania zapotrzebowania energii końcowej dla systemów chłodzenia $Q_{KC,i}$ i systemów technicznych $E_{TS,i}$. Założenia obliczeniowe do określania zapotrzebowania energii końcowej dla tych systemów można znaleźć w publikacjach Kurtz i Gawin (2009), i Żarski (2010).

4.3. Koszt

Podstawową kwestią dotyczącą oszacowania kosztów jest wybór kosztów częściowych stanowiących o całkowitym koszcie C_i [zł] każdego składnika $\{i\}$ ze zbioru składników wpływających na energochłonność budynku, poniesionym w całym projektowanym okresie użytkowania obiektu budowlanego T_{blc} . Ten okres obliczeniowy może być również określany jako cykl życia budynku.

Do kosztów częściowych należy zaliczyć koszty początkowe (inwestycyjne), koszty użytkowania – eksploatacyjne, koszty utrzymania i możliwe koszty rozbiórki oraz utylizacji, Arendt i in. (2015).

W związku z powyższym jako całkowity koszt każdego składnika należy uznać koszty początkowe $C_{st,i}$ i koszty długotrwałe $C_{lt,i}$:

$$C_i = C_{st,i} + C_{lt,i} . \quad (4.25)$$

Koszty początkowe (określane jako koszty nabycia) tworzą koszty zakupu wraz z kosztem dostawy na miejsce budowy $C_{p,i}$ oraz koszty wbudowania wraz z ewentualnymi kosztami projektu wbudowania $C_{b,i}$:

$$C_{st,i} = C_{p,i} + C_{b,i} . \quad (4.26)$$

W niniejszej pracy wszystkie koszty początkowe zastosowanego składnika $\{i\}$ obliczane są jako iloczyn średniej rynkowej ceny jednostkowej rozwiązania materiałowego,

konstrukcyjnego lub instalacyjnego c_i [zł / jednostka obmiaru] i jednostki obmiaru $n_{c,i}$ (np. sztuk, m², m³) tego składnika:

$$C_i = c_i n_{c,i} . \quad (4.27)$$

Na rynku lokalnym producenci podają ceny jednostkowe danego rozwiązania materiałowego, konstrukcyjnego lub instalacyjnego jako sumę kosztów bezpośrednich, pośrednich i zysku. Oszacowanie kosztów dokonano na podstawie analizy danych rynkowych.

Koszty długotrwałe tworzą koszty eksploatacji $C_{e,i}$ i utrzymania netto $C_{m,i}$ oraz ewentualne koszty rozbiórki i utylizacji $C_{d,i}$ po stwierdzeniu nieopłacalności dalszej eksploatacji i modernizacji:

$$C_{lt,i} = C_{e,i} + C_{m,i} + C_{d,i} . \quad (4.28)$$

Koszty eksploatacji $C_{e,i}$ w okresie obliczeniowym T_{blc} określa się na podstawie zależności:

$$C_{e,i} = T_{blc} E_i C_E , \quad (4.29)$$

gdzie: E_i – energia końcowa określana dla danego składnika w budynku referencyjnym (bazowym) [kWh/(m²rok)], C_E – koszt jednostkowy energii [zł/kWh].

Koszt jednostki C_E energii przyjmowany jest na podstawie średniej ceny podawanej przez dostawców różnych rodzajów energii i przeliczany jednostkę mocy energii w kWh. W drugim kwartale 2024 roku cena rynkowa energii wynosiła $C_E=570,52$ zł/ MWh (wg Urzędu Regulacji Energetyki, strona internetowa, 14.09.2024).

Koszty utrzymania netto $C_{m,i}$ oblicza się na podstawie następującej zależności:

$$C_{m,i} = C_{mg,i} - C_{mw,i} , \quad (4.30)$$

gdzie: $C_{mg,i}$ – koszt utrzymania brutto składnika $\{i\}$ w okresie obliczeniowym, $C_{mw,i}$ – wartość gwarancji wykonawcy składnika $\{i\}$.

Koszt utrzymania brutto w okresie obliczeniowym oblicza się według wzoru:

$$C_{mg,i} = C_{mr,i} N_{c,i} , \quad (4.31)$$

gdzie: $C_{mr,i}$ – koszt wymiany, $N_{c,i}$ – projektowana liczba cykli użytkowania okresie obliczeniowym.

Wartość gwarancji wykonawcy oblicza się według wzoru:

$$C_{mw,i} = C_{mg,i} \frac{T_{w,i}}{T_{blc}} , \quad (4.32)$$

gdzie: $T_{w,i}$ – okres gwarancji [rok].

Dokładną metodologię obliczania kosztów początkowych opisuje Rozporządzenie (2021). Proponowany sposób określania kosztów odpowiada klasyfikacji kosztów przedstawionej w Rozporządzeniu (2021).

4.4. Trwałość

Trwałość D_i [rok] jest to okres, w którym rozwiązanie materiałowe, konstrukcyjne lub instalacyjne ze zbioru $\{i\}$ składników wpływających na energochłonność budynku zachowuje swoje właściwości użytkowe, Ślusarek (2007).

Trwałość powinna być rozpatrywana w projektowanym okresie użytkowania obiektu budowlanego T_{blc} , w którym należy przewidywać konieczność projektowanej liczby okresów konserwacji lub modernizacji przyjętych rozwiązań, Celadyn (2014). Zatem, zasadniczo okres trwałości zastosowanego składnika nie będzie rozpatrywany jako dłuższy niż długość okresu użytkowania obiektu budowlanego:

$$D_i \leq T_{blc} . \quad (4.33)$$

Projektowany okres użytkowania dla różnych kategorii obiektów budowlanych jest określany w normatywach, np. PN EN 1990 (2002), PN ISO 15686-1 (2000), czy CSA S478 (1995). I tak, przykładowo, dla obiektów tymczasowych wynosi 10 lat, a dla obiektów monumentalnych wynosi 100 lat.

Trwałość może być określana nie tylko jako własna cecha danego rozwiązania, ale przede wszystkim jako trwałość stowarzyszona z miejscem wbudowania w obiekcie budowlanym. W niniejszej pracy tylko trwałość stowarzyszona będzie przyjmowana jako kryterium oceny danego składnika wpływającego na energochłonność budynku.

W niniejszej pracy trwałość określano na podstawie wyników badań normatywnych przyjętych z różnych publikacji. Przykładowo w badaniach Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München wykonanych w 2016 r. na zlecenie Stowarzyszenia Eurima (Trwałość produktów z wełny mineralnej. Eurima, 23.10.2022) określono trwałość wełny mineralnej na 50 lat. Norma PN EN 206 (2013), wskazuje trwałość betonu na 50 lat.

Trwałość poszczególnych elementów budynku określana jest również przez różne towarzystwa ubezpieczeniowe i np. trwałość ściany z cegły przyjmuje się na 130-150 lat, (Instrukcja wewnętrzna dotycząca zasad ustalania stopnia zużycia technicznego budynków i budowli oraz mienia ruchomego; strona internetowa: <https://docer.pl/doc/8xcxne>, 08.09.2024).

Na potrzeby pracy przygotowano bazy danych trwałości składników $\{i\}$ wpływających na energooszczędność budynku.

4.5. Czas zwrotu i czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych

Analiza opłacalności inwestycji jest rozpatrywana w zróżnicowany sposób w odniesieniu do konkretnego rodzaju budynku referencyjnego w przypadku rozwiązań modernizacyjnych lub budynku bazowego w przypadku rozwiązań projektowych. W przypadku rozwiązań modernizacyjnych wyznaczany jest czas zwrotu nakładów inwestycyjnych, w przypadku rozwiązań projektowych – czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych.

4.5.1. Czas zwrotu nakładów inwestycyjnych

W przypadku rozwiązań modernizacyjnych czas zwrotu nakładów inwestycyjnych to okres jaki jest konieczny, żeby koszty poniesione na dane rozwiązanie materiałowe, konstrukcyjne lub instalacyjne, zostały w pełni zrównoważone przez wartość oszczędności względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową wynikającego z zastosowania danego rozwiązania, Dynus (2007).

Czas zwrotu jest ściśle związany z poniesionym kosztem wykonania danego rozwiązania oraz względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową dla tego rozwiązania. Obliczany jest na podstawie parametrów budynku referencyjnego oraz ceny jednostkowej kWh na rynku lokalnym. Może być obliczany w sposób statyczny, jest to tzw. prosty czas zwrotu (SPBT – Simple Payback Time), Stevanović i Pucar (2012). Wtedy czas zwrotu jest ilorazem kosztów inwestycyjnych i oszczędności względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową na skutek tej inwestycji.

W celu określenia czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych rozważano dwie sytuacje obliczeniowe: czas zwrotu P_i dla każdego składnika modernizacyjnego $\{i\}$ oraz czas zwrotu P_v dla każdego wariantu modernizacyjnego $\{v\}$ złożonego z kilku wybranych składników wpływających na energochłonność budynku.

W przypadku obliczania czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych oddzielnie dla każdego składnika zastosowano następującą formułę:

$$P_i = \frac{C_i}{C_E \cdot \Delta E_{R,i} \cdot A_u} , \text{ [rok]} , \quad (4.34)$$

gdzie: $C_i = C_{st,i}$ – początkowy koszt zastosowania danego składnika [zł], $\Delta E_{R,i} = E_R - E_i > 0$ jest to oszczędność względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową wynikająca z zastosowania danego składnika w budynku referencyjnym [kWh/m²/rok], E_R – względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową budynku referencyjnego.

W przypadku budynku modernizowanego zerowa wartość $\Delta E_{R,i}$ informuje, że istniejący budynek referencyjny nie ma żadnych rozwiązań modernizacyjnych umożliwiających

wykazanie oszczędności zużycia energii, a ujemna wartość $\Delta E_{R,i}$ wyklucza zastosowanie analizowanego składnika rozwiązania modernizacyjnego.

W analizie początkowego stanu eksploatacji budynku referencyjnego czas zwrotu dla składników zastosowanych w budynku referencyjnym przyjmowany jest jako równy projektowanemu okresowi użytkowania obiektu budowlanego $P_i(t_0) = T_{blc}$.

W przypadku obliczania czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych dla każdego wariantu $\{v\}$ złożonego z kilku wybranych składników zastosowano następującą zależność:

$$P_v = \frac{C_v}{C_E \cdot \Delta E_{R,v} \cdot A_u}, \text{ [rok]}, \quad (4.35)$$

gdzie: C_v jest to początkowy koszt wariantu rozwiązania materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnego zastosowanego w budynku referencyjnym [zł], $\Delta E_{R,v} = E_R - E_v > 0$ jest to oszczędność względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową wynikająca z zastosowania danego wariantu rozwiązania w budynku referencyjnym [kWh/m²/rok], E_R – względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową budynku referencyjnego.

W przypadku budynku modernizowanego zerowa wartość $\Delta E_{R,v}$ informuje, że budynek referencyjny nie ma żadnych wariantów rozwiązań modernizacyjnych umożliwiających wykazanie oszczędności zużycia energii, a ujemna wartość $\Delta E_{R,v}$ wyklucza zastosowanie analizowanego wariantu rozwiązania modernizacyjnego.

Czas zwrotu może być obliczony też w sposób dynamiczny na przykład metodą NPV (Net Present Value). W tej metodzie można uwzględnić zmiany cen paliw lub usług remontowych w ciągu czasu życia budynku, Hanafizadeha i Latif (2011), Adamowicz i in. (2017) oraz zmianę wartości pieniądza w czasie, Pastusiak (2018).

Aktualny (dynamiczny) czas zwrotu nakładów inwestycyjnych oddzielnie dla każdego składnika lub dla każdego wieloskładnikowego wariantu można określać na podstawie wzorów odpowiednio (4.34) i (4.35), uwzględniając, że: $C_i = C_i(t)$ lub $C_v = C_v(t)$ – jest całkowitym kosztem zastosowania danego składnika lub wariantu [zł] (z pominięciem kosztu rozbiórki), $C_E = C_E(t)$ – jest kosztem jednostkowym energii [zł/kWh] z uwzględnieniem prognozowanych zmian kosztów energii, $\Delta E_{R,i}(t) = E_R(t) - E_i(t) > 0$ lub $\Delta E_{R,v}(t) = E_R(t) - E_v(t) > 0$ lub jest to aktualna oszczędność względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową wynikająca z zastosowania danego składnika lub wariantu rozwiązania w budynku referencyjnym, $E_i = E_i(t)$ lub $E_v = E_v(t)$ – jest względnym rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową określanym dla danego składnika lub wariantu w budynku referencyjnym z uwzględnieniem prognozowanego starzenia – utraty właściwości danego składnika,

$E_R = E_R(t)$ – jest aktualnym względnym rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową w budynku referencyjnym.

4.5.2. Czas i liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych

W przypadku rozwiązań projektowych czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych to okres, w którym koszty poniesione na dane rozwiązanie materiałowe, konstrukcyjne lub instalacyjne, zostały zrównoważone przez wartość względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową wynikającego z zastosowania danego rozwiązania.

Czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych jest związany z poniesionym kosztem wykonania danego rozwiązania oraz względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową dla tego rozwiązania. Obliczany jest na podstawie parametrów budynku bazowego oraz ceny jednostkowej kWh. Statyczny czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych jest ilorzem kosztów inwestycyjnych i kosztów względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową na skutek tej inwestycji.

W celu określenia czasu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych rozważano dwie sytuacje obliczeniowe: czas zrównoważenia B_i dla każdego składnika $\{i\}$ oraz czas zrównoważenia B_v dla każdego wariantu $\{v\}$ złożonego z kilku wybranych składników wpływających na energochłonność budynku.

W przypadku obliczania czasu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych oddzielnie dla każdego składnika zastosowano następującą formułę:

$$B_i = \frac{C_i}{C_E \cdot E_i \cdot A_u} , \text{ [rok]} , \quad (4.36)$$

gdzie: $C_i = C_{st,i}$ – początkowy koszt zastosowania danego składnika [zł], E_i jest to względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową wynikająca z zastosowania danego składnika w budynku bazowym [kWh/m²/rok].

W przypadku obliczania czasu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych dla każdego wariantu $\{v\}$ złożonego z kilku wybranych składników zastosowano następującą zależność:

$$B_v = \frac{C_v}{C_E \cdot E_v \cdot A_u} , \text{ [rok]} , \quad (4.37)$$

gdzie: $C_v = C_{st,v}$ – początkowy koszt zastosowania danego wariantu [zł], E_v – jest to względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową wynikająca z zastosowania danego wariantu w budynku bazowym [kWh/m²/rok].

Czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych można interpretować jako czas, po którym sumaryczny początkowy koszt nakładów inwestycyjnych wraz z kosztem poniesionym na energię końcową jest równy podwojonej wartości początkowego kosztu nakładów

inwestycyjnych. Tak więc, wieloletni czas zrównoważenia nakładów inwestycyjnych jest czasem trwania jednego cyklu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych.

W celu analizy porównawczej nakładów inwestycyjnych dla różnych rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych lub instalacyjnych, wprowadzono parametr określający liczbę cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych w ustalonym czasie równym projektowanemu okresowi użytkowania obiektu budowlanego T_{blc} w funkcji czasu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych w następujący sposób, odpowiednio dla każdego składnika $\{i\}$:

$$N_i = \frac{T_{blc}}{B_i} , \quad (4.38)$$

oraz dla każdego wieloskładnikowego wariantu $\{v\}$:

$$N_v = \frac{T_{blc}}{B_v} . \quad (4.39)$$

Liczbę cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych w okresie użytkowania obiektu budowlanego można interpretować, w pierwszym, statycznym przybliżeniu jako mnożnik zwiększający początkowy koszt nakładów inwestycyjnych w tym okresie, w następujący sposób, odpowiednio dla każdego składnika $\{i\}$:

$$C_{Ni} = (1 + N_i)C_i , \quad (4.40)$$

oraz dla każdego wieloskładnikowego wariantu $\{v\}$:

$$C_{Nv} = (1 + N_v)C_v . \quad (4.41)$$

Ze względu na energochłonność korzystna jest możliwie najmniejsza liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych w okresie użytkowania obiektu budowlanego. Liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych może być interpretowana jako odpowiednik czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych stosowany w ocenie rozwiązań modernizacyjnych.

4.6. Emisja dwutlenku węgla (CO₂)

W związku ze zmianami klimatu coraz większy nacisk przykładany jest na redukcję lub uniknięcie emisyjności różnych substancji pochodzących ze spalania paliw kopalnych. Wynika to z przyjętego przez Unię Europejską Porozumienia paryskiego w dniu 12 grudnia 2015 r. w ramach Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, które weszło w życie w dniu 4 listopada 2016 r. (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/958 z dnia 10 maja 2023 r.).

Jedną z nich jest dwutlenek węgla, który występuje w powietrzu w śladowych ilościach. Jednak mimo tak małego stężenia CO₂ odgrywa on bardzo ważną rolę w obiegu węgla w przyrodzie, a także jest gazem odpowiedzialnym za efekt cieplarniany Sensuła (2023).

Redukcję emisji dwutlenku węgla uzyskuje się wyniku realizacji przedsięwzięć ograniczających albo w całości eliminujących zużycie energii chemicznej zawartej w paliwach kopalnych. Przedsięwzięciami takimi mogą być np. budowa nowego źródła energii o zmniejszonej emisji CO₂ dla potrzeb nowego odbiornika energii lub budowa obiektu o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię w stosunku do obowiązujących standardów, WFOŚiGW (2018).

Wielkość emisji dwutlenku węgla dla m² budynku oblicza się ze wzoru:

$$eCO_2 = E_i \cdot WECO_2, \quad (4.42)$$

gdzie: eCO_2 – wielkość emisji CO₂ [kg/(m² rok)], E_i – energia końcowa [kWh/(m² rok)], $WECO_2$ – wskaźnik emisji CO₂ [kg/kWh].

Wskaźnik emisji CO₂ zależy od rodzaju paliwa używanego do ogrzewania budynku. Wartości wskaźnika przedstawiono w Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Wartości wskaźnika emisji CO₂ w zależności od rodzaju paliwa, (KOBiZE, 2023).

Rodzaj paliwa	$WECO_2$
	kg/kWh
Drewno/biomasa	0.403
Węgiel kamienny	0.341
Węgiel brunatny	0.402
Olej opałowy lekki	0.280
Gaz ziemny	0.199
Gaz ciekły LPG (propan)	0.227
Elektrociepłownia (węgiel kamienny)	0.337
Elektrociepłownia (węgiel brunatny)	0.402
Ciepłownia (węgiel kamienny)	0.341
Ciepłownia (węgiel brunatny)	0.400
Energia elektryczna	0.698

Całkowitą wielkość emisji dwutlenku węgla dla budynku oblicza się ze wzoru:

$$M_i = eCO_2 \cdot A_u, \quad (4.43)$$

gdzie: M_i – wielkość emisji CO₂ dla budynku [kg/rok].

5. Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków

W analizie optymalizacji wielokryterialnej składników wpływających na energochłonność budynków przyjęto następujące kryteria: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu nakładu inwestycyjnego dla budynku referencyjnego lub liczbę cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego dla budynku bazowego oraz emisję dwutlenku węgla. Kryteria te są znormalizowanymi składnikami funkcji metakryterium, która podlega minimalizacji. Wartości tych kryteriów obliczane będą w odniesieniu do konstrukcji obiektu referencyjnego (bazowego), a wartości wag przypisanych poszczególnym kryteriom przyjmowane będą na podstawie oceny eksperckiej preferencji użytkownika, z wykorzystaniem współczynnika wpływu wartości kryterium na wartość wagi.

Zaproponowano dwa sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków: hybrydowy i bezpośredni.

Hybrydowy sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności realizowany jest w procedurze optymalizacji wielokryterialnej, której celem jest: (1) uporządkowanie skończonych zbiorów składników wpływających na energochłonność budynków, (2) dokonanie wyboru zbioru obiektywnie najlepszych składników wpływających na energochłonność budynków oraz (3) kwantyfikacja klas energochłonności zbioru wariantów rozwiązań budowlano – konstrukcyjno – instalacyjnych i wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego).

Bezpośredni sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności realizowany jest w optymalizacji wielokryterialnej, której celem jest: (1) uporządkowanie zbiorów wariantów modernizacyjnych lub projektowych składających się ze składników wpływających na energochłonność budynków, (2) kwantyfikacja klas energochłonności zbioru wariantów rozwiązań budowlano – konstrukcyjno – instalacyjnych i wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego).

5.1. Hybrydowy sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków

5.1.1. Etap 1: Przygotowanie zbioru danych

5.1.1.1. Zestawienie składników wpływających na energochłonność budynku.

5.1.1.2. Wybór i opis rozwiązania materiałowo – konstrukcyjno – instalacyjnego referencyjnego (bazowego) obiektu budowlanego.

5.1.1.3. Opracowanie charakterystyki energetycznej referencyjnego (bazowego) obiektu budowlanego.

5.1.1.4. Wybór kryteriów oceny składników wpływających na energochłonność budynku: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu / liczba cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego oraz emisja dwutlenku węgla.

5.1.2. Etap 2: Określenie wskaźników energochłonności składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego (bazowego)

5.1.2.1. Określenie znormalizowanych wartości wskaźników kryteriów optymalizacji dla każdego składnika $\{i\}$ ze zbioru składników wpływających na energochłonność budynku:

a) wskaźnik energii końcowej:

$$\delta_{1,i} = \delta_{E,i} = \frac{E_i - E_{min}}{E_{max} - E_{min}}, \quad 0 \leq \delta_{E,i} \leq 1, \quad (5.1)$$

gdzie: E_i – względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową budynku referencyjnego (bazowego) [kWh/(m²rok)], w przedziale $E_{min} \leq E_i \leq E_{max}$;

b) wskaźnik kosztu:

$$\delta_{2,i} = \delta_{C,i} = \frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}, \quad 0 \leq \delta_{C,i} \leq 1, \quad (5.2)$$

gdzie: C_i – koszt zastosowanego składnika [zł], w przedziale $C_{min} \leq C_i \leq C_{max}$;

c) wskaźnik trwałości:

$$\delta_{3,i} = \delta_{D,i} = 1 - \frac{D_i - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} = \frac{D_{max} - D_i}{D_{max} - D_{min}}, \quad 0 \leq \delta_{D,i} \leq 1, \quad (5.3)$$

gdzie: D_i – trwałość zastosowanego składnika [rok], w przedziale $D_{max} \geq D_i \geq D_{min}$;

d) wskaźnik: czasu zwrotu (budynek referencyjny) / liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego (budynek bazowy):

$$\delta_{4,i} = \begin{cases} \delta_{P,i} = \frac{P_i - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}, & 0 \leq \delta_{P,i} \leq 1 \\ \delta_{N,i} = \frac{N_i - N_{min}}{N_{max} - N_{min}}, & 0 \leq \delta_{N,i} \leq 1 \end{cases}, \quad (5.4)$$

gdzie:

P_i – czas zwrotu nakładu inwestycyjnego dla zastosowanego składnika [rok], w przedziale $P_{min} \leq P_i \leq P_{max}$,

N_i – liczba cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego dla zastosowanego składnika, w przedziale $N_{min} \leq N_i \leq N_{max}$;

e) wskaźnik emisyjności CO₂

$$\delta_{5,i} = \delta_{M,i} = \frac{M_i - M_{min}}{M_{max} - M_{min}}, \quad 0 \leq \delta_{M,i} \leq 1, \quad (5.5)$$

gdzie: M_i – wskaźnik emisyjności CO₂ [kg/rok], w przedziale $M_{min} \leq M_i \leq M_{max}$.

5.1.2.2. Określenie wag kryteriów z uwzględnieniem wpływu wartości wskaźnika kryterium dla każdego składnika $\{i\}$ na wartość wagi:

$$w_j = \frac{\alpha_j}{\sum \alpha_j}, \quad j = \{1, 2, 3, 4, 5\}, \quad (5.6)$$

gdzie:

$\alpha_j = (1 - \beta)(1 - \delta_{j,i}) + \beta\delta_{j,i}$ – funkcja redystrybucji określająca wpływ wartości wskaźników kryteriów $\delta_{j,i}$ na wartość wagi w_j ,

$0 \leq \beta \leq 0.5$ – parametr redystrybucji określający stopień udziału wartości wskaźników kryteriów $\delta_{j,i}$,

$\sum \alpha_j$ – suma współczynników wpływu wartości wskaźników wszystkich kryteriów $\delta_{j,i}$.

Proponowany sposób rozdzielenia wag kryterialnych wykazuje następujące cechy:

- Parametr β redystrybucji wartości wskaźników kryteriów wpływa na skalę ilościowego uwzględnienia poprzez wagi zróżnicowanego wpływu poszczególnych kryteriów.
- Przyjęcie wartości parametru redystrybucji $\beta = 0.5$ skutkuje przyjęciem jednakowych wartości wag dla wszystkich kryteriów $w_j = \frac{1}{J}$.
- Przyjęcie możliwie najmniejszej wartości parametru redystrybucji $\beta > 0$ umożliwia minimalizację wartości metakryteriów optymalizacji (5.6), nie eliminuje żadnego kryterium z funkcji każdego metakryterium optymalizacji, ale skutkuje przyjęciem mniejszych preferencji wagowych dla niekorzystnych wartości kryterium oraz większych preferencji wagowych dla korzystnych wartości kryterium z punktu widzenia energochłonności.

5.1.2.3. Określenie znormalizowanych wartości metakryteriów optymalizacji (wskaźników energochłonności) dla każdego składnika $\{i\}$ ze zbioru składników wpływających na energochłonność budynku:

$$\delta_{ec,i} = w_1\delta_{1,i} + w_2\delta_{2,i} + w_3\delta_{3,i} + w_4\delta_{4,i} + w_5\delta_{5,i} = \sum_{j=1}^J w_j\delta_{j,i}, \quad 0 \leq \delta_{ec,i} \leq 1, \quad (5.7)$$

gdzie: w_j – waga kryterium, z warunkiem $\sum_{j=1}^J w_j = 1$, $J = 5$ – liczba przyjętych kryteriów.

Wartości wskaźników energochłonności składników stanowią ważone sumy poszczególnych wskaźników kryteriów i zawierają się w przedziale $0 \leq \delta_{ec,i} \leq 1$.

5.1.3. Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego)

5.1.3.1. Określenie wariantów $\{v\}$ rozwiązania z zastosowaniem składników $\{i_r\}$ wyselekcjonowanych ze zbioru składników $\{i\}$ wpływających na energochłonność budynku

Zbiór dopuszczalnych wariantów rozwiązania to zbiór spełniający zarówno warunek ograniczający $c_{v,req}$ dla wariantu rozwiązania $\{v\}$ oraz warunki ograniczające $c_{r,req}$ dla składników $\{i_r\}$ wariantu rozwiązania:

$$\{v\} = \left\{ \begin{array}{l} v(i_r) | c_v \leq c_{v,req} \\ v(i_r) | c_r \leq c_{r,req} \end{array} \right\} , \quad (5.8)$$

5.1.3.2. Określenie wskaźnika energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego)

Wartość wskaźnika energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania konstrukcyjno – budowlano – instalacyjnego, stanowi uśrednioną sumę poszczególnych wskaźników energochłonności wybranych składników wpływających na energochłonność budynku i jest funkcją celu optymalizacji:

$$\Delta_{ec,v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{ec,i} , \quad (5.9)$$

gdzie: N – liczba składników w zbiorze każdego wariantu rozwiązania $v = \{1, \dots, V\}$, V – liczba wariantów rozwiązania zastosowanych w danym obiekcie referencyjnym (bazowym).

5.1.3.3. Określenie klas energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego)

Wyznaczone wartości wskaźników energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania umożliwiają obliczenie wskaźników klas energochłonności wariantów rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego):

$$EC_v = \frac{\Delta_{ec,v} - \min\{\Delta_{ec,v}\}}{\max\{\Delta_{ec,v}\} - \min\{\Delta_{ec,v}\}} , \quad 0 \leq EC_v \leq 1 , \quad (5.10)$$

których wartości określają następujące klasy energochłonności wariantów rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego):

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ECI (doskonała)} & 0.00 \leq EC_v \leq 0.05 \\ \text{ECII (bardzo dobra)} & 0.05 < EC_v \leq 0.15 \\ \text{ECIII (ponad dobra)} & 0.15 < EC_v \leq 0.25 \\ \text{ECIV (dobra)} & 0.25 < EC_v \leq 0.35 \\ \text{ECV (dostateczna)} & 0.35 < EC_v \leq 0.45 \\ \text{ECVI (zadowalająca)} & 0.45 < EC_v \leq 0.55 \\ \text{ECVII (niezalecana)} & 0.55 < EC_v \leq 1.00 \end{array} \right\} . \quad (5.11)$$

5.1.3.4. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego)

Globalny wskaźnik energochłonności budynku referencyjnego (bazowego), jest wynikiem minimalizacji funkcji celu wyznaczanym jako najmniejsza wartość wskaźników energochłonności (5.9) dla wariantów zastosowanych rozwiązań modernizacyjnych (projektowych), zgodnie z formułą:

$$\Delta_{ec} = \min\{\Delta_{ec,v}\} . \quad (5.12)$$

5.2. Bezpośredni sposób wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków

5.2.1. Etap 1: Przygotowanie zbioru danych

5.2.1.1. Określenie wariantów $\{v\}$ rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych z zastosowaniem składników wyselekcjonowanych ze zbioru składników $\{i\}$ wpływających na energochłonność budynku.

5.2.1.2. Opracowanie charakterystyki energetycznej wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych budynku referencyjnego (bazowego).

5.2.1.3. Wybór kryteriów oceny wariantów budynku: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu / liczba cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego oraz emisję dwutlenku węgla.

5.2.2. Etap 2: Określenie wskaźników energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych budynku

5.2.2.1. Określenie znormalizowanych wartości wskaźników kryteriów optymalizacji dla każdego wariantu $\{v\}$ budynku

a) wskaźnik energii końcowej:

$$\Delta_{1,v} = \Delta_{E,v} = \frac{E_v - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} , \quad 0 \leq \Delta_{E,v} \leq 1 , \quad (5.13)$$

gdzie: E_v – względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową [kWh/(m²rok)], w przedziale $E_{min} \leq E_v \leq E_{max}$;

b) wskaźnik kosztu:

$$\Delta_{2,v} = \Delta_{C,v} = \frac{C_v - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} , \quad 0 \leq \Delta_{C,v} \leq 1 , \quad (5.14)$$

gdzie: C_v – koszt [zł], w przedziale $C_{min} \leq C_v \leq C_{max}$;

c) wskaźnik trwałości:

$$\Delta_{3,v} = \Delta_{D,v} = 1 - \frac{D_v}{T_{blc}} , \quad 0 < \Delta_{D,v} \leq 1 , \quad (5.15)$$

gdzie: D_v – trwałość [rok], w projektowanym okresie użytkowania budynku T_{blc} ;

d) wskaźnik: czasu zwrotu (budynek referencyjny) / liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego (budynek bazowy):

$$\Delta_{4,v} = \begin{cases} \Delta_{P,v} = \frac{P_v - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} , & 0 \leq \Delta_{P,v} \leq 1 \\ \Delta_{N,v} = \frac{N_v - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} , & 0 \leq \Delta_{N,v} \leq 1 \end{cases} , \quad (5.16)$$

gdzie:

P_v – czas zwrotu nakładu inwestycyjnego [rok], w przedziale $P_{min} \leq P_v \leq P_{max}$,

N_v – liczba cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego, w przedziale $N_{min} \leq N_v \leq N_{max}$;

e) wskaźnik emisyjności CO₂

$$\Delta_{5,v} = \Delta_{M,v} = \frac{M_v - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} , \quad 0 \leq \Delta_{M,v} \leq 1 , \quad (5.17)$$

gdzie: M_v – wskaźnik emisyjności CO₂ [kg/rok], w przedziale $M_{min} \leq M_v \leq M_{max}$.

5.2.2.2. Określenie wag kryteriów z uwzględnieniem wpływu wartości wskaźnika kryterium dla każdego wariantu $\{v\}$ na wartość wagi zgodnie z formułą (5.6), w której dostosowano opis funkcji redystrybucji $\alpha_j = (1 - \beta)(1 - \Delta_{j,v}) + \beta\Delta_{j,v}$ w zależności od wartości wskaźników kryteriów $\Delta_{j,v}$.

5.2.2.3. Określenie znormalizowanych wartości metakryteriów optymalizacji (wskaźników energochłonności) dla każdego wariantu $\{v\}$ rozwiązań modernizacyjnych (projektowych)

Wartość wskaźnika energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania konstrukcyjno – budowlano – instalacyjnego, stanowi ważoną sumę poszczególnych wskaźników kryteriów optymalizacji i jest funkcją celu optymalizacji:

$$\Delta_{ec,v} = w_1\Delta_{1,v} + w_2\Delta_{2,v} + w_3\Delta_{3,v} + w_4\Delta_{4,v} + w_5\Delta_{5,v} = \sum_{j=1}^J w_j\Delta_{j,v} , \quad 0 \leq \Delta_{ec,v} \leq 1 , \quad (5.18)$$

gdzie: w_j – waga kryterium, z warunkiem $\sum_{j=1}^J w_j = 1$, $J = 5$ – liczba przyjętych kryteriów.

5.2.3. Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku

5.2.3.1. Określenie klas energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego)

Zbiór wartości wskaźników energochłonności wariantów rozwiązania budynku referencyjnego (bazowego) umożliwia obliczenie wskaźników klas energochłonności zgodnie z formułą (5.10) oraz kwalifikację klas energochłonności wariantów rozwiązania według (5.11).

5.2.3.2. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku

Globalny wskaźnik energochłonności budynku referencyjnego (bazowego) określony zgodnie z formułą (5.12), jest wynikiem minimalizacji funkcji celu wyznaczanym jako

najmniejsza wartość wskaźników energochłonności (5.18) dla wariantów rozwiązań modernizacyjnych (projektowych) budynku.

Proponowane sposoby analizy pozwalają uzyskać odpowiedź czy rozwiązanie przyjęte w budynku jest najkorzystniejsze i czy zmieniając chociaż jedną zmienną można zoptymalizować osiągnięte rezultaty. Proponowana metoda pozwala na weryfikację przyjętych koncepcji projektowych, a także na dokonanie wyboru najbardziej korzystnych wariantów rozwiązań. Mniejsze wartości poszczególnych rzędów wskaźników (tj. wskaźników kryteriów, wskaźników energochłonności składowych, wskaźników wariantów rozwiązania oraz globalnego wskaźnika energochłonności) wskazują na korzystniejsze rozwiązania.

5.3. Algorytm metody wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku

W celu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku opracowano autorską procedurę obliczeniową, którego algorytm zawiera wszystkie równania opisujące proponowaną metodę wielokryterialnej oceny energochłonności budynków.

5.3.1. Algorytm hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków

Na Rys. 5.1 przedstawiono schemat blokowy algorytmu obliczeniowego sposobem hybrydowym.

Istota tego algorytmu sprowadza się do wykonania następujących działań:

1. Opracowanie baz danych zawierających zbiory składników wpływających na energochłonność budynków wraz z charakterystyką ich właściwości, kosztów wbudowania, okresów trwałości, emisyjności CO₂;
2. Określenie wskaźników kryteriów oceny energochłonności budynków;
3. Wyznaczanie globalnego wskaźnika energochłonności budynku.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

1.1. Zbiór składników wpływających na energochłonność budynku

Baza danych – SKŁADNIKI

(dane techniczne, koszty jednostkowe, trwałość, cena jednostkowa energii, emisyjność CO₂)

1.2. Wybór i opis rozwiązania materiałowo – konstrukcyjno – instalacyjnego referencyjnego (bazowego) obiektu budowlanego

Baza danych – BUDYNEK REFERENCYJNY (BAZOWY)

(opis techniczny, parametry obmiaru, lokalizacja, usytuowanie względem stron świata, rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne, liczba i wymiary okien, drzwi, bram garażowych, rodzaj źródła ciepła)

1.3. Opracowanie charakterystyki energetycznej budynku referencyjnego (bazowego)

1.4. Wybór kryteriów oceny składników wpływających na energochłonność budynku i obliczenie wartości kryteriów:

względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową: E_i , (4.1)

kosztu: C_i , (4.25)

trwałości: D_i , (4.33)

czasu zwrotu nakładu inwestycyjnego (budynek referencyjny): P_i , (4.34)

liczby cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego (budynek bazowy): N_i , (4.38)

emisyjności CO₂: M_i , (4.43)

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności wariantów

2.1. Określenie znormalizowanych wartości wskaźników kryteriów optymalizacji:

energia końcowa: $\Delta_{E,v}$, (5.13)

koszt: $\Delta_{C,v}$, (5.14)

trwałość: $\Delta_{D,v}$, (5.15)

czas zwrotu (budynek referencyjny): $\Delta_{P,v}$, (5.16)₁

liczba cykli zrównoważenia nakładu inwestycyjnego (budynek bazowy): $\Delta_{N,v}$, (5.16)₂

emisyjność CO₂: $\Delta_{M,v}$, (5.17)

2.2. Określenie wag kryteriów z uwzględnieniem wpływu wartości wskaźnika kryterium dla każdego składnika:

w_j , (5.6)

2.3. Określenie znormalizowanych wartości wskaźników energochłonności dla każdego składnika:

$\delta_{ec,i}$, (5.7)

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego (bazowego)

3.1. Określenie wariantów rozwiązania z zastosowaniem wyselekcjonowanych składników: $\{v\}$, (5.8)

3.2. Określenie wskaźnika energochłonności dla każdego wariantu rozwiązania budynku:

$\Delta_{ec,v}$, (5.9)

3.3. Obliczenie wskaźników klas energochłonności wariantów rozwiązania:

EC_v , (5.10)

określenie klas energochłonności wariantów rozwiązania:

ECI, ECII, ECIII, ECIV, ECV, ECVI, ECVII, (5.11)

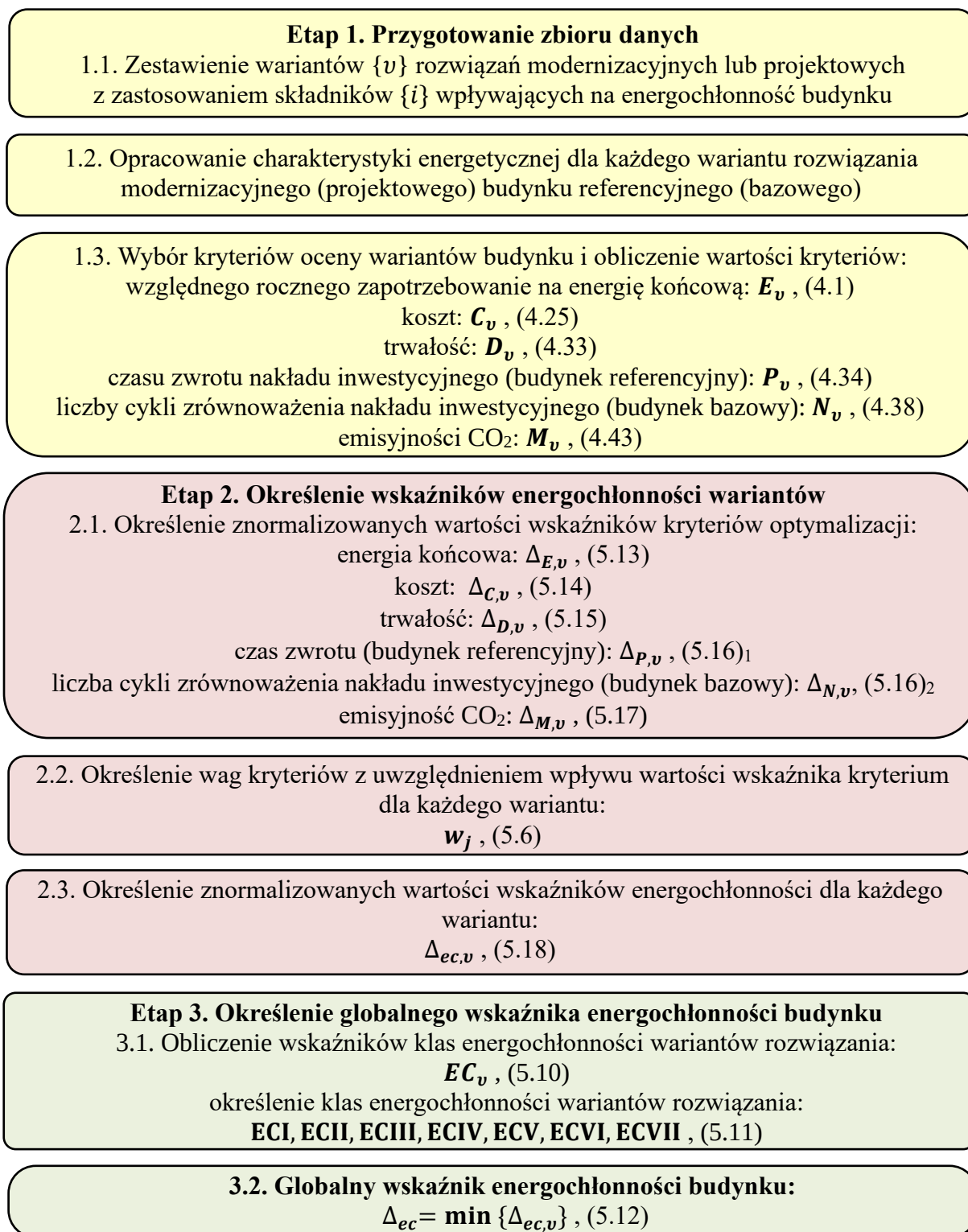
3.4. Globalny wskaźnik energochłonności budynku:

$\Delta_{ec} = \min \{\Delta_{ec,v}\}$, (5.12)

Rys. 5.1. Schemat blokowy wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku sposobem hybrydowym.

5.3.2. Algorytm bezpośredniego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków

Algorytm wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku sposobem bezpośrednim przedstawia Rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat blokowy wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku sposobem bezpośrednim.

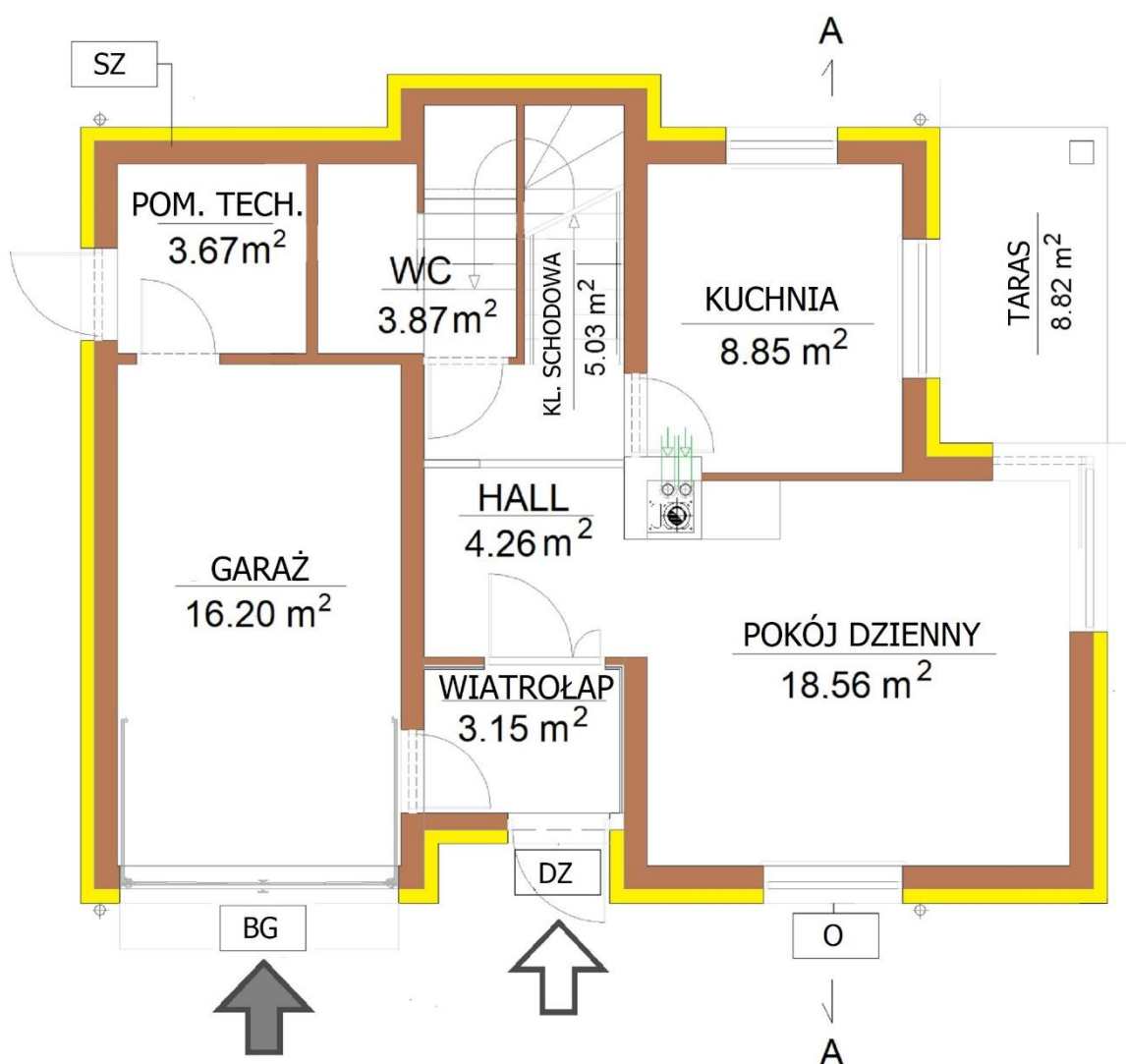
6. Studium przypadku budynku modernizowanego z wykorzystaniem hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności

6.1. Opis budynku referencyjnego

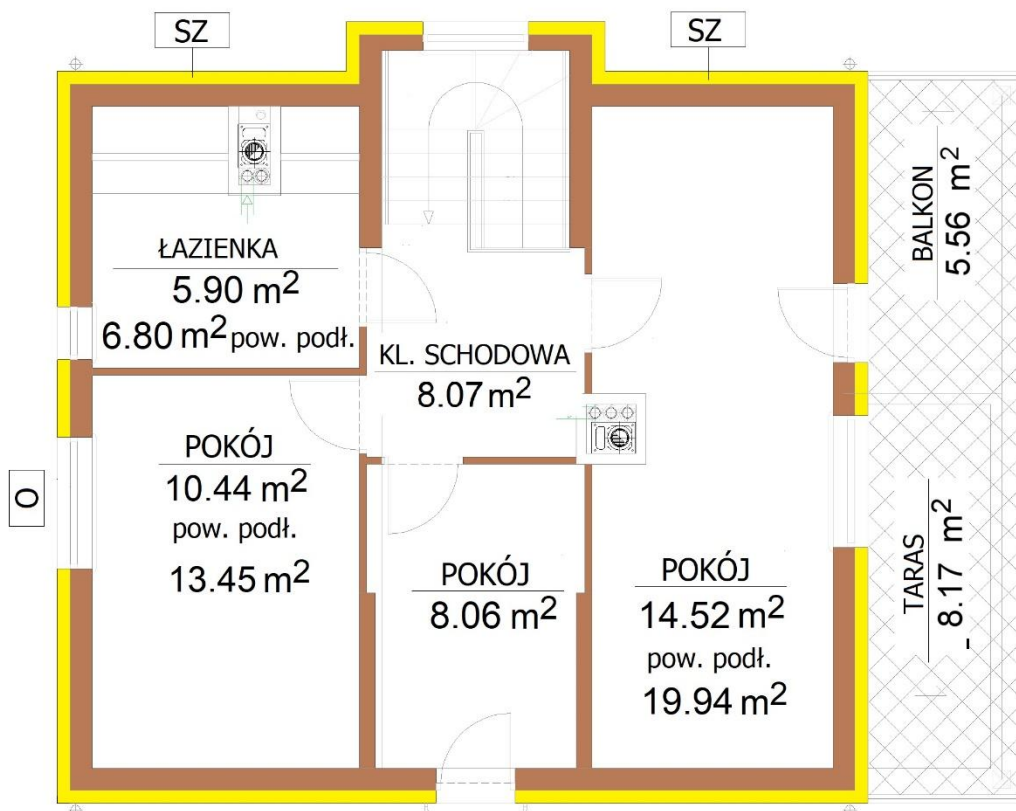
W celu określenia globalnego wskaźnika energochłonności budynku przyjęto jako budynek referencyjny dom jednorodzinny przeznaczony do modernizacji.

Na Rys. 6.1. przedstawiono schematy przekrojów poziomych i pionowego budynku wolnostojącego, dwukondygnacyjnego o powierzchni 110 m² z poddaszem użytkowym, niepodpiwniczonego, wykonanego w technologii tradycyjnej, z dachem dwuspadowym.

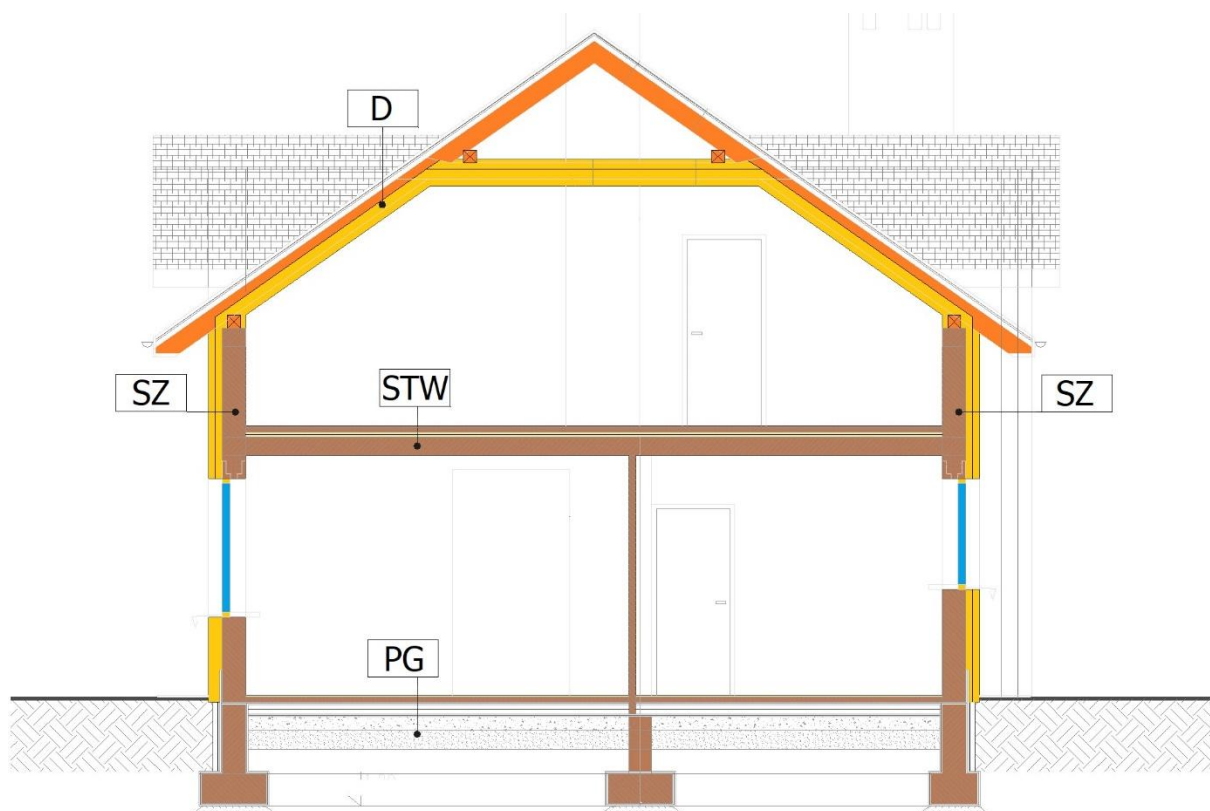
a)



b)



c)



Rys. 6.1. Schemat budynku: (a) rzut parteru; (b) rzut poddasza; (c) przekrój pionowy A-A.
Oznaczenia: SZ — ściana zewnętrzna; D — dach; PG — podłoga na gruncie; STW — strop wewnętrzny; O — okno; DZ — drzwi zewnętrzne; BG — drzwi garażowe.

Zasadniczą konstrukcję budynku stanowi układ nośnych ścian zewnętrznych wraz z nośnymi ścianami wewnętrznymi. Budynek został wykonany około 20 lat temu i znajduje się w Kielcach, w III strefie klimatycznej. Obiekt znajduje się w otoczeniu innych budynków o zbliżonej wysokości.

Układ funkcjonalny domu obejmuje na parterze: wiatrołap, garaż, pomieszczenie techniczne, hall, klatkę schodową, WC, kuchnię oraz gabinet. Na poddaszu zostały zaprojektowane: klatka schodowa, trzy pokoje oraz łazienka.

Budynek wyposażony jest w wentylację grawitacyjną z napływem powietrza wentylacyjnego poprzez nawiewniki. Systemy C.O. oraz C.W.U. zasilane są dwufunkcyjnym niskotemperaturowym (55/45°C) kotłem gazowym kondensacyjnym o mocy maksymalnej 25 kW. W pomieszczeniach zainstalowano aluminiowe grzejniki czołowe z możliwością centralnej oraz miejscowej regulacji temperatury.

Obmiar poszczególnych elementów konstrukcji budynku zestawiono w Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Powierzchnia i objętość poszczególnych przegród.

Element	Powierzchnia [m²]	Objętość [m³]
Ściany konstrukcyjne zewnętrzne	125.00	31.25
Ściany konstrukcyjne wewnętrzne	48.00	12.00
Ściany działowe	53.00	6.36
Dach	109.35	-
Podłoga na gruncie	86.7	34.68

Natomiast obmiar otworów okiennych i drzwiowych zewnętrznych w budynku zestawiono w Tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Wymiary otworów okiennych, drzwi zewnętrznych i bramy garażowej.

Otwór	Wymiar szer. × wys. [m × m]	Liczba [szt.]
Okna	1.20 × 1.20	1
	1.50 × 1.50	1
	2.96 × 2.35	1
	0.60 × 0.90	1
	0.90 × 2.05	1
	1.00 × 2.02	1
	3.00 × 2.10	1
	0.90 × 2.02	1
	0.80 × 2.02	1
	1.20 × 2.02	1
Drzwi zewnętrzne	1.00 × 2.02	1
Brama garażowa	3.00 × 2.10	1

Charakterystyczne parametry budynku referencyjnego zestawiono w Tabeli 6.3, zgodnie ze specyfikacją przedstawioną w punkcie 4.1. Przyjęto założenie, że instalacja oświetlenia i instalacja chłodzenia nie będą uwzględniane w obliczeniach.

Tabela 6.3. Charakterystyczne parametry budynku referencyjnego.

Parametry		Budynek referencyjny	
1.	1.1.	1.1.1.	Mieszkalny
		1.1.2.	Jednorodzinny
		1.1.3.	Modernizowany, zbudowany około 20 lat temu
		1.1.4.	2
		1.1.5.	Garaż 1
			Wiatrołap 1
			Pomieszczenie techniczne 1
			Pokoje 4
			Kuchnia 1
			Łazienki/WC 2
			Klatka schodowa/Hall 3
		1.1.6.	110.58 m ²
		1.1.7.	489.42 m ³
		1.1.8.	Wiatrołap 8.19 m ³
			Garaż 47.32 m ³
			Pomieszczenie techniczne 9.54 m ³
			Hall 11.08 m ³
			Klatka schodowa 34.06 m ³
			WC 10.06 m ³
			Kuchnia 23.01 m ³
			Pokój dzienny 48.26 m ³
			Pokój 37.89 m ³
			Pokój 20.96 m ³
			Pokój 25.56 m ³
			Łazienka 12.92 m ³
		1.1.9.	86.70 m ²
		1.1.10.	109.35 m ²
		1.1.11.	Powierzchnia ścian zewnętrznych 125 m ²
			Objętość warstwy konstrukcyjnej ścian zewnętrznych o grubości 25 cm 31.25 m ³

1.	1.1.	1.1.11.	Objętość warstwy izolacyjnej ścian zewnętrznych o grubości 10 cm	12.5 m ³	
	1.2.	1.2.1.	Kielce		
		1.2.2.	Północno-zachodnia		
	1.3.	1.3.1.	Warstwa konstrukcyjna	25 cm	
			Warstwa izolacyjna	10 cm	
		1.3.2.	Ściana zewnętrzna	ceramika poryzowana - Porotherm 25 Profi	0.283 W/(mK)
				polistyren ekspandowany EPS 75	0.042 W/(mK)
				Tynk kwarcowy	1.0 W/(mK)
				Tynk silikatowy	1.0 W/(mK)
			Dach	Dachówka cementowa	1.0 W/(mK)
				Membrana bitumiczna	0.18 W/(mK)
				Płyta OSB	0.13 W/(mK)
				Wełna mineralna	0.34 W/(mK)
				Folia paroizolacyjna	0.18 W/(mK)
				Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie	0.23 W/(mK)
				Tynk cienkowarstwowy	1.0 W/(mK)
				Podłoga na gruncie	Parkiet
		Wylewka cementowa	1.0 W/(mK)		
		Folia termoizolacyjna	0.045 W/(mK)		
		Żelbetowa płyta fundamentowa	1.7 W/(mK)		
		Płyta styropianowa PERIPOR	0.034 W/(mK)		
		Papa	0.18 W/(mK)		
		Chudy beton	1.7 W/(mK)		
		Piasek stabilizowany cementem	0.4 W/(mK)		
		Podsypka piaskowa	0.4 W/(mK)		
		1.3.3.	Ściany zewnętrzne	0.285 W/(m ² K)	
			Dach	0.148 W/(m ² K)	
Podłoga na gruncie			0.115 W/(m ² K)		
Drzwi zewnętrzne			1.5 W/(m ² K)		
Okna			1.1 W/(m ² K)		
2.	2.1.	2.1.1.	Dwufunkcyjny kocioł kondensacyjny gazowy 25 kW		
		2.1.2.	55/45 °C		
		2.1.3.	20 mm (zgodnie z Warunkami Technicznymi)		
		2.1.4.	Centralne podgrzewanie wody		
		2.1.5.	180 dm ³		

2.	2.1.	2.1.6.	W ogrzewanej strefie budynku
	2.2.	2.2.1.	Dwufunkcyjny kocioł kondensacyjny gazowy 25 kW
		2.2.2.	Grzejniki czołowe z możliwością regulacji
		2.2.3.	55/45 °C
		2.2.4.	20 mm (zgodnie z Warunkami Technicznymi)
		2.2.5.	Ogrzewanie centralne wodne z lokalnego źródła ciepła usytuowanego w ogrzewanym budynku
	2.5.	2.5.1.	Napęd pomocniczy i regulacja kotła do ogrzewania budynku o powierzchni użytkowej do 250 m ²
		2.5.2.	Napęd pomocniczy i regulacja kotła do podgrzewu ciepłej wody w budynku o powierzchni użytkowej do 250 m ²

W Tabeli 6.4 przedstawiono parametry budynku referencyjnego odniesieniu do aktualnych wymagań technicznych zawartych w Rozporządzeniu (2002).

Tabela 6.4. Parametry budynku referencyjnego w odniesieniu do aktualnych wymagań technicznych.

Elementy konstrukcyjne i budowlane	Materiał	Grubość	Wartości wskaźników	Warunki Techniczne (Rozporządzenie, 2002)	Spełnienie warunków
Ściana zewnętrzna	Ceramika poryzowana	25 cm	$U = 0.285 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0.20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Nie spełnia
	Polistyren ekspandowany (1)	10 cm			
Podłoga na gruncie			$U = 0.115 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0.30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Spełnia
Dach			$U = 0.148 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0.15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Spełnia
Drzwi zewnętrzne			$U = 1.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 1.30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Nie spełnia
Stolarka okienna			$U = 1.1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0.90 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Nie spełnia
Brama garażowa			$U = 1.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$U = 1.30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Nie spełnia
Wskaźnik zapotrzebowania na energię pierwotną			$EP = 193.29 \text{ kWh/(m}^2\text{rok)}$	$EP = 70 \text{ kWh/(m}^2\text{rok)}$	Nie spełnia

Analiza parametrów budynku referencyjnego wykazała, że nie spełnia on aktualnych wymagań określonych w Warunkach Technicznych (Rozporządzenie, 2002) dla wskaźnika zapotrzebowania na energię pierwotną oraz współczynnika przenikania ciepła dla ścian, okien, drzwi oraz bramy garażowej. Konieczna jest zatem modernizacja energetyczna budynku na podstawie zasad proponowanej metody wielokryterialnej oceny energochłonności budynków.

Zostanie to osiągnięte poprzez docieplenie ścian zewnętrznych dodatkową warstwą izolacyjną o grubości 8 cm wykonaną z materiałów o różnych parametrach fizycznych oraz ewentualną zmianą rodzaju źródła ciepła dla instalacji C.O. Założono, że wymianę okien, drzwi i bramy garażowej dokonano w budynku referencyjnym przed rozpoczęciem analizy dalszej termomodernizacji.

6.2. Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

W celu przeprowadzenia analizy budynku modernizowanego dokonano wyboru dziewięciu składników rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych spośród trzech grup opisanych w Rozdziale 2:

- a) jeden składnik z grupy wyrobów budowlanych – **konstrukcja nośna**:
 - (1) ceramika poryzowana (pozostawiono jak w budynku referencyjnym);
- b) pięć składników z grupy wyrobów budowlanych – **warstwa izolacyjna**:
 - (2) polistyren ekspandowany 1 (pozostawiono jak w budynku referencyjnym),
 - (3) polistyren ekspandowany 2 (grubość 8 cm, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0.042 \text{ W/(mK)}$),
 - (4) polistyren ekstrudowany (grubość 8 cm, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0.033 \text{ W/(mK)}$),
 - (5) wełna skalna – kamienna (grubość 8 cm, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0.032 \text{ W/(mK)}$),
 - (6) pianka poliuretanowa (grubość 8 cm, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0.025 \text{ W/(mK)}$);
- c) trzy składniki z grupy instalacje – **źródło ciepła**:
 - (7) kocioł gazowy (parametry jak w budynku referencyjnym),
 - (8) pompa ciepła gruntowa – grunt/woda – dolnym źródłem ciepła jest grunt (pobór mocy 6 kW, zasobnik C.W.U. o pojemności 180 dm^3),
 - (9) pompa ciepła wodna – woda/woda – dolnym źródłem ciepła jest zbiornik wodny (pobór mocy 6 kW, zasobnik C.W.U. o pojemności 180 dm^3).

Dla wybranych składników wyznaczono wartości kryteriów oceny zgodnie z następującą interpretacją:

E_i , (4.1) – energia końcowa $\{i\}$ składnika interpretowana jako energia końcowa budynku referencyjnego z zastosowanym $\{i\}$ składnikiem,

C_i , (4.25) – koszt $\{i\}$ składnika zastosowanego w budynku referencyjnym,

D_i , (4.33) – trwałość $\{i\}$ składnika zastosowanego w budynku referencyjnym,

P_i , (4.34) – czas zwrotu nakładów inwestycyjnych $\{i\}$ składnika interpretowany jako czas zwrotu nakładów inwestycyjnych na modernizację budynku referencyjnego w wyniku zastosowania $\{i\}$ składnika,

M_i , (4.43) – emisyjność CO₂ $\{i\}$ składnika interpretowana jako emisyjność budynku referencyjnego z zastosowanym $\{i\}$ składnikiem.

Wyznaczone wartości kryteriów przedstawiono w Tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Składniki stanowiące podstawę modernizacji budynku referencyjnego.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	E_i [kWh/(m ² rok)]	C_i [zł]*	D_i [rok]**	P_i [rok]	M_i [kg/rok]
1	Ceramika poryzowana	152.59	36 000	50	50.0000	3347
2	Polistyren ekspandowany 1	152.59	23 500	50	50.0000	3347
3	Polistyren ekspandowany 2	140.09	22 500	50	28.6820	3073
4	Polistyren ekstrudowany	138.03	28 000	50	30.6431	3028
5	Wełna skalna – kamienna	137.76	34 000	50	36.5321	3022
6	Pianka poliuretanowa	135.55	30 000	25	28.0536	2973
7	Kocioł gazowy	152.59	28 000	20	50.0000	3347
8	Pompa ciepła gruntowa	48.40	120 000	25	18.3523	3716
9	Pompa ciepła wodna	48.00	115 000	25	17.5204	3685

* Koszt dla poszczególnych składników określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji.

Kolorem pomarańczowym wyróżniono składniki budynku referencyjnego.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego

Dla każdego składnika $\{i = 1, 9\}$ ze zbioru składników wpływających na energochłonność budynku określono znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{P,i}$ (5.4), $\delta_{M,i}$ (5.5).

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) przy założeniu, że parametr redystrybucji określający udział wartości wskaźników kryteriów jest równy $\beta = 0.5$, co powoduje, że są one jednakowe i wynoszą $w_j = 0.2$, $j = \{1, 5\}$.

Następnie obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności składników $\delta_{ec,i}$ (5.7). Wyniki tych obliczeń zestawiono w Tabeli 6.6.

Tabela 6.6. Znormalizowane wartości kryteriów optymalizacji oraz wskaźniki energochłonności dla wybranych składników.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	$\delta_{E,i}$	$\delta_{C,i}$	$\delta_{D,i}$	$\delta_{P,i}$	$\delta_{M,i}$	$\delta_{ec,i}$
1	Ceramika poryzowana	1.0000	0.1385	0.0000	1.0000	0.5031	0.5283
2	Polistyren ekspandowany 1	1.0000	0.0103	0.0000	1.0000	0.5031	0.5027
3	Polistyren ekspandowany 2	0.8805	0.0000	0.0000	0.3436	0.1340	0.2716
4	Polistyren ekstrudowany	0.8608	0.0564	0.0000	0.4040	0.0732	0.2789
5	Wełna skalna - kamienna	0.8582	0.1179	0.0000	0.5853	0.0652	0.3253
6	Pianka poliuretanowa	0.8371	0.0769	0.8333	0.3243	0.0000	0.4143
7	Kocioł gazowy	1.0000	0.0564	1.0000	1.0000	0.5031	0.7119
8	Pompa ciepła gruntowa	0.0038	1.0000	0.8333	0.0256	1.0000	0.5726
9	Pompa ciepła wodna	0.0000	0.9487	0.8333	0.0000	0.9587	0.5481

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego

Warunki ograniczające dotyczące parametrów przegród, stolarki okiennej i drzwi ($c_{r,req} = U$) oraz budynku referencyjnego ($c_{v,req} = EP$) przyjęto na podstawie Warunków Technicznych (Rozporządzenie, 2002), zgodnie z Tabelą 6.4.

Liczbę możliwych wariantów rozwiązań modernizacyjnych określono na zasadzie wyboru jednego składnika z każdego zbioru składników, czyli dla wszystkich możliwych kombinacji składników przy założeniu, że w danej kombinacji nie mogą powtarzać się składniki z tego samego zbioru.

Do analizy wykorzystano wszystkie wybrane składniki wraz z tymi, które występują w budynku referencyjnym i będą zachowane w budynku modernizowanym.

Liczbę wariantów rozwiązań modernizacyjnych V określono jako iloczyn liczb kombinacji składników w funkcjonalnych zbiorach składników rozwiązań:

$$V = \prod_{j=1}^J C_{n_j}^{k_j}(Z_j), \quad (6.1)$$

gdzie: liczba kombinacji k_j -elementowych z n_j -elementowego zbioru składników Z_j jest obliczana zgodnie z formułą:

$$C_{n_j}^{k_j}(Z_j) = \frac{n_j!}{k_j! (n_j - k_j)!}$$

Tabela 6.7 zawiera zestawienie funkcjonalnych zbiorów składników wraz z parametrami tych zbiorów umożliwiającymi określenie liczby wariantów rozwiązań modernizacyjnych wg (6.1), na podstawie wybranych składników rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych.

Tabela 6.7. Liczba możliwych wariantów rozwiązań modernizacyjnych.

Nr zbioru składników j	Zbiór składników Z_j	Liczba elementów w kombinacji k_j	Liczba elementów w zbiorze n_j	Liczba kombinacji elementów w zbiorze składników $C_{n_j}^{k_j}(Z_j)$
1	(1) ceramika poryzowana (2) polistyren ekspandowany 1	2	2	1
2	(3) polistyren ekspandowany (4) polistyren ekstrudowany (5) wełna skalna - kamienna (6) pianka poliuretanowa	1	4	4
3	(8) pompa ciepła gruntowa (9) pompa ciepła wodna	1	2	2
Liczba wariantów rozwiązań modernizacyjnych V				8

Zbiór Z_1 jest nierozłącznym zbiorem składników pozostawionych jak w budynku referencyjnym i wykorzystywanym we wszystkich wariantach rozwiązań modernizacyjnych.

Składnik (7) kocioł gazowy, jest uwzględniany wyłącznie w budynku referencyjnym przed modernizacją dla celów porównawczych, ale nie jest uwzględniany w żadnym wariantcie rozwiązania modernizacyjnego, ponieważ wstępne obliczenia wykazały, że warianty modernizacyjne z zastosowaniem kotła gazowego nie spełniają Warunków Technicznych (Rozporządzenie, 2002).

Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartości wskaźników energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v = 1, 8\}$ z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 6.8.

Wariant $v = 0$ dotyczy wyznaczenia wartości wskaźnika $\Delta_{ec,v=0}$ dla budynku referencyjnego przed modernizacją.

Wartości wskaźnika energochłonności dla wszystkich wariantów rozwiązań modernizacyjnych są mniejsze niż wartość wskaźnika energochłonności dla Wariantu 0 w budynku referencyjnym przed modernizacją.

Tabela 6.8. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań modernizacyjnych.

Nr wariantu rozwiązania {v}	Nr składnika {i}	Warianty rozwiązań	$\delta_{ec,i}$	$\Delta_{ec,v}$
0	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.5810
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	7	Kocioł gazowy	0.7119	
1	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4688
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	3	Polistyren ekspandowany 2	0.2716	
	8	Pompa ciepła gruntowa	0.5726	
2	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4706
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	4	Polistyren ekstrudowany	0.2789	
	8	Pompa ciepła gruntowa	0.5726	
3	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4822
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	5	Włna skalna - kamienna	0.3253	
	8	Pompa ciepła gruntowa	0.5726	
4	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.5045
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	6	Pianka poliuretanowa	0.4143	
	8	Pompa ciepła gruntowa	0.5726	
5	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4627
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	3	Polistyren ekspandowany 2	0.2716	
	9	Pompa ciepła wodna	0.5481	
6	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4645
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	4	Polistyren ekstrudowany	0.2789	
	9	Pompa ciepła wodna	0.5481	
7	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4761
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	5	Włna skalna - kamienna	0.3253	
	9	Pompa ciepła wodna	0.5481	
8	1	Ceramika poryzowana	0.5283	0.4984
	2	Polistyren ekspandowany 1	0.5027	
	6	Pianka poliuretanowa	0.4143	
	9	Pompa ciepła wodna	0.5481	

Na podstawie analizy uzyskanych wyników wyznaczono globalny wskaźnik energochłonności budynku jako najmniejszą wartość zgodnie z formułą (5.12):

$$\Delta_{ec} = \min\{\Delta_{ec,v}\} = \Delta_{ec,v=5} = 0.4627$$

dla wariantu rozwiązania $v = 5$ przy kombinacji składników: $i = 1$ Ceramika poryzowana / $i = 2$ Polistyren ekspandowany 1 / $i = 3$ Polistyren ekspandowany 2 / $i = 9$ Pompa ciepła wodna.

Dla uporządkowanego zbioru wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v\}$ przedstawiono w Tabeli 6.9 wartości wskaźników klas energochłonności wariantów rozwiązań EC_v wg (5.10) oraz klas energochłonności wariantów rozwiązań wg (5.11).

Tabela 6.9. Klasy energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych.

Lp.	Uporządkowany zbiór wariantów rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	EC_v	Klasa energochłonności wariantów rozwiązań
1	5	0.4627	0.000	ECI
2	6	0.4645	0.043	ECI
3	1	0.4688	0.146	ECII
4	2	0.4706	0.189	ECIII
5	7	0.4761	0.321	ECIV
6	3	0.4822	0.467	ECV
7	8	0.4984	0.854	ECVI
8	4	0.5045	1.000	ECVII

W małym zbiorze analizowanych wariantów rozwiązań modernizacyjnych dwa warianty $v = 5$ i $v = 6$ charakteryzuje doskonała klasa energochłonności ECI oraz jeden wariant $v = 1$ – bardzo dobra klasa energochłonności ECII. Natomiast niezalecaną klasą energochłonności ECVII charakteryzują się dwa warianty $v = 8$ i $v = 4$.

Dyskusja wyników

Analiza studium przypadku na podstawie opracowanej metody, przy założeniu takiego samego stopnia ważności dla poszczególnych kryteriów ($w_j = 0.20$, $j = \{E, C, D, P, M\}$), pozwala określić następujące fakty.

1. Największa wartość globalnego wskaźnika energochłonności dla Wariantu 0 rozwiązania zastosowanego w budynku referencyjnym $\Delta_{ec,v=0} = 0.5810$ wskazuje na nieopłacalność pozostawienia tego rozwiązania i – przede wszystkim – na konieczność modernizacji energetycznej budynku w celu spełnienia aktualnych wymagań określonych w Warunkach Technicznych (Rozporządzenie, 2002).
2. Rozwiązania gwarantujące spełnienie Warunków Technicznych (Rozporządzenie, 2002), muszą uwzględniać dodatkowe docieplenie ścian wykonane z jednego z następującej grupy materiałów: polistyrenu ekspandowanego, polistyrenu ekstrudowanego, wełny skalnej – kamiennej, pianki poliuretanowej oraz wymianę źródła ciepła (warianty 1 – 8).

3. Proponowana metoda umożliwia również określenie wartości poszczególnych kryteriów dla każdego wariantu rozwiązania. Przykładowo dla wariantu rozwiązania $v = 5$ charakteryzującego się najmniejszą wartością globalnego wskaźnika energochłonności, w Tabeli 6.10. przedstawiono zestawienie wartości kryteriów dla poszczególnych składników zawartych w tym rozwiązaniu, a w Tabeli 6.11. wartości poszczególnych kryteriów dla kombinacji składników tego wariantu.

Tabela 6.10. Wartości kryteriów dla składników zawartych w wariantcie $v = 5$.

Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	Nr składnika $\{i\}$	Składniki rozwiązania	E_i [kWh/(m ² rok)]	C_i [zł]*	D_i [rok]**	P_i [rok]	M_i [kg/rok]
5	1	Ceramika poryzowana	152.59	36 000	50	50.0000	3347
	2	Polistyren ekspandowany 1	152.59	23 500	50	50.0000	3347
	3	Polistyren ekspandowany 2	140.09	22 500	50	28.6820	3073
	7	Pompa ciepła wodna	48.00	115 000	25	17.5204	3685

* Koszt składników określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji.

Tabela 6.11. Wartości poszczególnych kryteriów dla wariantu rozwiązania $v = 5$.

Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]	D_v [rok]	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
5	44.28	137 500	25	20.2288	3400

Względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową E_v [kWh/(m²rok)] najkorzystniejszego rozwiązania $v = 5$ obliczono według równania (4.1) wraz z odpowiednio stosowanymi równaniami (4.2 – 4.24).

Koszt ceramiki poryzowanej oraz polistyrenu ekspandowanego nie są uwzględniane w koszcie C_v rozwiązania $v = 5$ ze względu na fakt występowania w budynku referencyjnym.

Okres trwałości D_v wariantu rozwiązania $v = 5$ przyjęto jako najmniejszy okres trwałości spośród składników w tym wariantcie.

Czas zwrotu P_v obliczono na podstawie kosztów C_v poniesionych na wykonanie tego rozwiązania oraz przyjętego minimalnego okresu trwałości D_v .

Emisyjność rozwiązania M_v obliczono na podstawie energii końcowej E_v oraz wartości wskaźnika emisji $WECO_2$ dla energii elektrycznej.

Wariant rozwiązania $v = 5$ charakteryzuje się następującymi parametrami: energia końcowa – 44.28 kWh/(m²rok); koszt – 137 500 zł; trwałość rozwiązania determinowana przez trwałość pompy ciepła wodnej – 25 lat; czas zwrotu nakładów inwestycyjnych – 20.2288 lat = 20 lat 2 miesiące 23 dni, emisyjność CO₂ – 3400 kg/rok.

6.3. Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego

6.3.1. Analiza na podstawie zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów

Przeprowadzono analizę wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego z uwzględnieniem funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów. W tym celu dla każdego wariantu rozwiązania modernizacyjnego wyznaczono wskaźnik energochłonności modernizowanego budynku referencyjnego w funkcji wartości parametru redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Zaproponowano sposób określenia minimalnej wartości parametru redystrybucji umożliwiający wyznaczenie najmniejszej wartości globalnego wskaźnika energochłonności i jednocześnie nie powodujący nieakceptowalnych zaburzeń interpretacji wyboru rozwiązania w wyniku nadmiernej redystrybucji wartości wskaźników kryteriów.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem składników stanowiących podstawę modernizacji budynku referencyjnego opisanym w punkcie 6.2. i zestawionym w Tabeli 6.5.

Etap 2. Określenie cząstkowych wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego

Znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{P,i}$ (5.4), $\delta_{M,i}$ (5.5) przyjęto zgodnie z Tabelą 6.6.

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) dla parametrów redystrybucji określający udział wartości wskaźników kryteriów w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Następnie obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności składników $\delta_{ec,i}$ (5.7) z uwzględnieniem obliczeniowych wag kryterialnych.

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego

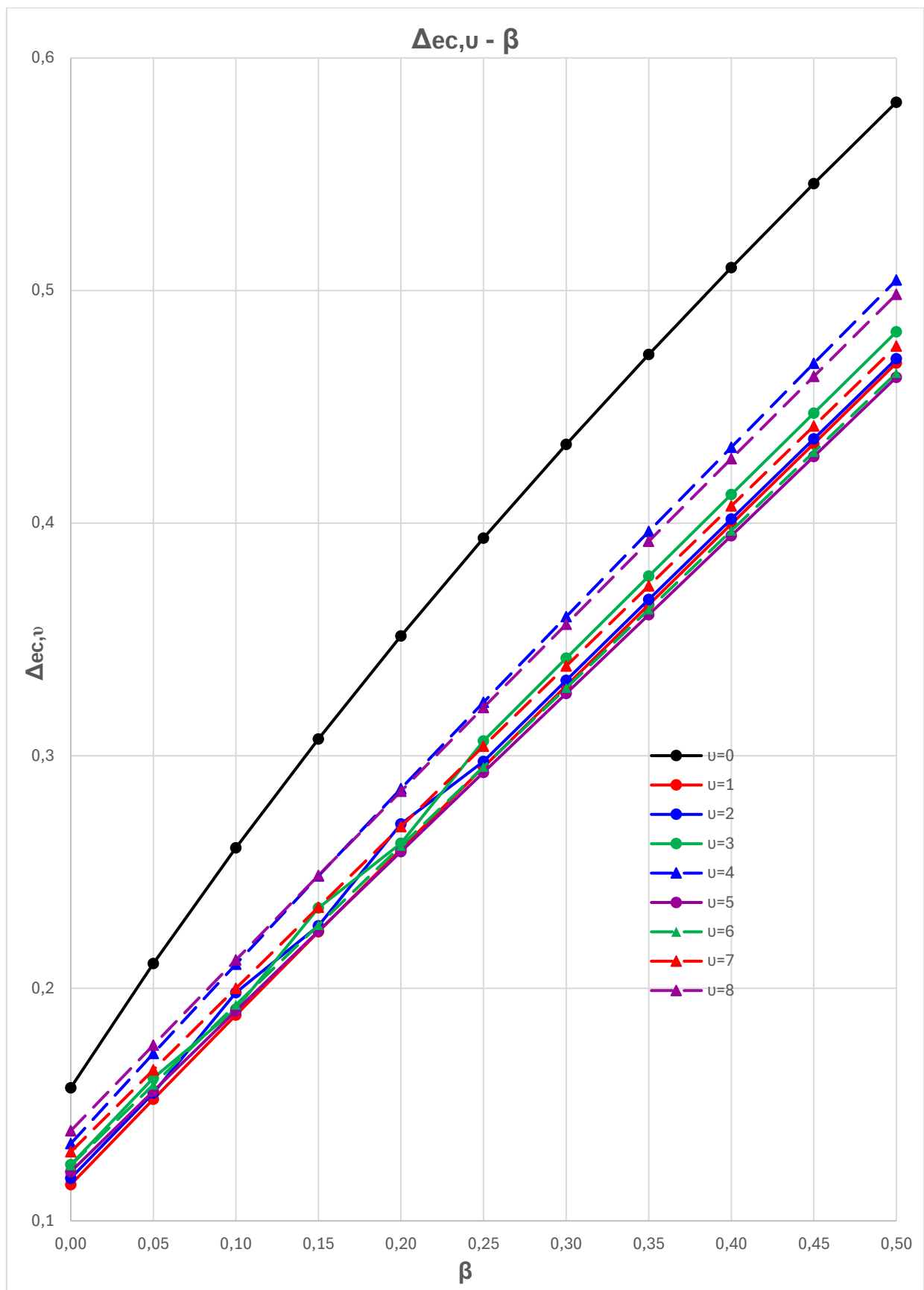
Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla każdego z wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v\}$, z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 6.12.

Tabela 6.12. Zestawienie wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji wartości parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Parametr redystrybucji β	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	$\Delta_{ec,v}$								
0	0.1572	0.1156	0.1183	0.1241	0.1332	0.1211	0.1238	0.1297	0.1387
0.05	0.2106	0.1522	0.1549	0.1613	0.1720	0.1558	0.1585	0.1649	0.1755
0.1	0.2604	0.1884	0.1981	0.1911	0.2103	0.1903	0.1929	0.2000	0.2121
0.15	0.3072	0.2243	0.2269	0.2345	0.2482	0.2246	0.2271	0.2348	0.2485
0.2	0.3514	0.2598	0.2706	0.2623	0.2858	0.2587	0.2612	0.2695	0.2847
0.25	0.3935	0.2950	0.2975	0.3064	0.3230	0.2928	0.2952	0.3041	0.3207
0.3	0.4338	0.3300	0.3324	0.3419	0.3598	0.3267	0.3291	0.3386	0.3565
0.35	0.4725	0.3649	0.3671	0.3772	0.3964	0.3606	0.3629	0.3730	0.3921
0.4	0.5098	0.3995	0.4017	0.4123	0.4326	0.3946	0.3967	0.4073	0.4277
0.45	0.5459	0.4342	0.4362	0.4473	0.4687	0.4286	0.4306	0.4417	0.4631
0.5	0.5810	0.4688	0.4706	0.4822	0.5045	0.4627	0.4645	0.4761	0.4984

W tabeli wyróżniono wartości globalnego wskaźnika energochłonności budynku, które dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.15$ zostały osiągnięte dla wariantu modernizacji budynku referencyjnego $v = 1$, a dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.2 \leq \beta \leq 0.5$ - dla wariantu modernizacji $v = 5$.

W celu analizy wpływu wag kryterialnych na wartość wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego na Rys. 6.2 przedstawiono wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ w funkcji parametru redystrybucji β dla budynku referencyjnego $v = 0$ i dla każdego wariantu rozwiązania modernizacyjnego $v = [1, 8]$.



Rys. 6.2. Wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,\nu}$ w funkcji parametru redystrybucji β .

Szczegółowa analiza zależności wartości wskaźnika energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych w funkcji parametru redystrybucji umożliwia wyróżnienie zakresów parametrów redystrybucji, w których występuje identyczna kolejność wariantów rozwiązań opisywana wartościami wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$.

W następującej sekwencji zestawień tabelarycznych (Tabele 6.13 – 6.16) przedstawiono, dla poszczególnych zakresów parametrów redystrybucji, układy kolejności wariantów rozwiązań modernizacyjnych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika energochłonności wraz z przyporządkowanymi wartościami kryteriów oceny E_v (4.1), C_v (4.25), D_v (4.33), P_v (4.34) i M_v (4.43).

Zakres 1: $0.26 \leq \beta \leq 0.5$

Tabela 6.13. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.26 \leq \beta \leq 0.5$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.26$	$\beta = 0.5$					
1	5	0.2996	0.4627	44.28	137 500	25	20.23	3400
2	6	0.3020	0.4645	43.67	143 000	25	20.92	3353
3	1	0.3021	0.4688	44.57	142 500	25	21.02	3422
4	2	0.3045	0.4706	43.93	148 000	25	21.70	3373
5	7	0.3110	0.4761	43.59	149 000	25	21.78	3347
6	3	0.3135	0.4822	43.85	154 000	25	22.57	3367
7	8	0.3278	0.4984	42.93	145 000	25	21.07	3296
8	4	0.3304	0.5045	43.18	150 000	25	21.85	3315
9	0 ^c	0.4017	0.5810	152.59	87 500 ^a	20	∞ ^b	3347

Uwagi:

* Koszt dla rozwiązań określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji

^a Koszt tylko analizowanych składników budynku referencyjnego zwaloryzowany do cen z dnia 14.09.2024 r.

^b Wartość czasu zwrotu „ ∞ ” określona wg (wzoru 4.34) oznacza, że istniejący budynek referencyjny nie ma żadnych rozwiązań modernizacyjnych umożliwiających wykazanie oszczędności zużycia energii.

^c Kolorem pomarańczowym wyróżniono wariant budynku referencyjnego przed modernizacją.

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.26 \leq \beta \leq 0.5$ najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku osiąga wariant rozwiązania modernizacyjnego $v = 5$. Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla $\beta = 0.26$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2996$, a dla $\beta = 0.5$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.4627$.

Zakres 2: $0.16 \leq \beta \leq 0.25$

Tabela 6.14. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.16 \leq \beta \leq 0.25$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.16$	$\beta = 0.25$					
1	5	0.23141	0.2928	44.28	137 500	25	20.23	3400
2	1	0.23142	0.2950	44.57	142 500	25	21.02	3422
3	6	0.23398	0.2952	43.67	143 000	25	20.92	3353
4	2	0.23399	0.2975	43.93	148 000	25	21.70	3373
5	7	0.24176	0.3041	43.59	149 000	25	21.78	3347
6	3	0.24178	0.3064	43.85	154 000	25	22.57	3367
7	8	0.25576	0.3207	42.93	145 000	25	21.07	3296
8	4	0.25578	0.3230	43.18	150 000	25	21.85	3315
9	0 ^c	0.31622	0.3935	152.59	87 500 ^a	20	∞^b	3347

Wskaźnik energochłonności budynku dla parametru $\beta = 0.16$ przedstawiono w Tabeli 6.14 z większą dokładnością, aby dokładnie wykazać niewielkie różnice w wartościach tego wskaźnika pomiędzy rozwiązaniami.

Dla wartości parametrów redystrybucji w zakresie $0.16 \leq \beta \leq 0.25$ wskaźnik energochłonności budynku przyjmuje najmniejsze wartości również dla wariantu rozwiązania modernizacyjnego $v = 5$. Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla $\beta = 0.16$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.23141$, a dla $\beta = 0.25$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2928$.

Zakres 3: $0.08 \leq \beta \leq 0.15$

Tabela 6.15. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.08 \leq \beta \leq 0.15$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.08$	$\beta = 0.15$					
1	1	0.1740	0.2243	44.57	142 500	25	21.02	3422
2	5	0.1765	0.2246	44.28	137 500	25	20.23	3400
3	2	0.1767	0.2269	43.93	148 000	25	21.70	3373
4	6	0.1792	0.2271	43.67	143 000	25	20.92	3353
5	3	0.1835	0.2345	43.85	154 000	25	22.57	3367
6	7	0.1860	0.2348	43.59	149 000	25	21.78	3347
7	4	0.1950	0.2482	43.18	150 000	25	21.85	3315
8	8	0.1975	0.2485	42.93	145 000	25	21.07	3296
9	0 ^c	0.2409	0.3070	152.59	87 500 ^a	20	∞^b	3347

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $0.08 \leq \beta \leq 0.15$ uzyskał wariant rozwiązania modernizacyjnego $v = 1$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.1740$ dla $\beta = 0.08$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.2243$ dla $\beta = 0.15$.

Zakres 4: $0 \leq \beta \leq 0.07$

Tabela 6.16. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.07$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0$	$\beta = 0.07$					
1	1	0.1156	0.1668	44.57	142 500	25	21.02	3422
2	2	0.1183	0.1694	43.93	148 000	25	21.70	3373
3	5	0.1211	0.1696	44.28	137 500	25	20.23	3400
4	6	0.1238	0.1723	43.67	143 000	25	20.92	3353
5	3	0.1241	0.1761	43.85	154 000	25	22.57	3367
6	7	0.1297	0.1790	43.59	149 000	25	21.78	3347
7	4	0.1332	0.1874	43.18	150 000	25	21.85	3315
8	8	0.1387	0.1902	42.93	145 000	25	21.07	3296
9	0 ^c	0.1572	0.2309	152.59	87 500 ^a	20	∞ ^b	3347

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.07$ najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku wykazuje rozwiązanie modernizacyjne $v = 1$, i wynoszą $\Delta_{ec,v=1} = 0.1156$ dla $\beta = 0$ oraz $\Delta_{ec,v=1} = 0.1668$ dla $\beta = 0.07$.

Wyniki przedstawione w Tabelach 6.13 – 6.16 oznaczają, że oddzielnie dla każdego z czterech zakresów parametru redystrybucji β występuje jednorodność (homogeniczność) proporcji wyników nie tylko pomiędzy wartościami wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$, ale również pomiędzy wszystkimi wartościami kryteriów oceny wariantów rozwiązań modernizacyjnych.

Jednakże w całym zakresie parametru redystrybucji $0 \leq \beta \leq 0.5$ taka jednorodność proporcji wyników nie występuje. Kolejność szeregu rozwiązań modernizacyjnych jest inna w każdym zakresie zmian parametru redystrybucji.

Dla wartości $\beta = 0.26$, określającego dolną granicę Zakresu 1 zmian parametru redystrybucji do określenia wag kryterialnych dla składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego, w Tabeli 6.17 przedstawiono wagi poszczególnych kryteriów obliczone według (5.6) wraz z wartościami wskaźnika energochłonności $\delta_{ec,i}$ (5.7).

Tabela 6.17. Znormalizowane wartości kryteriów optymalizacji, wagi kryterialne i wskaźniki energochłonności dla wybranych składników, dla parametru redystrybucji $\beta = 0.26$.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	$\delta_{E,i}$	$\delta_{C,i}$	$\delta_{D,i}$	$\delta_{P,i}$	$\delta_{M,i}$	$\delta_{ec,i}$
		w_E	w_C	w_D	w_P	w_M	
1	Ceramika poryzowana	1.0000	0.1385	0.0000	1.0000	0.5031	0.3553
		0.1069	0.2769	0.3043	0.1069	0.2050	
2	Polistyren ekspandowany 1	1.0000	0.0103	0.0000	1.0000	0.5031	0.3121
		0.1043	0.2948	0.2968	0.1043	0.1999	
3	Polistyren ekspandowany 2	0.8805	0.0000	0.0000	0.3436	0.1340	0.1862
		0.1041	0.2428	0.2428	0.1887	0.2217	
4	Polistyren ekstrudowany	0.8608	0.0564	0.0000	0.4040	0.0732	0.1959
		0.1078	0.2352	0.2442	0.1802	0.2326	
5	Wełna skalna - kamienna	0.8582	0.1179	0.0000	0.5853	0.0652	0.2319
		0.1124	0.2341	0.2535	0.1572	0.2428	
6	Pianka poliuretanowa	0.8371	0.0769	0.8333	0.3243	0.0000	0.2994
		0.1250	0.2599	0.1257	0.2160	0.2735	
7	Kocioł gazowy	1.0000	0.0564	1.0000	1.0000	0.5031	0.5378
		0.1306	0.3580	0.1306	0.1306	0.2503	
8	Pompa ciepła gruntowa	0.0038	1.0000	0.8333	0.0256	1.0000	0.3546
		0.3174	0.1118	0.1462	0.3129	0.1118	
9	Pompa ciepła wodna	0.0000	0.9487	0.8333	0.0000	0.9587	0.3446
		0.3103	0.1194	0.1426	0.3103	0.1174	

W przypadku parametru redystrybucji $\beta = 0.26$ obserwuje się zróżnicowanie wartości wag. Najmniejsza wartość wagi określona jest dla składnika $i = 3$: Polistyren ekspandowany 2 i wynosi $w_E = 0.1041$, a największa wartość wagi dla tego składnika wynosi $w_C = 0.2428$. Z kolei, największą wartość wagi wynoszącą $w_C = 0.3580$ osiąga składnik $i = 7$: Kocioł gazowy, a najmniejsza wartość wagi dla tego składnika wynosi $w_E = 0.1306$.

Dla mniejszych wartości parametru redystrybucji $0 < \beta \leq 0.25$ obserwuje się większe zróżnicowanie wag prowadzące do zaburzeń jednorodności proporcji wartości wskaźnika energochłonności, tym większych im mniejsza jest wartość parametru redystrybucji, przy zachowaniu możliwości udziału nawet niekorzystnych wartości kryteriów.

Dla najmniejszej wartości parametru redystrybucji $\beta = 0$, w Tabeli 6.18 przedstawiono wagi poszczególnych kryteriów obliczone według (5.6) wraz z wartościami wskaźnika energochłonności $\delta_{ec,i}$ (5.7).

Tabela 6.18. Znormalizowane wartości kryteriów optymalizacji, wagi kryterialne i wskaźniki energochłonności dla wybranych składników, dla parametru redystrybucji $\beta = 0$.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	$\delta_{E,i}$	$\delta_{C,i}$	$\delta_{D,i}$	$\delta_{P,i}$	$\delta_{M,i}$	$\delta_{ec,i}$
		w_E	w_C	w_D	w_P	w_M	
1	Ceramika poryzowana	1.0000	0.1385	0.0000	1.0000	0.5031	0.1566
		0.0000	0.3653	0.4240	0.0000	0.2107	
2	Polistyren ekspandowany 1	1.0000	0.0103	0.0000	1.0000	0.5031	0.1046
		0.0000	0.3980	0.4021	0.0000	0.1998	
3	Polistyren ekspandowany 2	0.8805	0.0000	0.0000	0.3436	0.1340	0.1227
		0.0328	0.2746	0.2746	0.1802	0.2378	
4	Polistyren ekstrudowany	0.8608	0.0564	0.0000	0.4040	0.0732	0.1336
		0.0386	0.2617	0.2774	0.1653	0.2570	
5	Wełna skalna - kamienna	0.8582	0.1179	0.0000	0.5853	0.0652	0.1569
		0.0420	0.2615	0.2964	0.1229	0.2771	
6	Pianka poliuretanowa	0.8371	0.0769	0.8333	0.3243	0.0000	0.1931
		0.0566	0.3152	0.0569	0.2307	0.3415	
7	Kocioł gazowy	1.0000	0.0564	1.0000	1.0000	0.5031	0.2105
		0.0000	0.6550	0.0000	0.0000	0.3450	
8	Pompa ciepła gruntowa	0.0038	1.0000	0.8333	0.0256	1.0000	0.0784
		0.4661	0.0000	0.0780	0.4559	0.0000	
9	Pompa ciepła wodna	0.0000	0.9487	0.8333	0.0000	0.9587	0.1005
		0.4426	0.0227	0.0738	0.4426	0.0183	

W przypadku parametru redystrybucji $\beta = 0$ następuje całkowite wyeliminowanie najmniej korzystnych wartości kryteriów oraz nadmierne przeszacowanie wagowe korzystnych wartości kryteriów, co – przy zerowych wartościach najbardziej korzystnych kryteriów – również je eliminuje.

6.3.2. Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych

Przeprowadzono analizę wpływu ustalonych kombinacji wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem składników stanowiących podstawę modernizacji budynku referencyjnego opisanym w punkcie 6.2 zestawionym w Tabeli 6.5.

Etap 2. Określenie cząstkowych wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego

Znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{P,i}$ (5.4), $\delta_{M,i}$ (5.5) przyjęto zgodnie z Tabelą 7.6.

Wagi poszczególnych kryteriów ustalono na podstawie założenia jednego dominującego wskaźnika kryterium optymalizacji i uzupełniająco równoważnych pozostałych wskaźników kryteriów optymalizacji, zgodnie z zestawieniem kombinacji wag w Tabeli 6.19.

Tabela 6.19. Zestawieniem kombinacji wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wartości wag				
	w_E	w_C	w_D	w_P	w_M
E	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
C	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
D	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1
P	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1
M	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6

Następnie obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności $\delta_{ec,i}$ (5.7) z uwzględnieniem ustalonych wag kryterialnych.

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego

Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla każdego z wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v\}$, z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 6.20.

Tabela 6.20. Zestawienie wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji kombinacji wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	$\Delta_{ec,v}$								
E	0.7905	0.5949	0.5934	0.5989	0.6073	0.5914	0.5898	0.5953	0.6038
C	0.3247	0.3780	0.3859	0.3994	0.4054	0.3685	0.3765	0.3900	0.3960
D	0.4571	0.3386	0.3395	0.3453	0.4606	0.3355	0.3364	0.3422	0.4575
P	0.7905	0.5306	0.5390	0.5675	0.5460	0.5243	0.5328	0.5612	0.5397
M	0.5420	0.5019	0.4952	0.5000	0.5030	0.4937	0.4870	0.4917	0.4948

W następującej sekwencji zestawień tabelarycznych (Tabele 6.21 – 6.25) przedstawiono, dla poszczególnych kombinacji wag kryterialnych, układy kolejności wariantów rozwiązań modernizacyjnych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika energochłonności wraz z przyporządkowanymi wartościami kryteriów oceny E_v (4.1), C_v (4.25), D_v (4.33), P_v (4.34) i M_v (4.43).

Tabela 6.21. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych E.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
1	6	0.5898	43.67	143 000	25	20.92	3353
2	5	0.5914	44.28	137 500	25	20.23	3400
3	2	0.5934	43.93	148 000	25	21.70	3373
4	1	0.5949	44.57	142 500	25	21.02	3422
5	7	0.5953	43.59	149 000	25	21.78	3347
6	3	0.5989	43.85	154 000	25	22.57	3367
7	8	0.6038	42.93	145 000	25	21.07	3296
8	4	0.6073	43.18	150 000	25	21.85	3315
9	0 ^c	0.7905	152.59	87 500 ^a	20	∞ ^b	3347

Dla kombinacji wag kryterialnych E najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku określa wariant rozwiązania modernizacyjnego $v = 6$, a globalny wskaźnik energochłonności budynku wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=6} = \Delta_{ec,v=6}^E = 0.5898$. Wartość ta jest znacznie większa nie tylko niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^{\beta=0.5} = 0.4627$, ale nawet większa od największej wartości wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec,v=4}^{\beta=0.5} = 0.5045$, osiągniętej dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 6.13.

Tabela 6.22. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych C.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
1	0 ^c	0.3247	152.59	87 500 ^a	20	∞ ^b	3347
2	5	0.3685	44.28	137 500	25	20.23	3400
3	6	0.3765	43.67	143 000	25	20.92	3353
4	1	0.3780	44.57	142 500	25	21.02	3422
5	2	0.3859	43.93	148 000	25	21.70	3373
6	7	0.3900	43.59	149 000	25	21.78	3347
7	8	0.3960	42.93	145 000	25	21.07	3296
8	3	0.3994	43.85	154 000	25	22.57	3367
9	4	0.4054	43.18	150 000	25	21.85	3315

Dla kombinacji wag kryterialnych C globalny wskaźnik energochłonności budynku określa wariant rozwiązania modernizacyjnego $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^C = 0.3685$. Wartość ta, ale także nawet największa wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v=4}^C = 0.4054$, zawierają się w zakresie wartości wskaźnika energochłonności budynku osiągniętych

dla rozwiązań w Zakresie 1 zmian parametru redystrybucji $0.26 \leq \beta \leq 0.5$, Tabela 6.13. Kolejność szeregu rozwiązań modernizacyjnych jest dokładnie taka sama dla pierwszych pięciu rozwiązań w Zakresie 1 zmian parametru redystrybucji.

Tabela 6.23. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych D.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
1	5	0.3355	44.28	137 500	25	20.23	3400
2	6	0.3364	43.67	143 000	25	20.92	3353
3	1	0.3386	44.57	142 500	25	21.02	3422
4	2	0.3395	43.93	148 000	25	21.70	3373
5	7	0.3422	43.59	149 000	25	21.78	3347
6	3	0.3453	43.85	154 000	25	22.57	3367
7	0 ^c	0.4571	152.59	87 500 ^a	20	∞^b	3347
8	8	0.4575	42.93	145 000	25	21.07	3296
9	4	0.4606	43.18	150 000	25	21.85	3315

Analiza wyników dla kombinacji wag kryterialnych D wskazuje, że globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie modernizacyjne $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^D = 0.3355$. Wartość ta, a nawet największa wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v=3}^D = 0.4606$, zawierają się w zakresie wartości wskaźnika energochłonności budynku osiągniętych dla rozwiązań w Zakresie 1 zmian parametru redystrybucji $0.26 \leq \beta \leq 0.5$, Tabela 6.13. Kolejność szeregu wariantów rozwiązań modernizacyjnych jest dokładnie taka sama jak dla rozwiązań w Zakresie 1 zmian parametru redystrybucji.

Tabela 6.24. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości-wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych P.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
1	5	0.5243	44.28	137 500	25	20.23	3400
2	1	0.5306	44.57	142 500	25	21.02	3422
3	6	0.5328	43.67	143 000	25	20.92	3353
4	2	0.5390	43.93	148 000	25	21.70	3373
5	8	0.5397	42.93	145 000	25	21.07	3296
6	4	0.5460	43.18	150 000	25	21.85	3315
7	7	0.5612	43.59	149 000	25	21.78	3347
8	3	0.5675	43.85	154 000	25	22.57	3367
9	0 ^c	0.7905	152.59	87 500 ^a	20	∞^b	3347

Dla kombinacji wag kryterialnych P globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie modernizacyjne $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^P = 0.5243$. Wartość ta jest większa nawet od największej wartości wskaźnika energochłonności budynku osiągniętych dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela 6.13.

Tabela 6.25. Zestawienie wariantów rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych M.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
1	6	0.4870	43.67	143 000	25	20.92	3353
2	7	0.4917	43.59	149 000	25	21.78	3347
3	5	0.4937	44.28	137 500	25	20.23	3400
4	2	0.4952	43.93	148 000	25	21.70	3373
5	8	0.4948	42.93	145 000	25	21.07	3296
6	3	0.5000	43.85	154 000	25	22.57	3367
7	1	0.5019	44.57	142 500	25	21.02	3422
8	4	0.5030	43.18	150 000	25	21.85	3315
9	0 ^c	0.5420	152.59	87 500 ^a	20	∞ ^b	3347

Dla kombinacji wag kryterialnych M globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie modernizacyjne $v = 6$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=6} = \Delta_{ec,v=6}^M = 0.4870$. Wartość ta jest większa niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^{\beta=0.5} = 0.4627$ i nie jest większa tylko od dwóch największych wartości wskaźnika energochłonności uznanych jako niemiarodajne do określenia globalnego wskaźnika, tj. $\Delta_{ec,v=8}^{\beta=0.5} = 0.4984$ i $\Delta_{ec,v=4}^{\beta=0.5} = 0.5045$, osiągniętych dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela 6.13.

6.3.3. Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego

Wyniki analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku modernizowanego pozwalają określić następujące fakty.

1. W przypadku zastosowania metody zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów:

- zakres parametru redystrybucji $0.26 \leq \beta \leq 0.5$ jest najbardziej miarodajnym zakresem umożliwiającym wyznaczenie jednorodnej kolejności szeregu wartości wskaźnika energochłonności poszczególnych rozwiązań modernizacyjnych,
 - wartości globalnego wskaźnika energochłonności określone dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.26 \leq \beta \leq 0.5$ są odpowiednio skalowane zgodnie z funkcją redystrybucji wartości wskaźników kryteriów.
2. W przypadku zastosowania metody ustalonych kombinacji wag kryterialnych:
 - rozwiązania dla kombinacji wag kryterialnych D i C w największym stopniu potwierdzają zgodność jednorodnej kolejności szeregu wartości wskaźnika energochłonności poszczególnych rozwiązań modernizacyjnych z rozwiązaniami uzyskanymi metodą zmiennych wag kryterialnych dla zakresu parametru redystrybucji $0.26 \leq \beta \leq 0.5$ i mogą być uznane jako istotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności,
 - rozwiązania dla kombinacji wag kryterialnych E, P i M nie wskazują na jakąkolwiek zgodność z rozwiązaniami uzyskanymi metodą zmiennych wag kryterialnych i mogą być uznane jako nieistotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności.
 3. Z zastrzeżeniem specyfiki przyjętego studium przypadku budynku referencyjnego, uogólnienie metody zmiennych wag kryterialnych na inne przypadki budynków powinno być odpowiednio weryfikowane.
 4. Uzasadniona jest rekomendacja wyznaczenia globalnego wskaźnika energochłonności dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$ w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania modernizacyjnego. Pomimo tego, że w rozwiązaniach dla $\beta = 0.5$ wagi kryterialne są jednakowe, to nie jest trywialnym zadaniem rozstrzygnięcia, który wariant rozwiązania modernizacyjnego jest najbardziej korzystny.
 5. Proponowana metoda umożliwia wyraźne wskazanie rozwiązania najbardziej korzystnego, z zastrzeżeniem, że ostateczna decyzja dokonania wyboru wag kryterialnych, a nawet wariantu modernizacji, mogą być przyjmowane są na podstawie preferencji użytkownika.

7. Studium przypadku budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem hybrydowego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności

7.1. Opis budynku bazowego

W celu określenia globalnego wskaźnika energochłonności budynku przyjęto jako budynek bazowy dom jednorodzinny przeznaczony zaprojektowania.

Do analizy przyjęto budynek identyczny pod względem lokalizacji, wymiarów, powierzchni oraz programu funkcjonalnego jak budynek referencyjny opisany w punkcie 6.1 niniejszej rozprawy. Rozkład pomieszczeń budynku bazowego jest przedstawiony w na Rys. 6.1. Powierzchnie i objętości poszczególnych przegród budowlanych są zgodne z opisami przedstawionymi w Tabeli 6.1. Wymiary otworów okiennych, drzwi zewnętrznych i bramy garażowej przyjęto według Tabeli 6.2.

Budynek bazowy zostanie wybudowany w Kielcach, w III strefie klimatycznej w otoczeniu innych budynków o zbliżonej wysokości.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

W celu określenia budynku bazowego przyjęto dziewięć składników rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych w podziale na pięć grup.

a) Przegroda – ściana zewnętrzna:

- (1) Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska): płyta gipsowo-kartonowa (grubość: 0.0125 m, $\lambda = 0.250$ W/mK); konstrukcja szkieletowa drewniana wypełniona wełną szklaną (grubość: 0.15 m, $\lambda = 0.036$ W/mK); folia paroizolacyjna (grubość: 0.001 m, $\lambda = 0.300$ W/mK); wełna szklana (grubość: 0.05 m, $\lambda = 0.036$ W/mK); płyta OSB (grubość: 0.01 m, $\lambda = 0.130$ W/mK); wiatroizolacja (grubość: 0.001 m, $\lambda = 0.170$ W/mK); tynk silikatowy (grubość: 0.01 m, $\lambda = 0.800$ W/mK);
- (2) Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian: tynk mineralny (grubość: 0.01 m, $\lambda = 1.00$ W/mK); bloczek YTONG Energo (grubość: 0.24 m, $\lambda = 0.095$ W/mK); styropian (grubość: 0.15 m, $\lambda = 0.033$ W/mK); tynk silikatowy (grubość: 0.01 m, $\lambda = 0.800$ W/mK);
- (3) Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa: tynk mineralny (grubość: 0.01 m, $\lambda = 1.00$ W/mK); porotherm (grubość: 0.25 m, $\lambda = 0.305$ W/mK); wełna szklana (grubość: 0.15 m, $\lambda = 0.034$ W/mK); wentylowana pustka powietrzna (grubość: 0.02 m); mur z cegły klinkierowej (grubość: 0.12 m, $\lambda = 1.050$ W/mK);

b) Przegroda - Dach:

- (4) Dach 25 cm wełny: płyta gipsowo-kartonowa (grubość: 0.0125 m, $\lambda = 0.250$ W/mK); folia paroizolacyjna (grubość: 0.001 m, $\lambda = 0.300$ W/mK); wełna szklana (grubość: 0.25 m, $\lambda =$

0.032 W/mK); płyta OSB (grubość: 0.01 m, $\lambda = 0.130$ W/mK); membrana izolacyjna (grubość: 0.002 m, $\lambda = 0.180$ W/mK); dachówka cementowa (grubość: 0.01 m, $\lambda = 1.00$ W/mK);

c) **Przegroda – Okna:**

(5) Okna PCV $U = 0.90$ W/m²K;

d) **Przegroda – Drzwi:**

(6) Drzwi $U=1.30$ W/m²K;

e) **Źródła ciepła:**

(7) Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda – dolnym źródłem ciepła jest powietrze (pobór mocy 6 kW, zasobnik CWU o pojemności 180 dm³), fotowoltaika 9 kW;

(8) Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda – dolnym źródłem ciepła jest grunt (pobór mocy 6 kW, zasobnik ciepłej wody użytkowej o pojemności 180 dm³);

(9) Kocioł na pellet (pobór mocy 12 kW, zasobnik CWU o pojemności 180 dm³).

Liczbę możliwych wariantów rozwiązań projektowych V określono na zasadzie wyboru jednego składnika z każdego funkcjonalnego zbioru składników, czyli dla wszystkich możliwych kombinacji składników określonych według formuły (6.1) przy założeniu, że w danej kombinacji nie mogą powtarzać się składniki z tego samego zbioru.

W Tabeli 7.1 przedstawiono zestawienie funkcjonalnych zbiorów składników wraz z parametrami tych zbiorów umożliwiającymi określenie liczby wariantów rozwiązań projektowych wg (6.1), na podstawie wybranych składników rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych.

Tabela 7.1. Liczba możliwych wariantów rozwiązań projektowych.

Nr zbioru składników j	Zbiór składników Z_j	Liczba elementów w kombinacji k_j	Liczba elementów w zbiorze n_j	Liczba kombinacji elementów w zbiorze składników $C_{n_j}^{k_j}(Z_j)$
1	(1) szkielet drewniany (2) gazobeton Ytong (3) Porotherm	1	3	3
2	(4) dach (5) okna (6) drzwi	3	3	1
3	(7) pompa ciepła powietrzna (8) pompa ciepła gruntowa (9) kocioł na pellet	1	3	3
Liczba wariantów rozwiązań projektowych V				9

Zbiór Z_2 jest nierozłącznym zbiorem składników, wykorzystywanym we wszystkich wariantach rozwiązań projektowych.

W przypadku procedury projektowania wybór budynku bazowego zerowej iteracji projektowej jest dowolny. Zatem budynek bazowy będzie stanowił jeden z wariantów rozwiązań projektowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że przyjęcie innego budynku bazowego skutkować będzie zmianą wartości kryteriów dla poszczególnych składników i złożonych z nich wariantów rozwiązań.

Początkowa (zerowa) iteracja projektowa została ustalona następująco:

A. Konstrukcja nośna ścian zewnętrznych w budynku bazowym została przyjęta jako murowana z pustaków Porotherm, warstwę izolacyjną stanowi wełna mineralna, zewnętrzną warstwę ściany stanowi mur z cegły klinkierowej.

B. Budynek wyposażony zostanie w wentylację grawitacyjną z napływem powietrza wentylacyjnego poprzez nawiewniki. Systemy C.O. oraz C.W.U. zasilane będą kotłem zgazowującym drewno o mocy maksymalnej 12 kW. W pomieszczeniach zainstalowane zostaną aluminiowe grzejniki czołowe z możliwością centralnej oraz miejscowej regulacji temperatury.

Wszystkie charakterystyczne dane budynku bazowego - zerowej iteracji projektowej zostały przedstawione w Tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Charakterystyczne parametry budynku bazowego dla zerowej iteracji projektowej.

Parametry		Budynek bazowego		
1.	1.1.	1.1.1.	Mieszkalny	
		1.1.2.	Jednorodzinny	
		1.1.3.	Nowoprojektowany	
		1.1.4.	2	
		1.1.5.	Garaż	1
			Wiatrołap	1
			Pomieszczenie techniczne	1
			Pokoje	4
			Kuchnia	1
			Łazienki/WC	2
			Klatka schodowa/Hall	3
		1.1.7.	489.42 m ³	
		1.1.8.	Wiatrołap	8.19 m ³
			Garaż	47.32 m ³
			Pomieszczenie techniczne	9.54 m ³
Hall	11.08 m ³			
Klatka schodowa	34.06 m ³			

1.	1.1.	1.1.8.	WC	10.06 m ³	
			Kuchnia	23.01 m ³	
			Pokój dzienny	48.26 m ³	
			Pokój	37.89 m ³	
			Pokój	20.96 m ³	
		1.1.9.	86.70 m ²		
		1.1.10.	109.35 m ²		
		1.1.11.	Powierzchnia ścian zewnętrznych	125 m ²	
			Objętość warstwy konstrukcyjnej ścian zewnętrznych o grubości 25 cm	31.25 m ³	
			Objętość warstwy izolacyjnej ścian zewnętrznych o grubości 15 cm	18.75 m ³	
	1.2.	1.2.1.	Kielce		
		1.2.2.	Północno-zachodnia		
	1.3.	1.3.1.	Warstwa konstrukcyjna	25 cm	
			Warstwa izolacyjna	15 cm	
		1.3.2.	Ściana zewnętrzna	Mur z cegły klinkierowej	1.050 W/(mK)
				Wentylowana pustka powietrzna	-
				Wełna mineralna	0.034 W/(mK)
				Porotherm	0.305 W/(mK)
				Tynk silikatowy	0.80 W/(mK)
			Dach	Dachówka cementowa	1.0 W/(mK)
				Membrana bitumiczna	0.18 W/(mK)
				Płyta OSB	0.13 W/(mK)
				Wełna mineralna 25 cm	0.32 W/(mK)
				Folia paroizolacyjna	0.18 W/(mK)
				Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie	0.23 W/(mK)
				Tynk cienkowarstwowy	1.0 W/(mK)
			Podłoga na gruncie	Parkiet	0.2 W/(mK)
Wylewka cementowa				1.0 W/(mK)	
Folia termoizolacyjna				0.045 W/(mK)	
Żelbetowa płyta fundamentowa				1.7 W/(mK)	
Płyta styropianowa				0.034 W/(mK)	
Papa				0.18 W/(mK)	
Chudy beton	1.7 W/(mK)				
Piasek stabilizowany cementem	0.4 W/(mK)				
Podsypka piaskowa	0.4 W/(mK)				

1.	1.3.	1.3.3.	Ściany zewnętrzne	0.1831 W/(m ² K)
			Dach	0.1225 W/(m ² K)
			Podłoga na gruncie	0.1150 W/(m ² K)
			Drzwi zewnętrzne	1.30 W/(m ² K)
			Okna	0.90 W/(m ² K)
2.	2.1.	2.1.1.	Kocioł zgazowujący drewno 12 kW	
		2.1.2.	55/45 °C	
		2.1.3.	20 mm (zgodnie z Warunkami Technicznymi)	
		2.1.4.	Centralne podgrzewanie wody	
		2.1.5.	200 dm ³	
		2.1.6.	W ogrzewanej strefie budynku	
	2.2.	2.2.1.	Kocioł zgazowujący drewno 12 kW	
		2.2.2.	Grzejniki czołowe z możliwością regulacji	
		2.2.3.	55/45 °C	
		2.2.4.	20 mm (zgodnie z Warunkami Technicznymi)	
		2.2.5.	Ogrzewanie centralne wodne z lokalnego źródła ciepła usytuowanego w ogrzewanym budynku	
	2.5.	2.5.1.	Napęd pomocniczy i regulacja kotła do ogrzewania budynku o powierzchni użytkowej do 250 m ²	
		2.5.2.	Napęd pomocniczy i regulacja kotła do podgrzewu ciepłej wody w budynku o powierzchni użytkowej do 250 m ²	

W Tabeli 7.3 przedstawiono parametry podstawowych przegród budynku bazowego dla zerowej iteracji projektowej, spełniające aktualne wymagania techniczne zawarte w Rozporządzeniu (2002).

Tabela 7.3. Parametry przegród budynku bazowego dla zerowej iteracji projektowej.

Elementy konstrukcyjne i budowlane	Wartości wskaźników	Warunki Techniczne (Rozporządzenie, 2002)
Ściana zewnętrzna	U = 0.1831 W/(m ² K)	U = 0.20 W/(m ² K)
Dach	U = 0.1225 W/(m ² K)	U = 0.15 W/(m ² K)
Podłoga na gruncie	U = 0.1150 W/(m ² K)	U = 0.30 W/(m ² K)
Drzwi zewnętrzne	U = 1.30 W/(m ² K)	U=1.30 W/(m ² K)
Stolarka okienna	U = 0.90 W/(m ² K)	U=0.90 W/(m ² K)
Brama garażowa	U = 1.30 W/(m ² K)	U=1.30 W/(m ² K)
Wskaźnik zapotrzebowania na energię pierwotną	EP = 45.10 kWh/(m ² rok)	EP = 70 kWh/(m ² rok)

7.2. Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych

Dla wybranych składników wyznaczono wartości kryteriów oceny zgodnie z następującą interpretacją:

E_i , (4.1) – energia końcowa $\{i\}$ składnika interpretowana jako energia końcowa budynku bazowego z zastosowanym $\{i\}$ składnikiem,

C_i , (4.25) – koszt $\{i\}$ składnika zastosowanego w budynku bazowym,

D_i , (4.33) – trwałość $\{i\}$ składnika zastosowanego w budynku bazowym,

N_i , (4.38) – liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych $\{i\}$ składnika interpretowany jako liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych budynku bazowego w wyniku zastosowania $\{i\}$ składnika,

M_i , (4.43) – emisyjność CO₂ $\{i\}$ składnika interpretowana jako emisyjność budynku bazowego z zastosowanym $\{i\}$ składnikiem.

Wyznaczone wartości kryteriów przedstawiono w Tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Wartości kryteriów dla składników.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	E_i [kWh/(m ² rok)]	C_i [zł]*	D_i [rok] **	N_i	M_i [kg/rok]
1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	174.79	48 000	50	15.50	7793
2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian	170.10	65 000	50	11.14	7584
3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa	176.65	100 000	50	7.52	7876
4	Dach 25 cm wełny	176.65	28 000	50	26.86	7876
5	Okna PCV U=0.90	176.65	43 000	20	17.49	7876
6	Drzwi U=1.3	176.65	7 500	20	100.27	7876
7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	48.32	85 000	25	2.42	3730
8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda	40.19	120 000	25	1.43	3102
9	Kocioł na pellet	176.65	25 000	20	30.08	7876

* Koszt dla poszczególnych składników określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji

Kolorem pomarańczowym oznaczono składniki przyjęte w budynku bazowym lub budynek bazowy.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku bazowego

Dla każdego składnika $\{i = 1, 9\}$ ze zbioru składników wpływających na energochłonność budynku określono znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{N,i}$ (5.4), $\delta_{M,i}$ (5.5).

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) przy założeniu, że parametr redystrybucji określający udział wartości wskaźników kryteriów jest równy $\beta = 0.5$, co powoduje, że wagi są jednakowe i wynoszą $w_j = 0.2$, $j = \{1, 5\}$.

Kolejno obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności składników $\delta_{ec,i}$ (5.7). Wyniki tych obliczeń zestawiono w Tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Znormalizowane wartości kryteriów optymalizacji.

Nr składnika $\{i\}$	Składniki	$\delta_{E,i}$	$\delta_{C,i}$	$\delta_{D,i}$	$\delta_{N,i}$	$\delta_{M,i}$	$\delta_{ec,i}$
1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	0.9864	0.3600	0.0000	0.1424	0.9826	0.4943
2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian	0.9520	0.5111	0.0000	0.0983	0.9388	0.5000
3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa	1.0000	0.8222	0.0000	0.0617	1.0000	0.5768
4	Dach 25 cm wełny	1.0000	0.1822	0.0000	0.2573	1.0000	0.4879
5	Okna PCV U=0.90	1.0000	0.3156	1.0000	0.1625	1.0000	0.6956
6	Drzwi U=1.3	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.8000
7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	0.0596	0.6889	0.8333	0.0101	0.1314	0.3447
8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda	0.0000	1.0000	0.8333	0.0000	0.0000	0.3667
9	Kocioł na pellet	1.0000	0.1556	1.0000	0.2899	1.0000	0.6891

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego

Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla możliwych wariantów rozwiązań projektowych $\{v = 1, 9\}$ z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 7.6.

Tabela 7.6. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań projektowych.

Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	Nr składnika $\{i\}$	Warianty rozwiązań	$\delta_{ec,i}$	$\Delta_{ec,v}$
1	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	0.4943	0.5645
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U0.9	0.6956	
	6	Drzwi U1.3	0.8000	
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	0.3447	
2	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	0.4943	0.5689
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda	0.3667	

3	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	0.4943	0.6334
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	9	Kocioł na pellet	0.6891	
4	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian	0.5000	0.5656
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	0.3447	
5	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian	0.5000	0.5700
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda	0.3667	
6	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian	0.5000	0.6345
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	9	Kocioł na pellet	0.6891	
7	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa	0.5768	0.5810
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	0.3447	
8	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa	0.5768	0.5854
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda	0.3667	
9	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa	0.5768	0.6499
	4	Dach 25 cm wełny	0.4879	
	5	Okna PCV U=0.90	0.6956	
	6	Drzwi U=1.3	0.8000	
	9	Kocioł na pellet	0.6891	

Dla uporządkowanego zbioru wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v\}$ przedstawiono w Tabeli 7.7 wartości wskaźników klas energochłonności wariantów rozwiązań EC_v wg (5.10) oraz klas energochłonności wariantów rozwiązań wg (5.11).

Tabela 7.7. Klasy energochłonności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych.

Lp.	Uporządkowany zbiór wariantów rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	EC_v	Klasa energochłonności wariantów rozwiązań
1	1	0.5645	0.000	ECI
2	4	0.5656	0.013	ECI
3	2	0.5689	0.052	ECII
4	5	0.5700	0.065	ECII
5	7	0.5810	0.193	ECIII
6	8	0.5854	0.245	ECIII
7	3	0.6334	0.807	ECVII
8	6	0.6345	0.820	ECVII
9	9	0.6499	1.000	ECVII

W małym zbiorze analizowanych wariantów rozwiązań projektowych wariant $v = 1$ oraz $v = 4$ charakteryzuje doskonała klasa energochłonności ECI, a dwa warianty $v = 2$ i $v = 5$ – bardzo dobra klasa energochłonności ECII. Natomiast niezalecaną klasą energochłonności ECVII charakteryzują się trzy warianty $v = 3$, $v = 6$ i $v = 9$. Budynek bazowy z początkowej iteracji projektowej został w wyniku analizy umiejscowiony jako wariant $v = 9$ i znajduje się w niezalecanej klasie energochłonności ECVII.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników wyznaczono globalny wskaźnik energochłonności budynku jako najmniejszą wartość zgodnie z formułą (5.12):

$$\Delta_{ec} = \min\{\Delta_{ec,v}\} = \Delta_{ec,v=1} = 0.5645$$

dla wariantu rozwiązania $v = 1$.

Dyskusja wyników

Proponowana metoda umożliwia określenie wartości poszczególnych kryteriów dla każdego wariantu rozwiązania projektowego. Przykładowo, dla wariantu rozwiązania $v = 1$ charakteryzującego się najmniejszą wartością wskaźnika energochłonności, w Tabeli 7.8 przedstawiono zestawienie wartości kryteriów dla poszczególnych składników zawartych w tym rozwiązaniu, a w Tabeli 7.9 wartości poszczególnych kryteriów dla kombinacji składników tego wariantu.

Tabela 7.8. Wartości kryteriów dla składników zawartych w wariancie $v = 1$.

Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	Nr składnika $\{i\}$	Składniki rozwiązania	E_i [kWh/(m ² rok)]	C_i [zł]*	D_i [rok]**	N_i	M_i [kg/rok]
1	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)	174.79	48 000	50	15.50	7793
	4	Dach 25 cm wełny	176.65	28 000	50	26.86	7876
	5	Okna PCV U=0.90	176.65	43 000	20	17.49	7876
	6	Drzwi U=1.3	176.65	7 500	20	100.27	7876
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%	48.32	85 000	25	2.42	3730

* Koszt składników określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji.

Tabela 7.9. Wartości poszczególnych kryteriów dla wariantu rozwiązania $v = 1$.

Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]	D_v [rok]	N_v	M_v [kg/rok]
1	47.95	211 500	20	0.97	3701

Względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową E_v [kWh/(m²rok)] najkorzystniejszego rozwiązania $v = 1$ obliczono według równania (4.1) wraz z odpowiednio stosowanymi równaniami (4.2 – 4.24).

Koszt C_v uwzględnia wszystkie składniki z wariantu rozwiązania $v = 1$.

Okres trwałości D_v wariantu rozwiązania $v = 1$ przyjęto jako najmniejszy okres trwałości spośród składników w tym wariancie.

Liczbę cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych N_v obliczono na podstawie czasu zrównoważenia nakładów inwestycyjnych B_v poniesionych na wykonanie tego rozwiązania oraz przyjętego projektowanego okresu użytkowania budynku $T_{blc} = 50$ lat.

Emisyjność rozwiązania M_v obliczono na podstawie energii końcowej E_v oraz wartości wskaźnika emisji WE_{CO_2} dla energii elektrycznej.

Wariant rozwiązania $v = 1$ charakteryzuje się następującymi parametrami: energia końcowa – 47.95 kWh/(m²rok); koszt – 211 500 zł; trwałość rozwiązania determinowana przez trwałość stolarki okiennej i drzwiowej – 10 lat; liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych w okresie projektowanego użytkowania budynku – 0.97, emisyjność CO₂ – 3701 kg/rok.

W przypadku budynku nowoprojektowanego przyjęto wszystkie składniki materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjne spełniające wymagania techniczne (Rozporządzenie, 2002). Dzięki temu również każda z możliwych kombinacji rozwiązań projektowych jest zgodna z obowiązującymi wymaganiami. Opracowana metoda wskazuje jednoznacznie najlepsze rozwiązanie. Wprowadzona klasyfikacja pozwala przy dużej liczbie rozwiązań i niewielkich różnicach w wartościach wskaźnika energochłonności zweryfikować jakość otrzymanych kombinacji składników oraz ewentualnie dostosować wybór rozwiązania projektowego do preferencji użytkownika.

7.3. Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego

7.3.1. Analiza na podstawie zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów

Przeprowadzono analizę wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego z uwzględnieniem funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów. W tym celu dla każdego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego wyznaczono wskaźnik energochłonności nowoprojektowanego budynku referencyjnego w funkcji wartości parametru redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Zaproponowano sposób określenia minimalnej wartości parametru redystrybucji umożliwiający wyznaczenie najmniejszej wartości globalnego wskaźnika energochłonności i jednocześnie nie powodujący nieakceptowalnych zaburzeń interpretacji wyboru rozwiązania w wyniku nadmiernej redystrybucji wartości wskaźników kryteriów.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem składników stanowiących podstawę projektową opisaną w punkcie 7.2 i zestawionym w Tabeli 7.4.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku bazowego

Znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{N,i}$ (5.4)₂, $\delta_{M,i}$ (5.5) przyjęto zgodnie z Tabelą 7.5.

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) dla parametrów redystrybucji określających udział wartości wskaźników kryteriów w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Następnie obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności $\delta_{ec,i}$ (5.7) z uwzględnieniem obliczeniowych wag kryterialnych.

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku referencyjnego

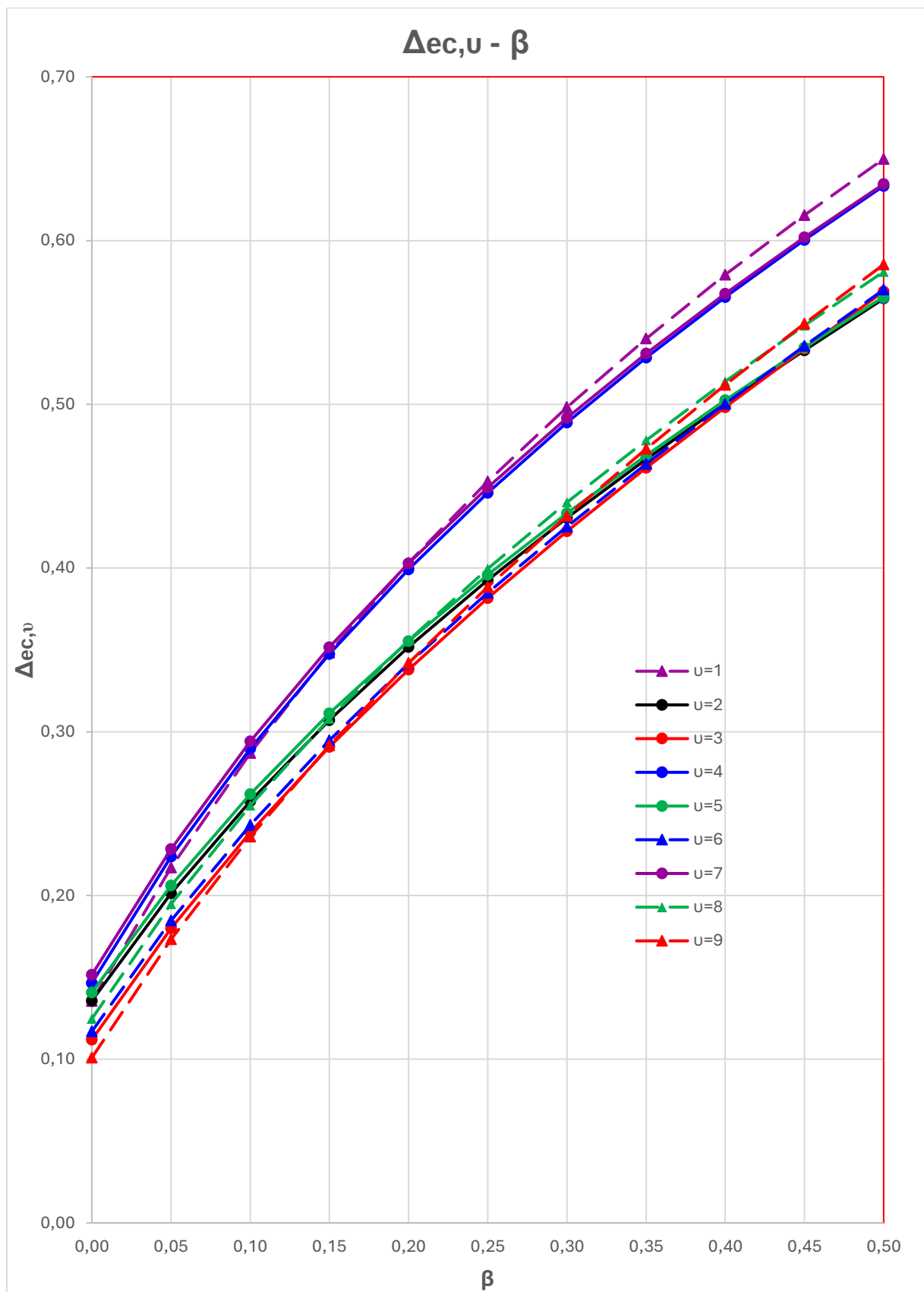
Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla każdego z wariantów rozwiązań projektowych $\{v\}$, z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 7.10.

Tabela 7.10. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji wartości parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Parametr redystrybucji β	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta_{ec,v}$								
0	0.1357	0.1119	0.1465	0.1407	0.1169	0.1516	0.1247	0.1009	0.1355
0.05	0.2014	0.1800	0.2237	0.2061	0.1847	0.2284	0.1947	0.1733	0.2170
0.1	0.2576	0.2386	0.2897	0.2620	0.2430	0.2941	0.2549	0.2359	0.2870
0.15	0.3071	0.2907	0.3475	0.3112	0.2947	0.3516	0.3080	0.2916	0.3484
0.2	0.3517	0.3379	0.3991	0.3554	0.3416	0.4028	0.3558	0.3420	0.4032
0.25	0.3926	0.3816	0.4459	0.3959	0.3848	0.4492	0.3995	0.3885	0.4528
0.3	0.4306	0.4224	0.4888	0.4335	0.4253	0.4917	0.4401	0.4319	0.4982
0.35	0.4664	0.4612	0.5285	0.4689	0.4636	0.5310	0.4780	0.4728	0.5401
0.4	0.5004	0.4982	0.5655	0.5024	0.5003	0.5676	0.5139	0.5118	0.5791
0.45	0.5330	0.5341	0.6004	0.5346	0.5357	0.6020	0.5482	0.5492	0.6156
0.5	0.5645	0.5689	0.6334	0.5656	0.5700	0.6345	0.5810	0.5854	0.6499

W tabeli wyróżniono wartości globalnego wskaźnika energochłonności budynku, które dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.1$ zostały osiągnięte dla wariantu budynku nowoprojektowanego $v = 8$, dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.15 \leq \beta \leq 0.4$ - dla wariantu nowoprojektowanego $v = 2$, a dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.45 \leq \beta \leq 0.5$ - dla wariantu nowoprojektowanego $v = 1$.

W celu analizy wpływu wag kryterialnych na wartość wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego na Rys. 7.1 przedstawiono wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ w funkcji parametru redystrybucji β dla bazowego budynku nowoprojektowanego pierwszej iteracji projektowej $v = 9$ i dla każdego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego $v = [1, 8]$.



Rys. 7.1. Wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,u}$ w funkcji parametru redystrybucji β .

Szczegółowa analiza zależności wartości wskaźnika energochłonności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych w funkcji parametru redystrybucji umożliwia wyróżnienie zakresów parametrów redystrybucji, w których występuje identyczna kolejność wariantów rozwiązań opisywana wartościami wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$.

W następującej sekwencji zestawień tabelarycznych (Tabele 7.11 – 7.18) przedstawiono, dla poszczególnych zakresów parametrów redystrybucji, układy kolejności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika energochłonności wraz z przyporządkowanymi wartościami kryteriów oceny E_v (4.1), C_v (4.25), D_v (4.33), N_v (4.39) i M_v (4.43).

Zakres 1: $0.46 \leq \beta \leq 0.5$

Tabela 7.11. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.5$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.46$	$\beta = 0.5$					
1	1	0.5394	0.5645	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	4	0.5409	0.5656	46.48	228 500	20	0.87	3588
3	2	0.5411	0.5689	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	5	0.5426	0.5700	38.47	263 500	20	0.62	2969
5	7	0.5548	0.5810	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	8	0.5565	0.5854	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	3	0.6071	0.6334	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.6087	0.6345	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.6226	0.6499	176.65	203 500	20	3.70	7876

Uwagi:

* Koszt dla rozwiązań określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji

^c Kolorem pomarańczowym wyróżniono bazowy wariant budynku – pierwsza iteracja.

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.50$ najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku osiąga wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$. Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla $\beta = 0.46$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.5394$, a dla $\beta = 0.5$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.5645$.

Zakres 2: $0.44 \leq \beta \leq 0.45$ Tabela 7.12. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.44 \leq \beta \leq 0.45$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.44$	$\beta = 0.45$					
1	1	0.5266	0.5330	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	2	0.5270	0.5341	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	4	0.5283	0.5346	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	5	0.5287	0.5357	38.47	263 500	20	0.62	2969
5	7	0.5414	0.5482	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	8	0.5418	0.5492	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	3	0.5936	0.6004	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.5953	0.6020	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.6085	0.6156	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.44 \leq \beta \leq 0.45$ najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku wykazuje również rozwiązanie nowoprojektowane $v = 1$, dla którego wynoszą $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.5266$ dla $\beta = 0.44$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.5330$ dla $\beta = 0.45$.

Zakres 3: $0.41 \leq \beta \leq 0.43$ Tabela 7.13. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.41 \leq \beta \leq 0.43$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.41$	$\beta = 0.43$					
1	2	0.5055	0.5199	43.95	246 500	20	0.76	3392
2	1	0.5070	0.5201	47.95	211 500	20	0.97	3701
3	5	0.5075	0.5217	38.47	263 500	20	0.62	2969
4	4	0.5090	0.5219	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	8	0.5194	0.5344	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.5209	0.5347	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.5727	0.5867	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.5747	0.5885	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5866	0.6013	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.41 \leq \beta \leq 0.43$ wskaźnik energochłonności budynku przyjmuje najmniejsze wartości również dla wariantu rozwiązania nowoprojektowanego $v = 2$. Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla $\beta = 0.41$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.5055$, a dla $\beta = 0.43$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.5199$.

Zakres 4: $0.32 \leq \beta \leq 0.40$ Tabela 7.14. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.32 \leq \beta \leq 0.40$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.32$	$\beta = 0.40$					
1	2	0.4381	0.4982	43.95	246 500	20	0.76	3392
2	5	0.4409	0.5003	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	1	0.4452	0.5004	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	4	0.4479	0.5024	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	8	0.4485	0.5118	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.4555	0.5139	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.5050	0.5655	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.5077	0.5676	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5154	0.5791	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla parametru redystrybucji w zakresie $0.32 \leq \beta \leq 0.40$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 2$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.4381$ dla $\beta = 0.32$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.4982$ dla $\beta = 0.40$.

Zakres 5: $0.29 \leq \beta \leq 0.31$ Tabela 7.15. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.29 \leq \beta \leq 0.31$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.29$	$\beta = 0.31$					
1	2	0.4144	0.4303	43.95	246 500	20	0.76	3392
2	5	0.4174	0.4331	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	1	0.4232	0.4379	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	8	0.4234	0.4402	40.19	298 500	20	0.57	3102
5	4	0.4262	0.4407	46.48	228 500	20	0.87	3588
6	7	0.4322	0.4478	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.4805	0.4970	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.4835	0.4998	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.4895	0.5069	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla parametru redystrybucji w zakresie $0.29 \leq \beta \leq 0.31$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 2$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.4303$ dla $\beta = 0.31$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.4144$ dla $\beta = 0.29$.

Zakres 6: $0.20 \leq \beta \leq 0.28$ Tabela 7.16. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.20 \leq \beta \leq 0.28$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.20$	$\beta = 0.28$					
1	2	0.3379	0.4064	43.95	246 500	20	0.76	3392
2	5	0.3416	0.4094	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	8	0.3420	0.4148	40.19	298 500	20	0.57	3102
4	1	0.3517	0.4157	47.95	211 500	20	0.97	3701
5	4	0.3554	0.4188	46.48	228 500	20	0.87	3588
6	7	0.3558	0.4242	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.3991	0.4721	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.4028	0.4751	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.4032	0.4805	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametru redystrybucji w zakresie $0.20 \leq \beta \leq 0.28$ globalny wskaźnik energochłonności budynku uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 2$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.4064$ dla $\beta = 0.28$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.3379$ dla $\beta = 0.20$.

Zakres 7: $0.14 \leq \beta \leq 0.19$ Tabela 7.17. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.14 \leq \beta \leq 0.19$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.14$	$\beta = 0.19$					
1	2	0.2807	0.3288	43.95	246 500	20	0.76	3392
2	8	0.2809	0.3323	40.19	298 500	20	0.57	3102
3	5	0.2848	0.3326	38.47	263 500	20	0.62	2969
4	1	0.2977	0.3431	47.95	211 500	20	0.97	3701
5	7	0.2979	0.3466	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	4	0.3018	0.3469	46.48	228 500	20	0.87	3588
7	3	0.3365	0.3892	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	9	0.3367	0.3927	176.65	203 500	20	3.70	7876
9	6	0.3406	0.3930	170.10	168 500	20	4.30	7584

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla parametru redystrybucji w zakresie $0.14 \leq \beta \leq 0.19$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 2$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.3288$ dla $\beta = 0.19$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=2} = 0.2807$ dla $\beta = 0.14$.

Zakres 8: $0 \leq \beta \leq 0.13$ Tabela 7.18. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.00 \leq \beta \leq 0.13$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0$	$\beta = 0.13$					
1	8	0.1009	0.2700	40.19	298 500	20	0.57	3102
2	2	0.1119	0.2705	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	5	0.1169	0.2747	38.47	263 500	20	0.62	2969
4	7	0.1247	0.2875	48.32	263 500	20	0.78	3730
5	1	0.1355	0.2880	47.95	211 500	20	0.97	3701
6	4	0.1357	0.2922	46.48	228 500	20	0.87	3588
7	9	0.1407	0.3247	176.65	203 500	20	3.70	7876
8	3	0.1465	0.3252	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	6	0.1516	0.3294	170.10	168 500	20	4.30	7584

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.13$ wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 8$ uzyskał najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.2700$ dla $\beta = 0.13$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.1009$ dla $\beta = 0$.

Wyniki przedstawione w Tabelach 7.11 – 7.18 oznaczają, że oddzielnie dla każdego z ośmiu zakresów parametru redystrybucji β występuje jednorodność (homogeniczność) proporcji wyników nie tylko pomiędzy wartościami wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$, ale również pomiędzy wszystkimi wartościami kryteriów oceny wariantów rozwiązań nowoprojektowanych.

Jednakże w całym zakresie parametru redystrybucji $0 \leq \beta \leq 0.5$ taka jednorodność proporcji wyników nie występuje. Kolejność szeregu rozwiązań nowoprojektowanych jest inna w każdym zakresie zmian parametru redystrybucji.

7.3.2. Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych

Przeprowadzono analizę wpływu ustalonych kombinacji wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem składników stanowiących podstawę nowoprojektowanego budynku bazowego opisanym w Tabeli 7.4.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku bazowego

Znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\delta_{E,i}$ (5.1), $\delta_{C,i}$ (5.2), $\delta_{D,i}$ (5.3), $\delta_{N,i}$ (5.4), $\delta_{M,i}$ (5.5) przyjęto zgodnie z Tabelą 7.9.

Wagi poszczególnych kryteriów ustalono na podstawie założenia jednego dominującego wskaźnika kryterium optymalizacji i uzupełniająco równoważnych pozostałych wskaźników kryteriów optymalizacji, zgodnie z zestawieniem kombinacji wag w Tabeli 7.19.

Tabela 7.19. Kombinacje wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wartości wag				
	w_E	w_C	w_D	w_N	w_M
E	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
C	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
D	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1
N	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1
M	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6

Następnie obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności $\delta_{ec,i}$ (5.7) z uwzględnieniem ustalonych wag kryterialnych.

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku bazowego

Na podstawie przyjętych składników $\{i\}$ obliczono wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.9) dla każdego z wariantów rozwiązań nowoprojektowanych $\{v\}$, z uwzględnieniem warunków ograniczających (5.8), Tabela 7.20.

Tabela 7.20. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji kombinacji wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta_{ec,v}$								
E	0.6868	0.6831	0.8153	0.6840	0.6802	0.8125	0.6965	0.6927	0.8249
C	0.4369	0.4702	0.4180	0.4526	0.4859	0.4337	0.4914	0.5247	0.4725
D	0.5656	0.5678	0.6167	0.5662	0.5684	0.6173	0.5738	0.5760	0.6249
N	0.4395	0.4407	0.5019	0.4356	0.4368	0.4981	0.4396	0.4408	0.5021
M	0.6937	0.6827	0.8150	0.6898	0.6789	0.8111	0.7036	0.6927	0.8249

W następującej sekwencji zestawień tabelarycznych (Tabele 7.21 – 7.25) przedstawiono, dla poszczególnych kombinacji wag kryterialnych, układy kolejności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika energochłonności

wraz z przyporządkowanymi wartościami kryteriów oceny E_v (4.1), C_v (4.25), D_v (4.33), N_v (4.39) i M_v (4.43).

Tabela 7.21. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych E.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	5	0.6802	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	2	0.6831	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	4	0.6840	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	1	0.6868	47.95	211 500	20	0.97	3701
5	8	0.6927	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.6965	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0.8125	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.8153	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.8249	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla kombinacji wag kryterialnych E najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku określa wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$, a globalny wskaźnik energochłonności budynku wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^E = 0.6802$. Wartość ta jest znacznie większa nie tylko niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.5645$, ale nawet większa od największej wartości wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec,v=9}^{\beta=0.5} = 0.6499$, osiągniętych dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 7.11.

Tabela 7.22. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych C.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	3	0.4180	174.79	151 500	20	4.91	7793
2	6	0.4337	170.10	168 500	20	4.30	7584
3	1	0.4369	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	4	0.4526	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	2	0.4702	43.95	246 500	20	0.76	3392
6	9	0.4725	176.65	203 500	20	3.70	7876
7	5	0.4859	38.47	263 500	20	0.62	2969
8	7	0.4914	48.32	263 500	20	0.78	3730
9	8	0.5247	40.19	298 500	20	0.57	3102

Dla kombinacji wag kryterialnych C globalny wskaźnik energochłonności budynku określa wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 3$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=3} = \Delta_{ec,v=3}^C = 0.4180$.

Wartość ta jest znacznie mniejsza niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.5645$ osiągnięta dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 7.11.

Tabela 7.23. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych D.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	1	0.5656	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	4	0.5662	46.48	228 500	20	0.87	3588
3	2	0.5678	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	5	0.5684	38.47	263 500	20	0.62	2969
5	7	0.5738	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	8	0.5760	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	3	0.6167	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.6173	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.6249	176.65	203 500	20	3.70	7876

Analiza wyników dla kombinacji wag kryterialnych D wskazuje, że globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 1$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^D = 0.5656$. Wartość ta jest większa niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.5645$, a największa wartość wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v=9}^D = 0.6249$ zawiera się w zakresie wartości wskaźnika energochłonności budynku osiągniętych dla rozwiązań w Zakresie 1 zmian parametru redystrybucji $0.46 \leq \beta \leq 0.5$.

Tabela 7.24. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych N.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	4	0.4356	46.48	228 500	20	0.87	3588
2	5	0.4368	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	1	0.4395	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	7	0.4396	48.32	263 500	20	0.78	3730
5	2	0.4407	43.95	246 500	20	0.76	3392
6	8	0.4408	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	6	0.4981	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.5019	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.5021	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla kombinacji wag kryterialnych N globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 4$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=4} = \Delta_{ec,v=4}^N = 0.4356$. Wartość ta jest mniejsza nawet od najmniejszej wartości wskaźnika energochłonności budynku osiągniętych dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 7.11.

Tabela 7.25. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych M.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	5	0,6789	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	2	0,6827	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	4	0,6898	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	8	0,6927	40.19	298 500	20	0.57	3102
5	1	0,6937	47.95	211 500	20	0.97	3701
6	7	0,7036	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0,8111	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0,8150	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0,8249	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla kombinacji wag kryterialnych M globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^M = 0.6789$. Wartość ta jest większa niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.5645$ i jest większa od dwóch największych wartości wskaźnika energochłonności, tj. $\Delta_{ec,v=6}^{\beta=0.5} = 0.6345$ i $\Delta_{ec,v=9}^{\beta=0.5} = 0.6499$, osiągniętych dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 7.11.

7.3.3. Analiza wpływu zmiany budynku bazowego

Przeprowadzono analizę wpływu zmiany budynku bazowego na wartości wskaźnika energochłonności budynku. Jako budynek bazowy przyjmowano kolejno każdy z ośmiu pozostałych wariantów rozwiązań projektowych. Analizę przeprowadzono według Podrozdziału 7.3.1, w którym analizowano przypadek wariantu $v = 9$ jako budynku bazowego.

Do prezentacji wyników wybrano tylko przypadek wariantu $v = 1$ jako budynku bazowego, dla którego w rozwiązaniu prezentowanym w Podrozdziale 7.3.1 uzyskano najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec,v=1} = 0.5645$ obliczoną dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabele 7.7, 7.10 i 7.11.

W Tabeli 7.26 przedstawiono uporządkowany zbiór wariantów rozwiązań nowoprojektowanych dla wariantu $v = 1$ jako budynku bazowego obliczony dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$.

Tabela 7.26. Warianty rozwiązań nowoprojektowanych dla budynku bazowego $v = 1$.

Lp.	Uporządkowany zbiór wariantów rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	EC_v	Klasa energochłonności wariantów rozwiązań
1	1	0.2403	0,000	ECI
2	4	0.2437	0,032	ECI
3	2	0.2481	0,075	ECII
4	5	0.2515	0,107	ECII
5	7	0.2559	0,148	ECII
6	8	0.2637	0,223	ECIII
7	3	0.3301	0,852	ECVII
8	6	0.3335	0,885	ECVII
9	9	0.3457	1,000	ECVII

Analiza wyników umożliwia stwierdzenie następujących faktów.

1. Kolejność rozwiązań uszeregowanych według rosnących wartości wskaźnika energochłonności budynku jest identyczna jak w Tabelach 7.7 i 7.11.
2. Najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec,v=1} = 0.2403$ uzyskano ponownie dla wariantu $v = 1$, który przyjęto jako budynek bazowy.

Analiza obliczeniowa pozwoliła potwierdzić tezę dotyczącą dowolności wyboru budynku bazowego w zerowej iteracji projektowej dla jednakowych wag kryterialnych uzyskanych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$.

7.3.4. Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych i zmiany budynku bazowego na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego

Wyniki analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego pozwalają określić następujące wnioski.

1. W przypadku zastosowania metody zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów:
 - zakres parametru redystrybucji $0.46 \leq \beta \leq 0.5$ jest najbardziej miarodajnym zakresem umożliwiającym wyznaczenie jednorodnej kolejności szeregu wartości wskaźnika energochłonności poszczególnych rozwiązań nowoprojektowanych,

- wartości globalnego wskaźnika energochłonności określone dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.5$ są odpowiednio skalowane zgodnie z funkcją redystrybucji wartości wskaźników kryteriów,
 - najmniejsze wartości globalnego wskaźnika energochłonności określonego dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.44 \leq \beta \leq 0.5$ uzyskano dla wariantu rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$.
2. W przypadku zastosowania metody ustalonych kombinacji wag kryterialnych:
 - rozwiązanie dla kombinacji wag kryterialnych D wykazuje kolejność rozwiązań zgodną z kolejnością rozwiązań uzyskaną w zakresie parametru redystrybucji $0.46 \leq \beta \leq 0.5$ i może być uznane jako istotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności,
 - rozwiązania dla kombinacji wag kryterialnych E, C, N i M nie wskazują na jakąkolwiek zgodność z rozwiązaniami uzyskanymi metodą zmiennych wag kryterialnych i mogą być uznane jako nieistotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności.
 3. Analiza wpływu zmiany budynku bazowego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych uzyskanych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, wykazała, że wybór budynku bazowego może być dowolny i nie ma wpływu na kolejność uporządkowanego zbioru wariantów rozwiązań projektowych pod względem wartości wskaźnika energochłonności budynku.
 4. Z zastrzeżeniem specyfiki przyjętego studium przypadku budynku nowoprojektowanego, uogólnienie metody zmiennych wag kryterialnych na inne przypadki budynków powinno być odpowiednio weryfikowane.
 5. Wyniki analizy wpływu wag kryterialnych i zmiany budynku bazowego uzasadniają rekomendację wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$ w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego.

8. Studium przypadku budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem bezpośredniego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności

8.1. Opis budynku bazowego

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

W celu przeprowadzenia wyboru najlepszego wariantu rozwiązania budynku bazowego w Tabeli 8.1 przedstawiono podstawowe parametry budynku odnoszące się wyłącznie do części architektoniczno-funkcjonalnej opisanej w punkcie 7.1 niniejszej rozprawy.

Tabela 8.1. Charakterystyczne parametry budynku bazowego.

Parametry		Budynek bazowy		
1.	1.1.	1.1.1.	Mieszkalny	
		1.1.2.	Jednorodzinny	
		1.1.3.	Nowoprojektowany	
		1.1.4.	2	
		1.1.5.	Garaż	1
			Wiatrołap	1
			Pomieszczenie techniczne	1
			Pokoje	4
			Kuchnia	1
			Łazienki/WC	2
			Klatka schodowa/Hall	3
		1.1.6.	110.58 m ²	
		1.1.7.	489.42 m ³	
		1.1.8.	Wiatrołap	8.19 m ³
			Garaż	47.32 m ³
			Pomieszczenie techniczne	9.54 m ³
			Hall	11.08 m ³
	Klatka schodowa		34.06 m ³	
	WC		10.06 m ³	
	Kuchnia		23.01 m ³	
	Pokój dzienny		48.26 m ³	
	Pokój		37.89 m ³	
	Pokój	20.96 m ³		
1.1.9.	86.70 m ²			
1.1.10.	109.35 m ²			
1.2.	1.1.11.	Powierzchnia ścian zewnętrznych	125 m ²	
	1.2.1.	Kielce		
	1.2.2.	Północno-zachodnia		

Do analizy wielokryterialnej przyjęto dziewięć wariantów rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych budynku identycznych jak te, które zostały ustalone w punkcie 7.2 niniejszej rozprawy. Zestawienie wariantów $\{v\}$ rozwiązań projektowych złożonych ze składników $\{i\}$ przedstawiono w Tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Warianty rozwiązań projektowych.

Nr wariantu rozwiązania {v}	Nr składnika {i}	Warianty rozwiązań
1	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%
2	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda
3	1	Ściana w technologii szkieletu drewnianego (kanadyjska)
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	9	Kocioł na pellet
4	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%
5	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda
6	2	Ściana gazobetonowa Ytong + 15 cm styropian
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	9	Kocioł na pellet
7	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	7	Pompa ciepła powietrzna – powietrze/woda 55% + fotowoltaika 45%
8	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	8	Pompa ciepła gruntowa – grunt/woda
9	3	Porotherm + 15 cm wełny + 2 cm pustka powietrzna + cegła klinkierowa
	4	Dach 25 cm wełny
	5	Okna PCV U=0.90
	6	Drzwi U=1.3
	9	Kocioł na pellet

Dla wybranych wariantów $v = (1, 9)$ wyznaczono wartości kryteriów oceny:

E_v , (4.1) – energia końcowa,

C_v , (4.25) – koszt,

D_v , (4.33) – trwałość,

N_v , (4.39) – liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych,

M_v , (4.43) – emisyjność CO₂.

Dla każdego wariantu $\{v = 1, 9\}$ określono wartości poszczególnych kryteriów i zestawiono je w Tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Wartości kryteriów dla wariantów.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	1	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	2	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	3	174.79	151 500	20	4.91	7793
4	4	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	5	38.47	263 500	20	0.62	2969
6	6	170.10	168 500	20	4.30	7584
7	7	48.32	263 500	20	0.78	3730
8	8	40.19	298 500	20	0.57	3102
9	9	176.65	203 500	20	3.70	7876

8.2. Wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego przy założeniu jednakowych wag kryterialnych

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla wariantów budynku nowoprojektowanego

Dla każdego wariantu $\{v = 1, 9\}$ określono znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\Delta_{E,v}$ (5.13), $\Delta_{C,v}$ (5.14), $\Delta_{D,v}$ (5.15), $\Delta_{N,v}$ (5.16), $\Delta_{M,v}$ (5.17).

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) przy założeniu, że parametr redystrybucji określający udział wartości wskaźników kryteriów jest równy $\beta = 0.5$, co powoduje, że są one jednakowe i wynoszą $w_j = 0.2$, $j = \{1, 5\}$.

Kolejno obliczono znormalizowane wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności wariantów rozwiązań projektowych $\Delta_{ec,v}$ (5.18). Wyniki tych obliczeń zestawiono w Tabeli 8.4.

Tabela 8.4. Znormalizowane wartości kryteriów optymalizacji.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{E,v}$	$\Delta_{C,v}$	$\Delta_{D,v}$	$\Delta_{N,v}$	$\Delta_{M,v}$	$\Delta_{ec,v}$
1	1	0.0686	0.4082	0.6000	0.0903	0.1491	0.2632
2	2	0.0397	0.6463	0.6000	0.0428	0.0862	0.2830
3	3	0.9865	0.0000	0.6000	1.0000	0.9831	0.7139
4	4	0.0580	0.5238	0.6000	0.0675	0.1260	0.2751
5	5	0.0000	0.7619	0.6000	0.0111	0.0000	0.2746
6	6	0.9526	0.1156	0.6000	0.8585	0.9405	0.6934
7	7	0.0713	0.7619	0.6000	0.0478	0.1549	0.3272
8	8	0.0124	1.0000	0.6000	0.0000	0.0271	0.3279
9	9	1.0000	0.3537	0.6000	0.7197	1.0000	0.7347

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku

Na podstawie analizy uzyskanych wyników wyznaczono globalny wskaźnik energochłonności budynku jako najmniejszą wartość zgodnie z formułą (5.12):

$$\Delta_{ec} = \min\{\Delta_{ec,v,1}\} = \Delta_{ec,v=1} = 0.2632$$

dla wariantu rozwiązania projektowego $v = 1$.

Dla zbioru wariantów rozwiązań modernizacyjnych $\{v\}$ przedstawiono w Tabeli 8.5 wartości wskaźników klas energochłonności wariantów rozwiązań EC_v wg (5.10) oraz klas energochłonności wariantów rozwiązań wg (5.11).

Tabela 8.5. Klasy energochłonności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych.

Lp.	Uporządkowany zbiór wariantów rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	EC_v	Klasa energochłonności wariantów rozwiązań
1	1	0.2632	0.000	ECI
2	5	0.2746	0.024	ECI
3	4	0.2751	0.025	ECI
4	2	0.2830	0.042	ECI
5	7	0.3272	0.136	ECII
6	8	0.3279	0.137	ECII
7	6	0.6934	0.913	ECVII
8	3	0.7139	0.956	ECVII
9	9	0.7347	1.000	ECVII

W małym zbiorze analizowanych wariantów rozwiązań projektowych wariant $v = 1$, $v = 5$, $v = 4$ oraz $v = 2$ charakteryzuje doskonała klasa energochłonności ECI, a dwa warianty $v = 7$ i $v = 8$ – bardzo dobra klasa energochłonności ECII. Natomiast niezalecaną klasą energochłonności ECVII charakteryzują się trzy warianty $v = 6$, $v = 3$ i $v = 9$.

W porównaniu do wyników otrzymanych sposobem hybrydowym (Tabela 7.6 i Tabela 7.7) można stwierdzić, że w obu przypadkach sposobów obliczeniowych wariant $v = 1$ osiąga globalny wskaźnik energochłonności budynku.

W przypadku sposobu bezpośredniego warianty $v = 5$, $v = 2$ i $v = 4$ charakteryzuje doskonała klasa energochłonności ECI natomiast sposób hybrydowy wykazuje, że tylko wariant $v = 4$ charakteryzuje doskonała klasa energochłonności ECI, a dwa warianty $v = 2$ i $v = 5$ – bardzo dobra klasa energochłonności ECII.

W obu przypadkach sposobów obliczeniowych niezalecaną klasą energochłonności ECVII charakteryzują się trzy warianty $v = 3$, $v = 6$ i $v = 9$.

8.3. Analiza wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego

Przeprowadzono analizę wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego z uwzględnieniem funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów. W tym celu dla każdego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego wyznaczono wskaźnik energochłonności nowoprojektowanego budynku referencyjnego w funkcji wartości parametru redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem wariantów opisanych w punkcie 8.1. i zestawionym w Tabeli 8.2.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku referencyjnego

Znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\Delta_{E,v}$ (5.13), $\Delta_{C,v}$ (5.14), $\Delta_{D,v}$ (5.15), $\Delta_{N,v}$ (5.16), $\Delta_{M,v}$ (5.17) przyjęto zgodnie z Tabelą 9.4.

Wagi poszczególnych kryteriów obliczono według (5.6) dla parametrów redystrybucji określający udział wartości wskaźników kryteriów w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

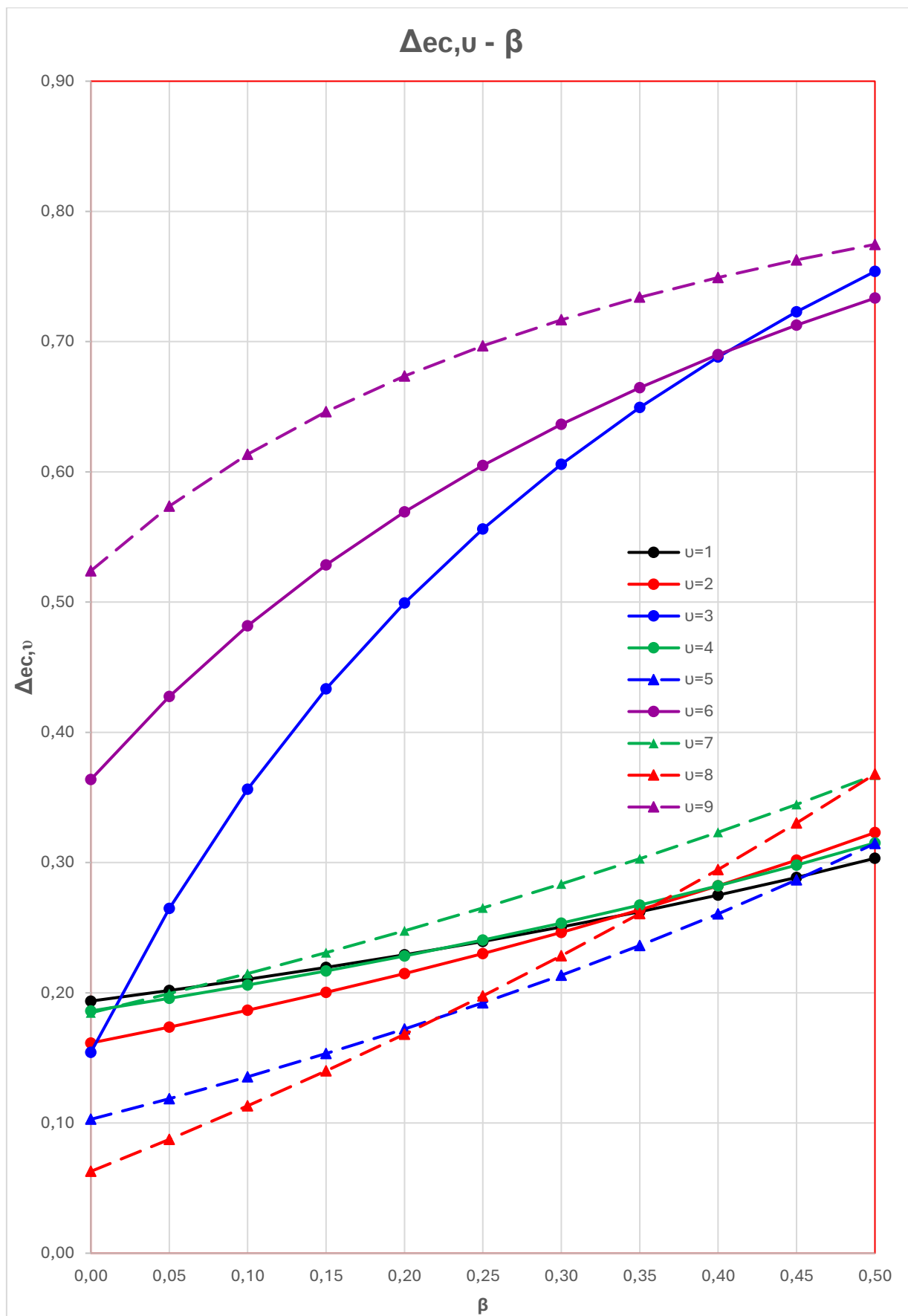
Następnie obliczono znormalizowane cząstkowe wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.18) z uwzględnieniem obliczeniowych wag kryterialnych, a wyniki zestawiono w Tabeli 8.6.

Tabela 8.6. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji wartości parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.5$.

Parametr redystrybucji β	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta_{ec,v}$								
0	0.1936	0.1614	0.1543	0.1860	0.1028	0.3638	0.1846	0.0628	0.5240
0.05	0.2017	0.1737	0.2648	0.1957	0.1187	0.4276	0.1993	0.0875	0.5736
0.1	0.2103	0.1866	0.3563	0.2059	0.1355	0.4818	0.2147	0.1132	0.6135
0.15	0.2194	0.2003	0.4334	0.2168	0.1533	0.5285	0.2308	0.1401	0.6462
0.2	0.2291	0.2147	0.4993	0.2283	0.1721	0.5692	0.2476	0.1682	0.6736
0.25	0.2394	0.2301	0.5562	0.2405	0.1922	0.6049	0.2652	0.1976	0.6968
0.3	0.2505	0.2463	0.6058	0.2535	0.2135	0.6365	0.2836	0.2284	0.7168
0.35	0.2623	0.2637	0.6495	0.2673	0.2362	0.6647	0.3030	0.2607	0.7341
0.4	0.2749	0.2821	0.6882	0.2821	0.2606	0.6900	0.3233	0.2946	0.7493
0.45	0.2886	0.3019	0.7228	0.2980	0.2866	0.7128	0.3447	0.3303	0.7627
0.5	0.3032	0.3230	0.7539	0.3151	0.3146	0.7334	0.3672	0.3679	0.7747

W tabeli wyróżniono wartości globalnego wskaźnika energochłonności budynku, które dla parametrów redystrybucji w zakresie $0 \leq \beta \leq 0.2$ zostały osiągnięte dla wariantu budynku nowoprojektowanego $v = 8$, dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.25 \leq \beta \leq 0.45$ – dla wariantu $v = 5$, a dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$ – dla wariantu $v = 1$.

W celu analizy wpływu wag kryterialnych na wartość wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego na Rys. 8.1 przedstawiono wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ w funkcji parametru redystrybucji β dla każdego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego $v = [1, 9]$.



Rys. 8.1. Wykresy zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,u}$ w funkcji parametru redystrybucji β .

Analiza pozwoliła na określenie jedenastu zakresów zmiany kolejności wariantów w zależności od wartości parametru redystrybucji. W Tabelach 8.7 – 8.17 zestawiono zakresy wartości parametru redystrybucji wraz z kolejnością wariantów występowania w danym zakresie.

Zakres 1: $\beta = 0.5$

Tabela 8.7. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $\beta = 0.5$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.5$					
1	1	0.2632	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	5	0.2746	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	4	0.2751	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	2	0.2830	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	7	0.3272	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	8	0.3279	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	6	0.6934	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.7139	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.7347	176.65	203 500	20	3.70	7876

Uwagi:

* Koszt dla rozwiązań określono na podstawie cen jednostkowych z dnia 14.09.2024 r.

** Okres trwałości przyjęto jako czas minimalnej eksploatacji

Dla parametru redystrybucji $\beta = 0.50$ najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku osiąga wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = 0.2632$.

Zakres 2: $0.46 \leq \beta \leq 0.49$

Tabela 8.8. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.49$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.46$	$\beta = 0.49$					
1	1	0.2566	0.2615	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	5	0.2572	0.2701	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	4	0.2664	0.2728	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	2	0.2710	0.2799	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	8	0.3023	0.3214	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.3136	0.3237	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0.6770	0.6894	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.6890	0.7079	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.7246	0.7322	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.49$ najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku osiąga również wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2566$ dla $\beta = 0.46$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2615$ dla $\beta = 0.49$.

Zakres 3: $0.41 \leq \beta \leq 0.45$

Tabela 8.9. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.41 \leq \beta \leq 0.45$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.41$	$\beta = 0.45$					
1	5	0.2656	0.2866	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	1	0.2776	0.2886	47.95	211 500	20	0.97	3701
3	4	0.2852	0.2980	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	2	0.2860	0.3019	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	8	0.3016	0.3303	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.3275	0.3447	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0.6947	0.7128	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.6955	0.7228	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.7521	0.7627	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.41 \leq \beta \leq 0.45$ najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku osiąga wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2656$ dla $\beta = 0.41$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2866$ dla $\beta = 0.45$.

Zakres 4: $0.37 \leq \beta \leq 0.40$

Tabela 8.10. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.37 \leq \beta \leq 0.40$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.37$	$\beta = 0.40$					
1	5	0.2458	0.2606	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	1	0.2672	0.2749	47.95	211 500	20	0.97	3701
3	2	0.2709	0.2821	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	4	0.2731	0.2821	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	8	0.2741	0.2946	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.3110	0.3233	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.6655	0.6882	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.6751	0.6900	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.7404	0.7493	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla wartości parametrów redystrybucji w zakresie $0.37 \leq \beta \leq 0.40$ wskaźnik energochłonności budynku przyjmuje najmniejsze wartości dla wariantu rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$. Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla $\beta = 0.40$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2606$, a dla $\beta = 0.37$ wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2458$.

Zakres 5: $\beta = 0.36$

Tabela 8.11. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $\beta = 0.36$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.36$					
1	5	0.2410	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	1	0.2647	47.95	211 500	20	0.97	3701
3	2	0.2673	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	8	0.2674	40.19	298 500	20	0.57	3102
5	4	0.2702	46.48	228 500	20	0.87	3588
6	7	0.3070	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.6576	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.6700	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.7373	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $\beta = 0.36$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$, a jego wartość wynosi: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2410$.

Zakres 6: $0.34 \leq \beta \leq 0.35$

Tabela 8.12. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.34 \leq \beta \leq 0.35$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.34$	$\beta = 0.35$					
1	5	0.2316	0.2362	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	8	0.2541	0.2607	40.19	298 500	20	0.57	3102
3	1	0.2598	0.2623	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	2	0.2601	0.2637	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	4	0.2645	0.2673	46.48	228 500	20	0.87	3588
6	7	0.2990	0.3030	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.6412	0.6495	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.6593	0.6647	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.7308	0.7341	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $0.34 \leq \beta \leq 0.35$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 2316$ dla $\beta = 0.34$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2362$ dla $\beta = 0.35$.

Zakres 7: $0.23 \leq \beta \leq 0.33$

Tabela 8.13. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.23 \leq \beta \leq 0.33$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.23$	$\beta = 0.33$					
1	5	0.1840	0.2270	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	8	0.1856	0.2476	40.19	298 500	20	0.57	3102
3	2	0.2238	0.2566	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	1	0.2352	0.2574	47.95	211 500	20	0.97	3701
5	4	0.2355	0.2617	46.48	228 500	20	0.87	3588
6	7	0.2581	0.2951	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.5344	0.6327	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.5912	0.6538	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.6880	0.7275	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $0.23 \leq \beta \leq 0.33$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.2270$ dla $\beta = 0.33$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = 0.1840$ dla $\beta = 0.23$.

Zakres 8: $0.07 \leq \beta \leq 0.22$

Tabela 8.14. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.07 \leq \beta \leq 0.22$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.07$	$\beta = 0.22$					
1	8	0.0976	0.1798	40.19	298 500	20	0.57	3102
2	5	0.1253	0.1800	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	2	0.1788	0.2208	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	4	0.1997	0.2331	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	1	0.2051	0.2331	47.95	211 500	20	0.97	3701
6	7	0.2054	0.2545	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	3	0.3034	0.5230	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.4503	0.5840	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5905	0.6833	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $0.07 \leq \beta \leq 0.22$ globalny wskaźnik energochłonności budynku uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 8$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.1798$ dla $\beta = 0.22$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.0976$ dla $\beta = 0.07$.

Zakres 9: $0.02 \leq \beta \leq 0.06$

Tabela 8.15. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.02 \leq \beta \leq 0.06$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$		E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.02$	$\beta = 0.06$					
1	8	0.0726	0.0925	40.19	298 500	20	0.57	3102
2	5	0.1091	0.1220	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	2	0.1663	0.1762	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	4	0.1898	0.1977	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	7	0.1904	0.2024	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	1	0.1968	0.2034	47.95	211 500	20	0.97	3701
7	3	0.2011	0.2844	174.79	151 500	20	4.91	7793
8	6	0.3906	0.4391	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5452	0.5823	176.65	203 500	20	3.70	7876

Globalny wskaźnik energochłonności budynku dla wartości parametru redystrybucji w zakresie $0.02 \leq \beta \leq 0.06$ uzyskał wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 8$, a jego wartości wynoszą odpowiednio: $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.0925$ dla $\beta = 0.06$ oraz $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.0726$ dla $\beta = 0.02$.

Zakres 10: $\beta = 0.01$

Tabela 8.16. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $\beta = 0.01$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0.01$					
1	8	0.0677	40.19	298 500	20	0.57	3102
2	5	0.1059	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	2	0.1638	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	3	0.1782	174.79	151 500	20	4.91	7793
5	7	0.1875	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	4	0.1879	46.48	228 500	20	0.87	3588
7	1	0.1952	47.95	211 500	20	0.97	3701
8	6	0.3774	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5349	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametru redystrybucji $\beta = 0.01$ wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 8$ uzyskał najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.0677$.

Zakres 11: $\beta = 0$

Tabela 8.17. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla parametrów redystrybucji w zakresie $\beta = 0.00$.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	P_v [rok]	M_v [kg/rok]
		$\beta = 0$					
1	8	0.0628	40.19	298 500	20	0.57	3102
2	5	0.1028	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	3	0.1543	174.79	151 500	20	4.91	7793
4	2	0.1614	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	7	0.1846	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	4	0.1860	46.48	228 500	20	0.87	3588
7	1	0.1936	47.95	211 500	20	0.97	3701
8	6	0.3638	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	9	0.5240	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla parametru redystrybucji $\beta = 0$ wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 8$ uzyskał najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=8} = 0.0628$.

Dla parametrów redystrybucji w zakresie $0.46 \leq \beta \leq 0.5$ najmniejsze wartości wskaźnika energochłonności budynku osiąga wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$. Jest to wynik identyczny z wynikiem osiągniętym w analizie badania wpływu wartości parametru redystrybucji na wartość wskaźnika energochłonności sposobem hybrydowym, opisaną w punkcie 7.3.1.

8.4. Analiza na podstawie ustalonych kombinacji wag kryterialnych

Przeprowadzono analizę wpływu ustalonych kombinacji wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego.

Etap 1. Przygotowanie zbioru danych

Zbiór danych przyjęto zgodnie ze zbiorem wariantów stanowiących podstawę nowoprojektowanego budynku bazowego opisanym w Tabeli 8.2.

Etap 2. Określenie wskaźników energochłonności dla składników wpływających na energochłonność budynku bazowego

Dla każdego wariantu $\{v = 1, 9\}$ określono znormalizowane wartości wskaźników kryteriów optymalizacji $\Delta_{E,v}$ (5.13), $\Delta_{C,v}$ (5.14), $\Delta_{D,v}$ (5.15), $\Delta_{N,v}$ (5.16), $\Delta_{M,v}$ (5.17).

Wagi poszczególnych kryteriów ustalono na podstawie założenia jednego dominującego wskaźnika kryterium optymalizacji i uzupełniająco równoważnych pozostałych wskaźników kryteriów optymalizacji, zgodnie z zestawieniem kombinacji wag w Tabeli 8.18.

Tabela 8.18. Kombinacje wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wartości wag				
	w_E	w_C	w_D	w_N	w_M
E	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
C	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
D	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1
N	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1
M	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6

Etap 3. Określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku bazowego

Obliczono znormalizowane cząstkowe wartości metakryterium optymalizacji, tj. wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ (5.18) z uwzględnieniem obliczeniowych wag kryterialnych, a wyniki zestawiono w Tabeli 8.19.

Tabela 8.19. Wartości wskaźników energochłonności dla wariantów rozwiązań w funkcji kombinacji wag kryterialnych.

Kombinacja wag	Wariant rozwiązania $\{v\}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta_{ec,v}$								
E	0.1659	0.1613	0.8502	0.1665	0.1373	0.8230	0.1992	0.1702	0.8673
C	0.3357	0.4646	0.3570	0.3994	0.5183	0.4045	0.5445	0.6640	0.5442
D	0.4316	0.4415	0.6570	0.4375	0.4373	0.6467	0.4636	0.4640	0.6673
N	0.1768	0.1629	0.8570	0.1713	0.1429	0.7760	0.1875	0.1640	0.7272
M	0.2062	0.1846	0.8485	0.2005	0.1373	0.8170	0.2411	0.1775	0.8673

W następującej sekwencji zestawień tabelarycznych (Tabele 8.20 – 8.24) przedstawiono, dla poszczególnych kombinacji wag kryterialnych, układy kolejności wariantów rozwiązań nowoprojektowanych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika energochłonności wraz z przyporządkowanymi wartościami kryteriów oceny E_v (4.1), C_v (4.25), D_v (4.33), N_v (4.39) i M_v (4.43).

Tabela 8.20. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych E.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	5	0.1373	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	2	0.1613	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	1	0.1659	47.95	211 500	20	0.97	3701
4	4	0.1665	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	8	0.1702	40.19	298 500	20	0.57	3102
6	7	0.1992	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0.8230	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.8502	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.8673	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla kombinacji wag kryterialnych E najmniejszą wartość wskaźnika energochłonności budynku określa wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 5$, a globalny wskaźnik energochłonności budynku wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^E = 0.1373$. Wartość ta jest znacznie mniejsza niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.2632$, osiągnięta dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 8.7.

Tabela 8.21. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych C.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	1	0.3357	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	3	0.3570	174.79	151 500	20	4.91	7793
3	4	0.3994	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	6	0.4045	170.10	168 500	20	4.30	7584
5	2	0.4646	43.95	246 500	20	0.76	3392
6	5	0.5183	38.47	263 500	20	0.62	2969
7	9	0.5442	176.65	203 500	20	3.70	7876
8	7	0.5445	48.32	263 500	20	0.78	3730
9	8	0.6640	40.19	298 500	20	0.57	3102

Dla kombinacji wag kryterialnych C globalny wskaźnik energochłonności budynku określa wariant rozwiązania nowoprojektowanego $v = 1$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^C = 0.3357$. Wartość ta jest znacznie większa niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.2632$ osiągnięta dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 8.7.

Tabela 8.22. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych D.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	1	0.4316	47.95	211 500	20	0.97	3701
2	5	0.4373	38.47	263 500	20	0.62	2969
3	4	0.4375	46.48	228 500	20	0.87	3588
4	2	0.4415	43.95	246 500	20	0.76	3392
5	7	0.4636	48.32	263 500	20	0.78	3730
6	8	0.4640	40.19	298 500	20	0.57	3102
7	6	0.6467	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.6570	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.6673	176.65	203 500	20	3.70	7876

Analiza wyników dla kombinacji wag kryterialnych D wskazuje, że globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 1$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^D = 0.4316$. Wartość ta jest znacząco większa niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.2632$, osiągnięta dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela 8.7.

Tabela 8.23. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości-wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych N.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania {v}	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	5	0.1429	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	2	0.1629	43.95	246 500	20	0.76	3392
3	8	0.1640	40.19	298 500	20	0.57	3102
4	4	0.1713	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	1	0.1768	47.95	211 500	20	0.97	3701
6	7	0.1875	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	9	0.7272	176.65	203 500	20	3.70	7876
8	6	0.7760	170.10	168 500	20	4.30	7584
9	3	0.8570	174.79	151 500	20	4.91	7793

Dla kombinacji wag kryterialnych N globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^N = 0.1429$. Wartość ta jest mniejsza od najmniejszej wartości wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.2632$, osiągniętej dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela 8.7.

Tabela 8.24. Warianty rozwiązań w kolejności rosnących wartości wskaźnika energochłonności dla kombinacji wag kryterialnych M.

Lp.	Nr wariantu rozwiązania $\{v\}$	$\Delta_{ec,v}$	E_v [kWh/(m ² rok)]	C_v [zł]*	D_v [rok]**	N_v	M_v [kg/rok]
1	5	0.1373	38.47	263 500	20	0.62	2969
2	8	0.1775	40.19	298 500	20	0.57	3102
3	2	0.1846	43.95	246 500	20	0.76	3392
4	4	0.2005	46.48	228 500	20	0.87	3588
5	1	0.2062	47.95	211 500	20	0.97	3701
6	7	0.2411	48.32	263 500	20	0.78	3730
7	6	0.8170	170.10	168 500	20	4.30	7584
8	3	0.8485	174.79	151 500	20	4.91	7793
9	9	0.8673	176.65	203 500	20	3.70	7876

Dla kombinacji wag kryterialnych M globalny wskaźnik energochłonności określa rozwiązanie nowoprojektowane $v = 5$ i wynosi $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=5} = \Delta_{ec,v=5}^M = 0.1373$. Wartość ta jest mniejsza niż wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku $\Delta_{ec} = \Delta_{ec,v=1} = \Delta_{ec,v=1}^{\beta=0.5} = 0.2632$, osiągnięta dla rozwiązania z jednakowymi wartościami wag kryterialnych dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$, Tabela. 8.7.

8.5. Dyskusja wyników analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności budynku nowoprojektowanego

Wyniki analizy wpływu wag kryterialnych na wartość globalnego wskaźnika energochłonności określanego sposobem bezpośrednim budynku nowoprojektowanego pozwalają określić następujące fakty.

1. W przypadku zastosowania metody zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów:
 - rozwiązania dla parametrów redystrybucji $\beta = 0.5$ oraz $0.46 \leq \beta \leq 0.49$ wskazują jako najlepsze rozwiązanie nowoprojektowane wariant $v = 1$,
 - rozwiązania dla parametrów redystrybucji $\beta = 0.5$ oraz $0.46 \leq \beta \leq 0.49$ na czterech pierwszych miejscach wskazują tą samą kolejność wariantów rozwiązań nowoprojektowanych.
2. W przypadku zastosowania metody ustalonych kombinacji wag kryterialnych:
 - rozwiązanie dla kombinacji wag kryterialnych D wykazuje kolejność rozwiązań zgodną z kolejnością rozwiązań uzyskaną dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$ i może być uznane jako istotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności,

- rozwiązania dla kombinacji wag kryterialnych C i D wskazują jako najlepsze rozwiązanie nowoprojektowane wariant $v = 1$,
 - rozwiązania dla kombinacji wag kryterialnych E, N i M nie wskazują na zgodność z kolejnością rozwiązań uzyskanych metodą zmiennych wag kryterialnych we wszystkich zakresach parametru redystrybucji β i mogą być uznane jako nieistotne dla określania globalnego wskaźnika energochłonności.
3. Analizy przeprowadzone sposobem bezpośrednim potwierdzają uzasadnienie rekomendacji wyznaczenia globalnego wskaźnika energochłonności dla parametru redystrybucji $\beta = 0.5$.
 4. Analiza porównawcza wyników analiz przeprowadzonych sposobem hybrydowym oraz sposobem bezpośrednim wskazuje ten sam wariant budynku nowoprojektowanego $v = 1$ osiągający globalny wskaźnik energochłonności.

9. Zakończenie – Wnioski

W rozprawie podjęto problematykę badania wpływu rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych na energochłonność budynków.

Podstawowymi celami pracy były: (1) opracowanie metody umożliwiającej wybór optymalnej kombinacji składników wpływających na efektywność energetyczną budynków za pomocą globalnego wskaźnika energochłonności budynku oraz (2) weryfikacja metody na podstawie studiów przypadków budynku modernizowanego i budynku projektowanego.

Podstawowe cele badawcze zostały osiągnięte w wyniku zrealizowania celów szczegółowych: (1) utworzenie baz danych obejmujących specyfikację parametrów budynku oraz składników wpływających na energochłonność budynku, (2) określenie kryteriów wielokryterialnej oceny energochłonności budynku i przyjęcie odpowiednich wag kryterialnych, (3) opracowanie programu obliczeniowego, którego podstawą jest algorytm zawierający równania opisujące proponowaną metodę wielokryterialnej oceny energochłonności budynków.

W wyniku przeprowadzonych badań, teza badawcza rozprawy dotycząca możliwości wyznaczenia globalnego wskaźnika energochłonności budynku na podstawie metody optymalizacji wielokryterialnej została potwierdzona, a opracowana metoda okazała się efektywnym narzędziem w kontekście analizy i projektowania energooszczędnych obiektów budowlanych.

W rozprawie opracowano dwa różne sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności: hybrydowy i bezpośredni. Sposób hybrydowy, oparty na szczegółowej analizie poszczególnych składników (materiałowych, konstrukcyjnych, instalacyjnych) wpływających na energochłonność budynku, pozwala na precyzyjną, połączoną analizę wielokryterialną właściwości składników, ich optymalny wybór w celu konfigurowania wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych oraz ocenę tych wariantów. Sposób bezpośredni koncentruje się na ocenie i optymalnym wyborze wariantów rozwiązań, pomijając szczegółową analizę elementów składowych, co przekłada się na efektywność wykonania oceny.

Zbiór składników wpływających na energochłonność budynków jest zbiorem otwartym i może być uzupełniany o nowe rozwiązania. Podobnie zbiór kosztów tych składników oraz jednostkowy koszt energii musi być aktualizowany w odniesieniu do sytuacji rynkowej. Również analiza trwałości tych składników jest zależna od wyników badań zachowania ich właściwości użytkowych w długim okresie eksploatacji.

Do analizy zostały przyjęte kryteria: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu nakładu inwestycyjnego (dla budynków modernizowanych) lub liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych (dla budynków projektowanych) oraz emisyjność dwutlenku węgla. Wartości tych kryteriów obliczane są w odniesieniu do konstrukcji obiektu referencyjnego (bazowego), a wartości wag przypisanych poszczególnym kryteriom przyjmowane są na podstawie przedstawionych sposobów doboru wag.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa, bazująca na prezentowanej metodzie, wykazała wysoką skuteczność opracowanego algorytmu w kontekście modernizacji budynków, a także pozwoliła na szczegółową ocenę wpływu zmian wag kryteriów na globalny wskaźnik energochłonności. Wyniki analizy pozwoliły na sformułowanie rekomendacji wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności przy złożeniu jednakowych wartości wag kryterialnych w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania modernizacyjnego.

Obliczenia na podstawie wielokryterialnej metody wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności sposobem hybrydowym dla budynku nowoprojektowanego, przeprowadzono przy założeniu jednakowych wag dla wszystkich kryteriów. Wyniki tych obliczeń umożliwiły ocenę energochłonności nowego obiektu w kontekście różnych kombinacji składników. Przyjęcie jednakowych wag kryterialnych pozwoliło na uzyskanie miarodajnej oceny, niemniej jednak wyniki te stanowiły punkt wyjścia do dalszej analizy, w której wagi kryterialne mogą być dostosowywane do konkretnych wymagań użytkownika lub specyfiki projektu. Przeprowadzono analizę wpływu zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów, a także analizę wpływu zmiany budynku bazowego. Wyniki tych analiz pozwoliły na potwierdzenie rekomendacji wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności przy złożeniu jednakowych wartości wag kryterialnych w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego.

Dla budynku nowoprojektowanego przeprowadzono również obliczenia sposobem bezpośrednim. Wyniki tych obliczeń umożliwiły ocenę energochłonności budynku w kontekście stosowania różnych wariantów rozwiązań. Przyjęcie jednakowych wag dla wszystkich kryteriów pozwoliło na uzyskanie wyników analizy zgodnych z wynikami rozwiązań przeprowadzonych sposobem hybrydowym.

Uzasadnienie rekomendacji dla stosowania jednakowych wag kryterialnych, potwierdzone zostało dodatkowymi analizami ekonomicznymi, które wykazały, że zmiana wartości wag powodująca zmianę kolejności rozwiązań może wskazywać rozwiązania ekonomicznie nieuzasadnione do realizacji.

Proponowana metoda może być rozwijana w kierunku zmiany liczby i rodzajów kryteriów analizy, badania wpływu zmian stopnia ważności poszczególnych kryteriów analizy, czy też w odniesieniu do zastosowania różnych rodzajów budynków. Dalszy rozwój tej metody może przyczynić się do bardziej precyzyjnej optymalizacji energetycznej obiektów budowlanych, odpowiadając na rosnące potrzeby zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Proponowana metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków pozwala na połączenie obu sposobów: hybrydowego i bezpośredniego w trakcie trwania różnych faz procedury projektowej przy bardzo skomplikowanych budynkach. W fazie koncepcyjnej można zastosować sposób bezpośredni, który pozwoli na szybką selekcję planowanych wariantów rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych, aby następnie w fazie wykonawczej zastosować sposób hybrydowy w celu optymalizacji składników wybranych wariantów rozwiązań.

Porównanie sposobu hybrydowego i bezpośredniego w kontekście wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków uwidacznia istotne różnice w podejściu, dokładności oraz praktycznym zastosowaniu obu metod. Każda z nich ma swoje zalety i ograniczenia, które determinują ich przydatność w zależności od zakresu projektu.

Obydwa sposoby służą temu samemu celowi – minimalizacji wskaźnika energochłonności, ale różnią się stopniem szczegółowości oraz wymaganiami dotyczącymi danych wejściowych. Sposób hybrydowy, dzięki swojej złożoności, jest przydatny w projektach wymagających pełnej optymalizacji, np. w budynkach zeroenergetycznych, w których każdy składnik ma istotny wpływ na końcowy wynik. Z kolei, sposób bezpośredni sprawdza się w sytuacjach, w których priorytetem jest szybka ocena gotowych koncepcji wariantowych.

Na podstawie wyników realizacji pracy możliwe jest wskazanie istotnych cech proponowanej metody rozwiązania.

1. Zastosowanie wielokryterialnej metody analizy energochłonności budynków powiększa zakres dotychczasowej praktyki wyboru wariantu rozwiązania budynku energooszczędnego polegający na bezpośrednim porównaniu poszczególnych wariantów rozwiązań użytych oddzielnie pod względem zapotrzebowania na energię końcową, kosztu wykonania oraz – w przypadku modernizacji – okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych.
2. Propozycja globalnego wskaźnika energochłonności budynku wskazującego najlepsze rozwiązanie stanowi nowe podejście do oceny rozwiązania budynku energooszczędnego polegające na uwzględnieniu ważonego udziału wielu kryteriów w tej ocenie.

3. Wprowadzenie nowego parametru efektywności ekonomicznej dla budynków nowoprojektowanych – liczby cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych, umożliwia zróżnicowanie podejścia do oceny budynków modernizowanych i projektowanych; dotychczas czas zwrotu nakładów inwestycyjnych określano tylko dla prac modernizacyjnych budynku, a w przypadku budynków projektowanych nie opracowano podobnego sposobu weryfikacji opłacalności nowych inwestycji.
4. Rekomendacja stosowania metody przy uwzględnieniu jednakowych wag kryterialnych zapewnia efektywne określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku.
5. Propozycja klas energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych umożliwia klasyfikację wariantów i ułatwia wybór optymalnego wariantu rozwiązania budynku.
6. Uniwersalny charakter metody nie zakłada żadnych ograniczeń co do typu budynku, możliwości uwzględnienia specyficznych wymagań dotyczących regionu lokalizacji budynku i uwzględnienia innych kryteriów analizy.

Otrzymane wyniki analizy studiów przypadków modernizowanego budynku referencyjnego oraz nowoprojektowanego budynku bazowego wskazują na wysoką skuteczność opracowanej metody. Proponowana metoda umożliwia wyraźne wskazanie rozwiązania najbardziej korzystnego, z zastrzeżeniem, że ostateczna decyzja dokonania wyboru wariantu rozwiązania pozostaje w gestii użytkownika.

Proponowana metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków charakteryzuje się dużym potencjałem rozwojowym. Analizy przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykazały, że opracowana metoda doboru wag kryteriów decyzyjnych za pomocą wprowadzonego współczynnika wpływu wartości wskaźnika kryterium na wartość wagi wymaga dalszego doskonalenia. Zmiana wag kryterialnych, w zależności od specyfiki badanego obiektu, może znacząco wpłynąć na ostateczny wybór optymalnej kombinacji składników budynku. W związku z tym, dalsze badania nad bardziej zaawansowanymi metodami doboru wag kryterialnych, np. opartymi na dynamicznym modelowaniu preferencji lub algorytmach uczących się, mogą przyczynić się do dalszego rozwoju prezentowanej metody.

Metoda optymalizacji wielokryterialnej, oparta na uwzględnieniu różnych kryteriów, takich jak zapotrzebowanie na energię, koszt, trwałość, czas zwrotu inwestycji lub liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych oraz emisja dwutlenku węgla, stanowi skuteczne narzędzie wspierające projektowanie budynków pod względem efektywności energetycznej.

Ma to kluczowe znaczenie w kontekście globalnych wyzwań związanych z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych oraz ochroną środowiska.

Przedstawiona metoda może mieć zastosowanie w praktyce inżynierskiej, umożliwiając podejmowanie bardziej świadomych decyzji projektowych, które przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju i efektywności energetycznej budynków. Skuteczne wdrożenie opracowanej metody w praktyce będzie możliwe po utworzeniu ogólnie dostępnych baz danych, które umożliwią aktualizowanie informacji na temat materiałów budowlanych, kosztów oraz parametrów energetycznych. Ponadto, istotnym krokiem w implementacji metody będzie zintegrowanie narzędzi analitycznych z istniejącymi systemami oprogramowania wykorzystywanymi w projektowaniu budynków, co pozwoli na łatwiejsze wdrożenie tej metody w praktycznym działaniu inżynierów i architektów.

Wykaz literatury

Monografie

1. Akroyd T.N.W., 1962, *Concrete: Properties and Manufacture*, Pergamon Press, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01679-9>.
2. Alexander M.G., Arliguie G., Ballivy G., Bentur A., Marchand J., 1999, *Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, RILEM Publications.
3. Bian A.P., 2013, *The Research of Heating Terminal Device and Equipment Combined Heat Pipe with Wall*, Harbin Institute of Technology, Harbin.
4. Bridgman P.W., 1922, *Dimensional Analysis*, Yale University Press, New Haven.
5. Brodowicz K., Dyakowski T., 1990, *Pompy ciepła*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
6. Broszkiewicz S., Dobrzyński M., Gaaz K., 2007, *Systemy centralnego ogrzewania i wentylacji. Poradnik dla projektantów i instalatorów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, (Tłum. z niem.).
7. Byrdy C., 2009, *Ciepłochronne konstrukcje ścian zewnętrznych budynków mieszkalnych*, Wydawnictwo Politechnika Krakowska, Kraków.
8. Chandra S., Berntsson L., 2002, *Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology and Applications*, Noyes Publications, William Andrew Publishing, Norwich, NY, USA, ISBN 978-0-8155-1486-2.
9. Dąbrowski J., 2009, *Kolektory słoneczne do podgrzewania wody użytkowej. Efektywność i opłacalność instalacji*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław.
10. Duffie J.A., Beckman W.A., 2013, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4. wydanie, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
11. Dynus M., 2007, *Okres zwrotu jako jedna z metod oceny opłacalności przedsięwzięć inwestycyjnych*, w: *Działania ekonomiczne podmiotów rynkowych*, red. D. Kopycińska, Wydawnictwo Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin, s. 120-128.
12. Dytczak M., 2010, *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole.
13. Feist W., Schlagowski G., Schulze-Darup B., 2006, *Podstawy budownictwa pasywnego*, Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, Gdańsk.
14. Hwang C.L., Masud A.S.M., 1979, *Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*, Springer-Verlag.
15. Jamroży Z., 2015, *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
16. Kalyanmoy D., 2011, *Multi-objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*, w: *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*, Springer-Verlag.
17. Klemm P., 2007, *Budownictwo ogólne, Tom 2. Fizyka budowli*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
18. Koc D., 2014, *Systemy wentylacyjne – rodzaje i wymagania w świetle nowych przepisów*, w: *Budownictwo energooszczędne Vademecum*, Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa Sp. z o.o. s. 14-16.

19. Kosny J., Chidls P., Desjarlais A., 1999, Thermal performance of prefabricated concrete sandwich wall panels, *Oak Ridge National Laboratory Buildings Technology Center*, Oak Ridge, TN.
20. Kurtz K., Gawin D., 2009, *Certyfikacja energetyczna budynków mieszkalnych z przykładami*, Wydawnictwo Atla 2, Wrocław.
21. Marks W., Owczarek S. (red.), 1999, *Optymalizacja wielokryterialna budynków energooszczędnych*, Studia z Zakresu Inżynierii Nr 46, Polska Akademia Nauk, Warszawa.
22. Mańko M., 2014, Rola przeszkleń w budownictwie energooszczędnym, w: *Budownictwo energooszczędne Vademecum*, Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa Sp. z o.o., s. 17–20.
23. Mroziński A., 2016, *Inżynieria instalacji pomp ciepła*, Wydawnictwo współfinansowane ze środków funduszy norweskich oraz środków krajowych, Bydgoszcz.
24. Mohammad H. K., 2005, *Robust Multi-Criteria Optimization of Surface Location Error and Material Removal Rate in High-Speed Milling under Uncertainty*, rozprawa doktorska, Graduate School of the University of Florida, University of Florida
25. Niezabitowska E., 2005, *Budynek inteligentny. Tom 1 – Potrzeby użytkownika a standard budynku inteligentnego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
26. Opaliński S., Rabczak S., 2003, *Wentylacja grawitacyjna*, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
27. Pastusiak R., 2018, *Ocena efektywności inwestycji*, CeDeWu, Warszawa.
28. Pătrașcu Gh., 1984, *Arhitectura și tehnica populară (Folk Technique and Architecture)*, Editura Tehnică, Bucharest, Romania
29. Pełech A., 2011, *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
30. Piotrowski R., 2009, *Domy pasywne: Najlepsze obiekty oraz technologie niskoenergetyczne i pasywne w Polsce*, Wydawnictwo Przewodnik Budowlany, Warszawa.
31. Przysański J., 1981, *Wykopy fundamentowe i odwodnienie gruntu*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
32. Robathan P., 1989, *Intelligent Buildings Guide*, Intelligent Buildings Group and IBC Technical Services Ltd., London.
33. Rubik M., 2006, *Pompy ciepła – Poradnik*, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa.
34. Sensuła, B., 2023, Poziom CO₂ w powietrzu atmosferycznym w Gliwicach – pierwsze wyniki badań przełomowych, [w:] *Współczesne Problemy Ochrony Środowiska i Energetyki*, s. 94–103, ISBN 978-83-964116-3-1.
35. Siddiqui S.A., 1989, *Handbook on Cellulose Insulation*, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, USA, ISBN-13 978-0-894-64336-1
36. Stadnicki J., 2006, *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
37. Stachniewicz R., 2014, *Wpływ termoizolacji na energooszczędność budynku*, *Budownictwo Energooszczędne Vademecum*, Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa Sp. z o.o., Warszawa, Polska. s. 9-13.

38. Stefańczyk B., 2005, *Budownictwo ogólne, Tom I. Materiały i wyroby budowlane*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
39. Szymański E., 2004, *Materiały budowlane. Tom I*, Oficyna Wydawnicza WSEiZ, Warszawa.
40. Szymański E., 2005, *Materiały budowlane. Tom II*, Oficyna Wydawnicza WSEiZ, Warszawa.
41. Teichner, S. J., Nicolaon, G.A., 1968, Preparation of silica aerogels from methyl orthosilicate in alcoholic medium and their properties, *Bulletin de la Société Chimique de France*.
42. Vale B., Vale R.J.D., 1975, *The Autonomous House: Design and Planning for Self-Sufficiency*, Thames and Hudson, London.
43. Voogd H., 1983, *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London.
44. Węglarz A., 2014, *Systemy grzewcze również energooszczędne*, w: *Budownictwo energooszczędne Vademecum*, Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, Warszawa, s. 21-24.
45. Wnuk R., 2006, *Budowa Domu Pasywnego w praktyce*, Wydawnictwo Przewodnik Budowlany, Warszawa, ISBN: 83-923394-0-3.
46. Wnuk R., 2007, *Instalacje w domu pasywnym i energooszczędnym*, Wydawnictwo Przewodnik Budowlany, Warszawa.
47. Wojciechowski P., Krupa M., 2010, *Wykorzystanie makulatury gazetowej do ocieplania budynków – aspekty techniczne i ekonomiczne*, [w:] *Współczesne problemy ekonomiczne jako wyzwanie dla zmieniającej się gospodarki*, red. Kwaśnik Z., Żukowa W., Wydawnictwo Radom, Radom, s. 123-134
48. Zeleny M., 1973, Compromise programming, [w:] Cochrane J.L., Zeleny M. (red.), *Multiple Criteria Decision Making*, University of South Carolina Press, Columbia, s. 384-414.
49. Zeleny M., 1982, *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, Nowy Jork, s. 1-234.
50. Zimmermann H.J., 1991, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Wydanie drugie, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
51. Zitzler E., 1999, *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
52. Żarski K., 2010, *Charakterystyka energetyczna budynków*, Ośrodek Informacji Technika instalacyjna w budownictwie, Warszawa.

Artykuły w czasopismach naukowych

53. Adamowicz E., Borkowski P., Kamińska T., 2017, ENPV jako narzędzie oceny kosztów i korzyści w inwestycjach infrastrukturalnych w transporcie, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Gdańskiego. Ekonomia Transportu i Logistyka*, nr 64, s. 141-156.
54. Aigbomian E.P., Fan M., 2013, Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper, *Construction and Building Materials*, nr 40, s. 361-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.018.

55. Al-Khaiat H., Haque M.N., 1998, Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, nr 28, s. 859-866. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00051-9.
56. Albanese M., Robinson B., Brehob E., Sharp M.K., 2012, Simulated and experimental performance of a heat pipe assisted solar wall, *Solar Energy*, nr 86, s. 1552-1562. DOI: 10.1016/j.solener.2012.02.017.
57. Alqahtani F.K., Ghataora G., Khan M.I., Dirar S., 2017, Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate, *Construction and Building Materials*, nr 148, s. 386-397. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011.
58. Alvares-Ramirez R., Montes-Garcia P., Martinez-Reyes J., Altamirano-Juarez D.C., Gochi-Ponce Y., 2012, The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks, *Construction and Building Materials*, nr 34, s. 296-305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072.
59. Antkiewicz J., 2014, Poradnik – Dom energooszczędny: Oplacalne oszczędzanie, *Budujemy Dom*, nr 10, s. 50-55.
60. Ardakani A., Yazdani M., 2014, The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates, *Applied Clay Science*, nr 93-94, s. 28-34. DOI: 10.1016/j.clay.2014.02.017.
61. Arendt K., Krzaczek M., Antczak R., Tejchman J., 2015, Wpływ systemu ogrzewania na zużycie energii i koszty eksploatacyjne budynku, *Przegląd Budowlany*, R. 86, nr 4, s. 46-50.
62. Aresti L., Christodoulides P., Florides G., 2018, A review of the design aspects of ground heat exchangers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 92, s. 757-773. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.053.
63. Asadi I., Shafigh P., Bin Abu Hassan Z.F., Mahyuddin N., 2018, Thermal conductivity of concrete – A review, *Journal of Building Engineering*, nr 20, s. 81-93. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.07.002.
64. Arsu T., Umarusman N., 2020, Global Criterion Approach for the Solution of Multiple Criteria Data Envelopment Analysis Model: An Application at Packaging Waste Collection and Separation Facilities, *Alphanumeric Journal*, nr 8, s. 79-96. DOI: 10.17093/alphanumeric.625946.
65. Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D., Cheeseman, C., 2018, Use of Clay in the Manufacture of Lightweight Aggregate, *Construction and Building Materials*, nr 162, s. 124-131, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018.
66. Bal H., Jannot Y., Quenette N., Chenu A., Gaye S., 2012, Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite-based bricks with millet waste additive, *Construction and Building Materials*, nr 31, s. 144-150. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.063.
67. Benmansour N., Agoudjil B., Gherabli A., Kareche A., Boudenne A., 2014, Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings*, nr 81, s. 98-104. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.05.032.

68. Bianco L., Pollo R., Serra V., 2017, Wood fiber vs synthetic thermal insulation for roofs energy retrofit: A case study in Turin, Italy, *Energy Procedia*, nr 111, s. 347-356. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.196.
69. Bishara N., Schulz T., Gecks J., Plagge R., Wehsener J., 2017, Thermal opposition and performance analysis of an innovative wooden radiant heating system made for room temperature control—Laboratory and numerical investigation of prototypes, *Energy and Buildings*, nr 138, s. 569-578. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.091.
70. Bojić M., Cvetković D., Marjanović V., Blagojević M., Djordjević Z., 2013, Performances of low temperature radiant heating systems, *Energy and Buildings*, nr 61, s. 233-238. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.02.033.
71. Bomberg M., Shirliffe C.J., 1979, Comments on standardization of density and thermal resistance testing of cellulose fibre insulation for horizontal applications, *Building Research Note*, nr 147, National Research Council of Canada.
72. Booranawong A., Sengchuai K., Jindapetch N., Saito H., 2020, An investigation of min-max method problems for RSSI-based indoor localization: Theoretical and experimental studies, *Engineering and Applied Science Research*, nr 47, s. 313-325.
73. Borucińska-Bieńkowska H., 2017, Wpływ lokalizacji i formy budynku na jego właściwości energooszczędne, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, nr 1, s. 27-34. DOI: 10.17512/bozpe.2017.1.04.
74. Bryś K., Bryś T., Sayegh M.A., Ojrzyńska H., 2018, Subsurface shallow depth soil layers thermal potential for ground heat pumps in Poland, *Energy and Buildings*, nr 165, s. 64-75. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.015.
75. Brzostowski J., Roszkowska E., 2014, System rekomendacji doboru wag kryteriów oparty na ich charakterystyce probabilistycznej, *Studia Ekonomiczne*, 178, s. 58-72, YADDA: bwmeta1.element.ekon-element-000171284697.
76. Cao V.D., Pilehvar S., Salas-Bringas C., Szczotok A.M., Quang B. T., Carmona M., Rodriguez J.F., Kjoniksen A.L., 2018, Thermal performance and numerical simulation of geopolymer concrete containing different types of thermoregulating materials for passive building applications, *Energy and Buildings*, nr 173, s. 678-688. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.06.011.
77. Cao X., Liu J., Cao X., Li Q., Hu E., Fan F., 2015, Study of the thermal insulation properties of the glass fibre board used for interior building envelope, *Energy and Buildings*, nr 107, s. 49-58. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.007.
78. Carlander J., Moshfegh B., Akander J., Karlsson F., 2020, Effects on energy demand in an office building considering location, orientation, façade design and internal heat gains—A parametric study, *Energies*, nr 13, s. 6170. DOI: 10.3390/en13236170.
79. Celadyn W., 2014, Durability of buildings and sustainable architecture, *Technical Transactions. Architecture*, nr 7-A, s. 17-26.
80. Charnes A., Cooper W.W., Ferguson R.O., 1955, Optimal estimation of executive compensation by linear programming, *Management Science*, nr 1, s. 138-151.
81. Charnes A., Cooper W.W., 1957, Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, *Management Science*, nr 4, s. 38-91.

82. Charnes A., Clower R.W., Kortanek K.O., 1967, Effective control through coherent decentralization with preemptive goals, *Econometrica*, nr 35, s. 294-320. DOI: 10.2307/1909114.
83. Charnes A., Cooper W.W., 1977, Goal programming and multiple objective optimization; Part 1, *European Journal of Operational Research*, nr 1, s. 39-54. DOI: 10.1016/S0377-2217(77)81007-2.
84. Chen R., Shyu Z.J., 2006, Selecting a weapon system using zero-one goal programming and analytic network process, *Journal of Information & Optimization Sciences*, nr 27, s. 379-399. DOI: 10.1080/02522667.2006.10699697.
85. Choo E.U., Schoner B., Wedley W.C., 1999, Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making, *Computers & Industrial Engineering*, nr 37, s. 527-541. DOI: 10.1016/S0360-8352(00)00019-X.
86. Chaudhary M.T.A., 2012, Implications of rising groundwater level on structural integrity of underground structures – investigations and retrofit of a large building complex, *Structural Survey*, nr 30, s. 111–129, DOI: 10.1108/02630801211228725.
87. Corscadden K.W., Biggs J.N., Stiles D.K., 2014, Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource? *Resources, Conservation & Recycling*, nr 86, s. 9-15. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.01.004.
88. Costa V.A.F., 2014, Improving the thermal performance of red clay holed bricks, *Energy and Buildings*, nr 70, s. 352-364. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.052.
89. Costa N.R., Pereira Z.L., 2010, Multiple response optimization: a global criterion-based method, *Journal of Chemometrics*, nr 24, s. 333–342. DOI: 10.1002/cem.1312.
90. Das I., Dennis J.E., 1998, Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems, *SIAM Journal on Optimization*, nr 8. DOI: 10.1137/S1052623496307510.
91. Dąbrowska J., 2015, Poradnik – Dom energooszczędny: Jak wybrać dobry projekt domu energooszczędnego? *Budujemy Dom*, nr 3, s. 42–50.
92. De'Gennaro R., Cappelletti P., Cerri G., de'Gennaro M., Dondi M., Langella A., 2005, Neapolitan yellow tuff as raw material for lightweight aggregates in lightweight structural concrete production, *Applied Clay Science*, nr 28, s. 309-319. DOI: 10.1016/j.clay.2004.01.014.
93. Demir İ., Başpınar S., Kahraman E., 2017, Production of insulations and construction materials from expanded perlite, *Lecture Notes in Civil Engineering*, nr 6. s. 24-32 DOI: 10.1007/978-3-319-63709-9_3.
94. Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L., 1995, Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method, *Computers & Operations Research*, nr 22, s. 763-770. DOI: 10.1016/0305-0548(94)00059-H.
95. Diaz J.J. del Coz, Garcia Nieto P.J., Alvarez Rabanal F.P., Alonso Martinez M., Dominguez Hernandez J., Perez Bella J.M., 2014, The use of response surface methodology to improve the thermal transmittance of lightweight concrete hollow bricks by FEM, *Construction and Building Materials*, nr 52, s. 331-344. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.056.
96. Dubas W., 2006, Podstawy budownictwa energooszczędnego, *Przegląd Budowlany*, nr 5, s. 19-24.

97. Fekadu G., Subudhi S., 2018, Renewable energy for liquid desiccants air conditioning system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 93, s. 364-379. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.016.
98. Fiaschi D., Bertolli A., 2012, Design and exergy analysis of solar roofs: a viable solution with aesthetic appeal to collect solar heat, *Renewable Energy*, nr 46, s. 60-71. DOI: 10.1016/j.renene.2012.03.013.
99. Florides G., Kalogirou S., 2007, Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications, *Renewable Energy*, nr 32, s. 2461–2478. DOI: 10.1016/j.renene.2006.12.014.
100. Freitas Gomes J.H., Júnior A.R.S., De Paiva A.P., Ferreira J.R., Da Costa S.C., Balestrassi P.P., 2012, Global criterion method based on principal components to the optimization of manufacturing processes with multiple responses, *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, nr 5, s. 345-353. DOI: 10.5545/sv-jme.2011.136.
101. Fu J.Q., Wang S.Q., He C.X., Lu Z., Huang J., Chen Z.L., 2016, Facilitated fabrication of high strength silica aerogels using cellulose nanofibrils as scaffold, *Carbohydrate Polymers*, nr 147, s. 89-96. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.03.048.
102. Gangolells M., Gaspar K., Casals M., Ferré-Bigorra J., Forcada N., Macarulla M., 2020, Life-cycle environmental and cost-effective energy retrofitting solutions for office stock, *Sustainable Cities and Society*, nr 61, s. 102319. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102319.
103. Gerasimov E.N., Repko V.N., 1978, Multi-criteria Optimization, *Journal of Applied Mechanics*, nr 14, s. 1179-1184.
104. Giagkiozis I., Fleming P.J., 2015, Methods for multi-objective optimization: An analysis, *Information Sciences*, nr 293, s. 338–350. DOI: 10.1016/j.ins.2014.08.071.
105. Ginevičius R., Podvieszko V., 2001, Complex evaluation of economical-social development of Lithuanian regions, *Statyba*, nr 7, s. 304-309. DOI: 10.1080/13921525.2001.10531740
106. Gonzalez-Garcia S., Feijoo G., Widsten P., Kandelbauer A., Zikulnig-Rusch E., Moreira M.T., 2009, Environmental performance assessment of hardboard manufacture, *International Journal of Life Cycle Assessment*, nr 14, s. 456–466. DOI: 10.1007/s11367-009-0099-z.
107. Gouny F., Fouchal F., Pop O., Maillard P., Rossignol S., 2013, Mechanical behavior of an assembly of wood–geopolymer–earth bricks, *Construction and Building Materials*, nr 38, s. 110-118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.113.
108. Hahne E., 2000, The ITW solar heating system: An oldtimer fully in action, *Solar Energy*, nr 69, s. 469–493. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00115-8.
109. Hamedani E.Y., Jalilzadeh A., Aybat N.S., Shanbhag U.V., 2018, Iteration complexity of randomized primal-dual methods for convex-concave saddle point problems, *arXiv*. DOI: 10.48550/arXiv.1805.07588.
110. Hanafizadeh P., Latif V., 2011, Robust net present value, *Mathematics and Computer Modelling*, nr 54, s. 233–242. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.02.005.
111. Hanif A., Lu Z., Cheng Y., Diao S., Li Z., 2017, Effects of different lightweight functional fillers for use in cementitious composites, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, nr 11, s. 99-113. DOI: 10.1007/s40069-016-0184-1.

112. Hanif A., Diao S., Lu Z., Fan T., Li Z., 2016, Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres – mechanical and thermal insulating properties, *Construction and Building Materials*, nr 116, s. 422-430. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.134.
113. Huang Y., Gong L., Pan Y., Li C., Zhou T., Cheng X., 2018, Facile construction of the aerogel/geopolymer composite with ultra-low thermal conductivity and high mechanical performance, *Royal Society of Chemistry Advances*, nr 5, s. 2350-2356. DOI: 10.1039/c7ra12041a.
114. Hurtado P.L., Rouilly A., Vandenbossche V., Raynaud C., 2016, A review on the properties of cellulose fibre insulation, *Building and Environment*, nr 96, s. 170-177. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.031.
115. Hwang C.L., Yoon K., 1981, Multiple attribute decision making: Methods and applications – A state-of-the-art survey, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, nr 186, Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-10558-9.
116. Ibrahim A., Surya R.A., 2019, The Implementation of Simple Additive Weighting (SAW) Method in Decision Support System for the Best School Selection in Jambi, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series*, nr 1338. DOI: 10.1088/1742-6596/1338/1/012054.
117. Ijiri Y., 1967, Management Goals and Accounting for Control, *Recherches Économiques de Louvain / Louvain Economic Review*, t. 33, s. 225–226, DOI: 10.1017/S0770451800022600.
118. Ionescu C., Baracu T., Vlad G.E., Necula H., Badea A., 2015, The historical evolution of the energy efficient buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 49, s. 243–253, DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.062.
119. Ivanov K.S., 2018, Preparation and properties of foam glass-ceramic from Diatomite, *Journal of Wuhan University of Technology*, t. 33, s. 273–277, DOI: 10.1007/s11595-018-1817-8.
120. Jamiółkowski A., 2015, Poradnik – Dom energooszczędny: Po co te wentylatory? *Budujemy Dom*, nr 9, s. 50–56.
121. Jaroszewicz J., 2017, Wpływ metody określenia lokalnych wag kryteriów w analizie wielokryterialnej, *Roczniki Geomatyki*, t. XV, z. 1(76), s. 79–88.
122. Kacprzak D., 2018, Przedziałowa metoda TOPSIS dla grupowego podejmowania decyzji, *Optimum. Economic Studies*, nr 4, DOI: 10.15290/oes.2018.04.94.19.
123. Kaczmarzyk M., Starakiewicz A., Waśniowski A., 2020, Internal heat gains in a lunar base – A contemporary case study, *Energies*, t. 13, 3213, DOI: 10.3390/en13123213.
124. Kaliszewski I., 1985, A characterization of properly efficient solutions by an augmented Tchebycheff norm, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, t. 33, nr. 7-8, s. 415-420.
125. Kaliszewski I., 1987, A modified Tchebycheff metric for multiple objective programming, *Computers & Operations Research*, t. 14, s. 315–323, DOI: 10.1016/0305-0548(87)90069-4.
126. Karamanos A., Hadiarakou S., Papadopoulos A.M., 2008, The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool, *Energy and Buildings*, t. 40, s. 1402–1411, DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.01.004.

127. Kathirgamanathan A., De Rosa M., Mangina E., Finn D.P., 2021, Data-driven predictive control for unlocking building energy flexibility: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 135, 110120, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110120.
128. Kessling W., Laevemann E., Peltzer M., 1998, Energy storage in open cycle liquid desiccant cooling systems, *International Journal of Refrigeration*, t. 21, s. 150–156, DOI: 10.1016/S0140-7007(97)00045-5.
129. Khan P.Q., 1989, Optymalizacja wielokryterialna, *Roczniki Polskiego Towarzystwa Matematycznego*, t. 18, s. 31–47, DOI: 10.14708/ma.v18i32.1736.
130. Khoukhi M., 2018, The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance, *Energy and Buildings*, nr 169, s. 228–235, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.055.
131. Kistler S., 1932, Coherent expanded-aerogels, *Journal of Physical Chemistry*, t. 36, s. 52–64, DOI: 10.1021/j150331a003.
132. Kontokosta C.E., 2016, Modeling the energy retrofits decision in commercial office buildings, *Energy and Buildings*, t. 131, s. 1–20, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.062.
133. Kristanto L., Sugiharto H., Dwi Agus S.W., Aditya Pratama S., 2017, Calcium silicate board as wall-façade, *Procedia Engineering*, nr 171, s. 679–688, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.409.
134. Kreibich H., Thieken A.H., 2008, Assessment of damage caused by high groundwater inundation, *Water Resources Research*, t. 44, W09409, DOI: 10.1029/2007WR006621.
135. Król M., Morawska J., Mozgawa W., Pichór W., Barczyk K., 2014, Synteza zeolitów z perlitu i ich zdolności sorpcyjne, *Materiały Ceramiczne*, t. 66, s. 129–134.
136. Kumar S.G., Abdul Aleem M.I., Dinesh S., 2015, Application of geopolymer concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology*, nr 2, s. 96-99, e-ISSN: 2395 -0056.
137. Kwon Y.C., Yarbrough D.W., 2004, A comparison of Korean cellulose insulation with cellulose insulation manufactured in the United States of America, *Journal of Thermal Envelopes and Building Science*, t. 27, s. 185–197, DOI: 10.1177/1097196304035242.
138. Laouadi A., 2004, Development of radiant heating and cooling model for building energy simulation software, *Building and Environment*, t. 39, s. 421–431, DOI: 10.1016/j.buildenv.2003.09.016.
139. Levinson R., Akbari H., 2010, Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants, *Energy Efficiency*, t. 3, s. 53–109, DOI: 10.1007/s12053-008-9038-2.
140. Levinson R., Akbari H., Berdahl P., 2010, Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain, *Solar Energy*, t. 84, s. 1717–1744, DOI: 10.1016/j.solener.2010.04.018.
141. Levinson R., Akbari H., Konopacki S., Bretz S., 2005, Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements, *Energy Policy*, nr 33, s. 151–170, DOI: 10.1016/S0301-4215(03)00206-4.
142. Liang Y., Wu H., Huang G., Yang J., Wang H., 2017, Thermal performance and service life of vacuum insulation panels with aerogel composite cores, *Energy and Buildings*, nr 154, s. 606–617, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.085.

143. Liu J., Zhang Q., Dong Z., Li X., Li G., Xie Y., Li K., 2021, Quantitative evaluation of the building energy performance based on short-term energy predictions, *Energy*, nr 223, 120065, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120065.
144. Lipski T., 2008, Projekt domu energooszczędnego, *Budujemy Dom*, nr 3.
145. López-Ochoa L.M., Las-Heras-Casas J., Olasolo-Alonso P., López-González L.M., 2021, Towards nearly zero-energy buildings in Mediterranean countries: Fifteen years of implementing the Energy Performance of Buildings Directive in Spain (2006–2020), *Journal of Building Engineering*, nr 44, 1, 02962, DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102962.
146. Mahammad Abdulrahman T., Mat Sohif B., Sulaiman M., Sopian K., Al-abidi A.A., 2013, Historical review of liquid desiccant evaporation cooling technology, *Energy and Buildings*, nr 67, s. 22–33, DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.018.
147. Mahapatra G.S., 2009, Reliability optimization of entropy based series-parallel system using global criterion method, *Intelligent Information Management*, nr 1, s. 145–149, DOI: 10.4236/iim.2009.13021.
148. Mahdy M.M., Nikolopoulou M., 2014, Evaluation of fenestration specifications in Egypt in terms of energy consumption and long-term cost-effectiveness, *Energy and Buildings*, nr 69, s. 329–343, DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.028.
149. Marler R.T., Arora J.S., 2004, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, nr 26, s. 369–395, DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6.
150. Marler R.T., Arora J.S., 2009, The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, nr 41, s. 853–862, DOI: 10.1007/s00158-009-0460-7.
151. Marszał J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A., 2011, Zero energy building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, nr 43, s. 971–979, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.
152. Maskell D., Heath A., Walker P., 2014, Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units, *Construction and Building Materials*, nr 71, s. 602–609, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.094.
153. Mesran M., Siregar D., Nasution S.D., Sahir S.H., Diansyah T.M., Agustina I., Supriyanto S., Wardayani W., Hasibuan N.A., Lubis D.S.W., Anas A., Sitorus S.A., Rahim R., 2019, The VIKOR Method to Support the Effectiveness of Decisions in Determining Work Incentive Recipients, *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*, nr 1175, DOI: 10.1088/1742-6596/1175/1/012043.
154. Messac A., 1996, Physical programming: effective optimization for computational design, *AIAA Journal*, nr 34, s. 149–158, DOI: 10.2514/3.13035.
155. Messac A., Puemi-Sukam C., Melachrinoudis E., 2001, Mathematical and pragmatic perspectives of physical programming, *AIAA Journal*, nr 39, s. 885–893, DOI: 10.2514/2.1392.
156. Messac A., Mattson C.A., 2002, Generating well-distributed sets of Pareto points for engineering design using physical programming, *Optimization Engineering*, nr 3, s. 431–450, DOI: 10.1023/A:1021179727569.

157. Messac A., Ismail-Yahaya A., Mattson C.A., 2003, The Normalized Normal Constraint Method for Generating the Pareto Frontier, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, nr 25, s. 86–98, DOI: 10.1007/s00158-002-0276-1.
158. Millogo Y., Morel J.C., Aubert J.E., Ghavami K., 2014, Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers, *Construction and Building Materials*, nr 52, s. 71–78, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094.
159. Min H., Storbeck J., 1991, On the origin and persistence of misconceptions in goal programming, *Journal of the Operational Research Society*, nr 42, s. 301–312. DOI: 10.1057/jors.1991.68.
160. Mohamed A.S.A., Ahmed M.S., Hassan A.A.M., Salah Hassan M., 2016, Performance evaluation of gauze packing for liquid desiccant dehumidification system, *Case Studies in Thermal Engineering*, nr 8, s. 260–276, DOI: 10.1016/j.csite.2016.08.005.
161. Morales M.P., Juarez M.C., Munoz P., Mendivil M.A., Ruiz J.A., 2014, Possibilities for improving the equivalent thermal transmittance of single-leaf wall for buildings, *Energy and Buildings*, nr 69, s. 473–480, DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.038.
162. Mounir S., Maaloufa Y., Cherki A., Khabbazi A., 2014, Thermal properties of the composite material clay/granular cork, *Construction and Building Materials*, nr 70, s. 183–190, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.108.
163. Muntohar A.S., 2011, Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick, *Construction and Building Materials*, nr 25, s. 4215–4220, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061.
164. Neofytou H., Sarafidis Y., Gkonis N., Mirasgedis S., Askounis D., 2020, Energy Efficiency contribution to sustainable development: A multi-criteria approach in Greece, *Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy*, nr 15, s. 572–604, DOI: 10.1080/15567249.2020.1849449.
165. Nesterov Y., Spokoiny V., 2015, Random gradient-free minimization of convex functions, *Foundations of Computational Mathematics*, nr 17, s. 527–566, DOI: 10.1007/s10208-015-9296-2.
166. Nocentini K., Achard P., Biwole P., Stipetic M., 2018, Hygro-thermal properties of silica aerogel blankets dried using microwave heating for building thermal insulation, *Energy and Buildings*, nr 158, s. 14–22, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.024.
167. Noie S.H., 2005, Heat characteristics of a two-phase closed thermosiphon, *Applied Thermal Engineering*, nr 25, s. 495–506, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.06.019.
168. Niu F., Yu Y., 2016, Location and optimization analysis of capillary tube network embedded in active tuning building wall, *Energy*, nr 97, s. 36–45, DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.094.
169. Odu G.O., Charles-Owaba O.E., 2013, Review of multi-criteria optimization methods—Theory and applications, *IOSR Journal of Engineering*, nr 10, s. 1–14, DOI: 10.9790/3021-031020114.
170. O’Flaherty F., Alam M., 2018, Thermal and sound insulation performance assessment of vacuum insulated composite insulation panels for building facades, *Advances in Building Energy Research*, nr 15, s. 270–290, DOI: 10.1080/17512549.2018.1520645.

171. Orzechowski T., Orzechowski M., 2017, Optimal thickness of various insulation materials for different temperature conditions and heat sources in terms of economic aspect, *Journal of Building Physics*, nr 41, s. 377–393, DOI: 10.1177/1744259117708733.
172. Ozguven A., Gunduz L., 2012, Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate, *Cement and Concrete Composites*, nr 34, s. 781–787, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007.
173. Papadopoulos A.M., 2005, State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, *Energy and Buildings*, nr 37, s. 77–86, DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
174. Parasonis J., Keizikas A., Kalibatiene D., 2011, The relationship between the shape of a building and its energy performance, *Architectural Engineering and Design Management*, nr 8, s. 246–256, DOI: 10.1080/17452007.2012.675139.
175. Paraschiv L.S., Acomi N., Serban A., Paraschiv S., 2020, A web application for analysis of heat transfer through building walls and calculation of optimal insulation thickness, *Energy Reports*, nr 6, s. 343–353, DOI: 10.1016/j.egyr.2020.08.055.
176. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T., 2007, Updated world map of Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, nr 11, s. 1633–1644, DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007.
177. Peri J., 1966, Infrared study of OH and NH₂ groups on the surface of a dry silica aerogel, *Journal of Physical Chemistry*, nr 70, s. 2937–2945, DOI: 10.1021/j100881a037.
178. Petranek V., Krivenko P., Petropavlovskiy O., Guzii S., 2014, Perlite concrete based on alkali-activated cements, *Advanced Materials Research*, nr 897, s. 280–283, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.897.280.
179. Poluloupatis P.D., Florides G., Tassou S., 2011, Measurements of ground temperatures in Cyprus for ground thermal applications, *Renewable Energy*, nr 36, s. 804–814, DOI: 10.1016/j.renene.2010.07.029.
180. Qian Q., Zhu S., Tang J., Jin R., Sun B., Li H., 2019, Robust optimization over multiple domains, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, nr 33, DOI: 10.48550/arXiv.1805.07588.
181. Rafique H., Liu M., Lin Q., Yang T., 2018, Non-Convex Min-Max Optimization: Provable Algorithms and Applications in Machine Learning, *arXiv: Optimization and Control*.
182. Rashad A.M., 2018, Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An Overview, *Construction and Building Materials*, nr 170, s. 757–775, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009.
183. Roberts R., Goodwin P., 2002, Weight approximations in multi-attribute decision models, *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, nr 11, s. 291–303, DOI: 10.1002/mcda.320.
184. Romero C., Tamiz M., Jones D.F., 1998, Goal programming, compromise programming and reference point method formulations: Linkages and utility interpretations, *Journal of the Operational Research Society*, nr 49, s. 986–991, DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600611.
185. Rossignolo J.A., Agnesini M.V.C., Morias J.A., 2003, Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates, *Cement and Concrete Composites*, nr 25, s. 77–82, DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00046-4.

186. Roulet C.A., Flourentzou F., Foradini F., Bluysen P., Cox C., Aizlewood C., 2006, Multicriteria analysis of health, comfort and energy efficiency in buildings, *Building Research & Information*, nr 34, s. 475–482, DOI: 10.1080/09613210600822402.
187. Saber H.H., Maref W., Sherrer G., Swinton M.C., 2011, Numerical modelling and experimental investigations of thermal performance of reflective insulations, *Journal of Building Physics*, nr 36, s. 163–177, DOI: 10.1177/1744259112444021.
188. Sajedi F., Shafigh P., 2012, High-strength lightweight concrete composites using LECA, silica fume, and limestone, *Arabian Journal for Science and Engineering*, nr 37, s. 77–82, DOI: 10.1007/s13369-012-0285-3.
189. Sanjabi M., Ba J., Razaviyayn M., Lee J.D., 2018, On the Convergence and Robustness of Training GANs with Regularized Optimal Transport, *Advances in Neural Information Processing Systems*, nr 31. S. 7091–7101.
190. Saraj M., Safaei N., 2012, Solving bi-level programming problems using global criterion method with an interval approach, *Applied Mathematical Sciences*, nr 6, s. 1135–1141.
191. Sattari S., Farhanieh B., 2006, A parametric study on radiant floor heating system performance, *Renewable Energy*, nr 31, s. 1617–1626, DOI: 10.1016/j.renene.2005.09.009.
192. Schmidt A.C., Jensen A.A., Clausen A.U., Kamstrup O., Postlethwaite D., 2004, A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool, and flax, *International Journal of Life Cycle Assessment*, nr 9, s. 122–129, <https://doi.org/10.1007/BF02978571>.
193. Shih C.J., Chang C.J., 1995, Pareto optimization of alternative global criterion method for fuzzy structural design, *Computers & Structures*, nr 54, s. 455–460, DOI: 10.1016/0045-7949(94)00341-Y.
194. Shin M.S., Rhee K.N., Ryu S.R., Yeo M.S., Kim K.W., 2015, Design of radiant floor heating panel in view of floor surface temperatures, *Buildings and Environment*, nr 92, s. 559–577, DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.05.006.
195. Seyam S., Huzayyin A., El-Batsh H., Nada S., 2014, Experimental and numerical investigation of the radiant panel heating system using scale room model, *Energy and Buildings*, nr 82, s. 130–141, DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.003.
196. Stadnik Ł., 2009, Analiza przydatności wybranych materiałów w budownictwie w sektorze produkcji żywności. Część I. Materiały termoizolacyjne, *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria*, nr 8, s. 9–23, DOI: 10.24326/aspta.2009.3-4.2.
197. Stanica D.I., Karasu A., Brandt D., Kriegel M., Brandt S., Steffan C., 2021, A methodology to support the decision-making process for energy retrofitting at district scale, *Energy and Buildings*, nr 238, s. 110842, DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110842.
198. Stevanović S., Pucar M., 2012, Investment appraisal of a small, grid-connected photovoltaic plant under the Serbian feed-in tariff framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 16, s. 1673–1682, DOI: 10.1016/j.rser.2011.11.036.
199. Steuer R.E., Choo E.-U., 1983, An interactive weighted Tchebycheff procedure for multiple objective programming, *Mathematical Programming*, nr 26, s. 326–344, DOI: 10.1007/BF02591870.

200. Suzer O., 2019, Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects, *Building and Environment*, nr 147, s. 158–170, DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.001.
201. Ślusarek J., 2007, Istota trwałości i utrzymania obiektów budowlanych, [w] *Fizyka Budowli w teorii i praktyce Tom II*, nr 2, s. 279-284, YADDA; bwmeta1.element.baztech-article-LOD6-0004-0073.
202. Thamilselvi P., Siva A., Oyejobi D., 2017, Geopolimer concrete: Overview, *International Journal of Advanced Research in Engineering Technology*, nr 8. s. 10-14.
203. Thosapon K., Kaumar S., 2008, Performance of solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system, *Energy and Buildings*, nr 40, s. 1252–1267, DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.11.005.
204. Topcu I.B., 1997, Semi-lightweight concretes produced by volcanic slag, *Cement & Concrete Research*, nr 27, s. 15–21, DOI: 10.1016/S0008-8846(96)00190-1.
205. Toure P.M., Sambou V., Faye M., Thiam A., 2017, Mechanical and thermal characterization of stabilized earth bricks, *Energy Procedia*, nr 139, s. 676–681, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.271.
206. Trewari P.H., Hunt A.J., Lofftus K.D., 1985, Ambient-temperature supercritical drying of transparent silica aerogel, *Materials Letters*, nr 3, s. 363–367, DOI: 10.1016/0167-577X(85)90077-1.
207. Triantaphyllou B., Shu S., Nieto Sanchez R., Ray T., 1998, Multi-criteria Decision Making: An Operations Research Approach, w: *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (J.G. Webster, red.), John Wiley & Sons, New York, NY, nr 15, s. 175–186.
208. Turskis Z., Zavadskas E., Peldschus F., 2009, Multi-criteria Optimization System for Decision Making in Construction Design and Management, *Economics of Engineering Decisions*, nr 61, s. 7–17.
209. Tye-Gingras M., Gosselin L., 2011, Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine, *Energy and Buildings*, 43, 1598-1608, DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.03.004.
210. Tzeng G.H., Chen T.Y., Wang J.C., 1998, A weight-assessing method with habitual domains, *European Journal of Operational Research*, nr 110, s. 342–367, DOI: 10.1016/S0377-2217(97)00246-4.
211. Umarusman N., Turkmen A., 2013, Building Optimum Production Settings using De Novo Programming with Global Criterion, *International Journal of Computer Applications*, nr 82, s. 12–15, DOI: 10.5120/14262-2359.
212. Veldhuizen V., Lamont G.B., 1998, Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis, Technical Report TR-98-03, Department of Electrical and Computer Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base.
213. Verma M.K., Shrivastava R.K., Tripathi R.K., 2010, Evaluation of Min–Max, Weighted and Preemptive Goal Programming Techniques with Reference to Mahanadi Reservoir Project Complex, *Water Resources Management*, nr 24, s. 299–319, DOI: 10.1007/s11269-009-9447-9.

214. Wald A., 1945, Statistical decision functions which minimize the maximum risk, *Annals of Mathematics*, 46(2), s. 265–280.
215. Wegian F.M., 2012, Strength properties of lightweight concrete made with LECA grading, *Australian Journal of Civil Engineering*, nr 10, s. 11–22, DOI: 10.7158/C10-668.2012.10.1.
216. Widsten P., Kandelbauer A., 2014, Industrial scale evaluation of cationic tannin as a binder for hardboard, *Journal of Adhesion Science and Technology*, nr 28, s. 1256–1263, DOI: 10.1080/01694243.2014.896068.
217. Woltman G., Noel M., Fam A., 2017, Experimental and numerical investigations of thermal properties of insulated concrete sandwich panels with fiberglass shear connectors, *Energy and Buildings*, nr 145, s. 22–31, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.007.
218. Xie T., He Y.L., Hu Z.J., 2013, Theoretical study on thermal conductivities of silica aerogel composite insulating material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, nr 58, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.016.
219. Xing G., Yu J., Zhang C., Wu J., 2018, A new energy-efficient building system based on insulated concrete perforated brick with a sandwich, *Civil Engineering Journal*, nr 4, s. 1497–1476, DOI: 10.28991/cej-0309187.
220. Yang R., Ng C.S., Chong K.L., Verzicco R., Lohse D., 2021, Optimal ventilation rate for effective displacement ventilation, *arXiv*, DOI: 10.48550/arXiv.2104.03363.
221. Yarbrough D.W., 2010, Reflective materials and radiant barriers for insulation in buildings, [w:] *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, red. Hall M.R., Woodhead Publishing Series in Energy, nr 14, CRC Press, Nowy Jork, s. 305–318, DOI: 10.1533/9781845699277.2.305.
222. Youssf O., Hassanli R., Mills J.E., Elrahman M.A., 2018, An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete, *Construction and Building Materials*, nr 175, s. 239–253, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.184.
223. Yu P.L., 1973, A class of solutions for group decision problems, *Management Science*, 19(8), s. 936–946.
224. Yufeng Z., Bin H., Hui X., Liu T., 2007, Thermal Performance of Thermosyphon-Embedded Floor Heating. *J. Tianjin Univ.*, nr 40, s. 1209–1214.
225. Zadeh L.A., 1963, Optimality and non-scalar-valued performance criteria, *IEEE Transactions on Automatic Control*, nr 8, s. 59–60, DOI: 10.1109/TAC.1963.1105511.
226. Zeng Q., Mao T., Li H., Peng Y., 2018, Thermally insulating lightweight cement-based composites incorporating glass beads and nano-silica aerogels for sustainably energy-saving buildings, *Energy and Buildings*, nr 174, s. 97–110, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.06.031.
227. Zengrui. L., Zhigang. Z., 2018, Dynamic heat transfer characteristics of wall implanted with heat pipes in summer, *Energy and Buildings*, nr 170, s. 40–46, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.071.
228. Zhang Q., Zeng Q., Zheng D., Wang J., Xu S., 2018, Oven drying kinetics and status of cement-based porous materials for in-lab microstructure investigation, *Advances in Cement Research*, nr 30, s. 204–215, DOI: 10.1680/jadcr.17.00075.

229. Zhang J., Xu L., Shabunko V., Tay S.E.R., Sun H., Lau S.S.Y., Reindl T., 2019, Impact of block typology on building solar potential and energy use efficiency in tropical high-density city, *Applied Energy*, nr 240, s. 513–533, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.033.
230. Zhao J., Du Y., 2020, Multi-Objective Optimization Design for Windows and Shading Configuration Considering Energy Consumption and Thermal Comfort: A Case Study for Office Buildings in Different Climatic Regions of China, *Solar Energy*, nr 206, s. 997–1017, DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.090.
231. Zhung Z., Sun Z., Duan C., 2014, A new type of passive solar energy utilization technology – The wall implanted with heat pipes, *Energy and Buildings*, nr 84, s. 111–116, DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.08.016.
232. Zitzler E., Thiele L., 1999, Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, nr 3, s. 257–271, DOI: 10.1109/4235.797969.
233. Żukowski M., Haese G., 2010, Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation, *Energy and Buildings*, nr 42, s. 1402–1410, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.009.
234. Żukowski M., 2011, Wykorzystanie pustaków szczelinowych wypełnionych ekspandowanym perlitem w technologiach energooszczędnych, *Materiały Ceramiczne*, nr 63, s. 195–200.
235. Życzyńska A., Dyś G., 2016, Wpływ zysków ciepła od promieniowania słonecznego na wartość wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej w budynku, *Fizyka Budowli w teorii i praktyce*, TOM VIII, Nr 1, s. 45-52, YADDA: bwmeta1.element.baztech-3baaf430-1a03-4ce2-b905-baab5d0b98fb.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

236. Das I., 1999, An Improved Technique for Choosing Parameters for Pareto Surface Generation Using Normal-Boundary Intersection, materiały III Światowego Kongresu Optymalizacji Strukturalnej i Wielokryterialnej (ISSMO/UBCAD/AIASA), Dallas, Texas, USA.
237. Dachert K., Gorski J., Klamroth K., 2010, An Adaptive Augmented Weighted Tchebycheff Method to Solve Discrete, Integer-Valued Bicriteria Optimization Problem, materiały Międzynarodowej Konferencji Optymalizacji i Decyzji (International Conference on Optimization and Decision Science).
238. Desarnaulds V., Costanzo E., Carvalho A., Arlund B., 2005, Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials, materiały XII Międzynarodowego Kongresu Dźwięku i Wibracji (ICSV12), Lizbona, Portugalia, s. 1-10.
239. Inteligentny budynek. Integracja systemów, 1993, materiały IV Międzynarodowej Konferencji, 12-13 maja, Wrocław, Wyd. Inteligentny Budynek Integracja Systemów Sp. z o.o.
240. Jones G., Bouamane L., 2012, Power from Sunshine: A Business History of Solar Energy, materiały Harvard Business School Working Paper, Boston, MA, USA, s. 12-105.

241. Gidel G., Jebara T., Lacoste-Julien S., 2017, Frank-Wolfe Algorithms for Saddle Point Problems, materiały XX Międzynarodowej Konferencji o Sztucznej Inteligencji i Statystyce, tom 54, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.07797>.
242. Kapeluszna E., Kotwica Ł., Pichór W., Nozuń-Wczelik W., 2016, Cementy powszechnego użytku z dodatkiem mielonego odpadu perlitu ekspandowanego, materiały Konferencji Dni Betonu, Wisła, Polska.
243. Kogar E., Sobh T., 2008, A Preemptive Goal Programming Model for the Sustainability of Growth in Engineering Colleges, materiały Konferencji American Society of Engineering Education, West Point, Nowy Jork, DOI: 10.18260/1-2-1153-50340.
244. Laouadi A., 2004, Development of Radiant Heating and Cooling Model for Building Energy Simulation Software, materiały Międzynarodowej Konferencji o Budynkach i Środowisku.
245. Liu S., Lu S., Chen X., Feng Y., Xu K., Al-Dujaili A., Hong M., O'Reilly U.M., 2020, Min-Max Optimization without Gradients: Convergence and Applications to Black-Box Evasion and Poisoning Attacks, materiały XXXVII Międzynarodowej Konferencji o Uczeniu Maszynowym, PMLR, tom 119, s. 6282-6293.
246. Piotrowski J.Z., Orman Ł., Lucas X., Zender-Swiercz E., Telejko M., Koruba D., 2014, Tests of Thermal Resistance of Simulated Walls with the Reflective Insulation, materiały EPJ Web of Conferences, tom 67, DOI: 10.1051/epjconf/20146702095.
247. Roulet C.A., Flourentzou F., Foradini F., Bluysen P., Cox C., Aizlewood C., 2006, Multicriteria Analysis of Health, Comfort and Energy Efficiency in Buildings, materiały Konferencji Building Research & Information, tom 34, s. 475-482, DOI: 10.1080/09613210600822402.
248. Salonvaara M., Pazera M., Karagiozis A., 2010, Impact of Weather on Predicting Drying Characteristics of Spray-Applied Cellulose Insulation, Materiały Konferencji ASHRAE Buildings XI.
249. Tiainen T., Laasonen M., Heinisuo M., Mela K., Salminen M., Jokinen T., 2012, Multi-criteria optimization of buildings, materiały Seminarium METNET 2012, Izmir.
250. Tzeng G.H., Chen T.Y., Wang J.C., 1998, A Weight-Assessing Method with Habitual Domains, materiały Europejskiej Konferencji o Badaniach Operacyjnych, nr 110, s. 342-367, doi: 10.1016/S0377-2217(97)00246-4.
251. Woltman G., Noel M., Fam A., 2017, Experimental and Numerical Investigations of Thermal Properties of Insulated Concrete Sandwich Panels with Fiberglass Shear Connectors, materiały Konferencji Energy & Buildings, nr 145, s. 22-31, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.007.

Dyrektywy, Ustawy, Rozporządzenia

252. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 w sprawie charakterystyki energetycznej budynków. Off. J. Eur. Union 18 czerwca 2010, <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2010/31/annexes?view=plain#> (dostęp: 1.11.2022).
253. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/958 z dnia 10 maja 2023 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE w odniesieniu do wkładu lotnictwa w unijny cel zmniejszenia emisji w całej gospodarce i odpowiedniego wdrożenia globalnego środka

- rynkowego Off. J. Eur. Union 16 maja 2023, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0958> (dostęp: 12.07.2023).
254. Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20030800717> (dostęp: 14.07.2023).
255. Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późniejszymi zmianami), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20020750690> (dostęp: 1.11.2022).
256. Energieeinsparverordnung (EnEV) z dnia 1.02.2002 r., Deutschland.
257. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej. (Dz.U. 2015 poz. 376), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150000376> (dostęp: 1.11.2022).
258. Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach. (Dz. U. 2021 poz. 276), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210002276> (dostęp: 1.11.2022).

Normy, Patenty, Raporty z Badań

259. The Durability of Mineral Wool Products. Eurima – European Insulation Manufacturers Association, Brussels, Belgium, November 2016. <https://www.eurima.org/benefits-of-mineral-wool-insulation> (dostęp: 23.10.2022).
260. Tsekova T.P., Kotsev A.C., Wasiliew W.G., Kirow J.K. Instytut Zapasów i Racjonalizacji Republiki Bułgarii, Patent B.G. 50549A, Beton perlitowy, 10.11.1989.
261. CIMA, CIMA Technical Bulletin #2 Standard Practice for Installing Cellulose Building Insulation, 1998)₁
262. CIMA, CIMA Technical Bulletin #3 Standard Practice for Installation of Sprayed Cellulosic Wall Cavity Insulation, 1998)₂
263. CSA S478-1995 Guideline on Durability in Buildings. Canadian Standards Authority, Ottawa, Canada 1995.
264. Grove-Rasmussen, Svend, and Lars H Elmekilde. Stone Wool. USA Patent 5866486. February 2, 1999.
265. NF EN 15101-1(2014) Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment - Isolation thermique formée en place à base de cellulose (LFCI) - Partie 1: spécification des produits en vrac avant la mise en oeuvre.
266. Ningxia Yifeng Industry Companies, Agencja patentowa Beijing Licheng Zhiye Agencja ds. Patentów Instytut, Perlitowy beton piaskowy, 01.08.2018.
267. PN - B - 12069:1998 z Az1:2002 - Wyroby budowlane ceramiczne - Cegły, pustaki, elementy poryzowane, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2002.
268. PN-82/B-02403:1982 - Ogrzewnictwo - Temperatuty obliczeniowe zewnętrzne, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 1982.

269. PN-EN 12831-1:2017-08 - Charakterystyka energetyczna budynków – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego – Część 1: Obciążenie cieplne, Moduł M3-3. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2017.
270. PN-EN 1991-1-3:2005 - Eurokod 1 - Oddziaływania na konstrukcje - Część 1-3: Oddziaływania ogólne - Obciążenie śniegiem, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2005.
271. PN-EN 1991-1-4:2008/A1:2010 - Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne - Oddziaływania wiatru, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2010.
272. PN EN ISO 6946:2017; Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metody obliczania, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2017.
273. PN EN ISO 52016-1:2016; Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne - Część 1: Procedury obliczania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2016.
274. PN-EN 15193-1+A1:2021-09 - Efektywność energetyczna budynków - Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia - Część 1: Specyfikacje, Moduł M9. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2017.
275. Reflective Insulation Manufacturers Association International (RIMA-I), Reflective Insulation, Radiant Barriers and Radiation Control Coatings, Olathe, KS: RIMA-I., United States of America, 2002,
276. PN EN 1990: 2004 Eurokod - Podstawy projektowania konstrukcji, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2004.
277. PN-ISO 15686-1. 2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 1: Zasady ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2005.
278. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2021.
279. PN-EN ISO 14683 - 2008 - Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska, 2008.

Strony internetowe

280. Eno E., 2014, Effects of high groundwater on the stability of buildings and how to control these effects, https://www.academia.edu/27091028/EFFECTS_OF_HIGH_GROUND_WATER_ON_THE_STABILITY_OF_BUILDINGS_AND_HOW_TO_CONTROL_THESE_EFFECTS (dostęp: 20.03.2019)
281. Instrukcja wewnętrzna dotycząca zasad ustalania stopnia zużycia technicznego budynków i budowli oraz mienia ruchomego; DEPARTAMENT UBEZPIECZEŃ BIURA ZARZĄDU InterRisk Towarzystwo Ubezpieczeń Spółka Akcyjna Vienna Insurance Group, Warszawa, listopad 2008 r., <https://docer.pl/doc/8xcxne> (dostęp: 08.09.2024)
282. Rocznik Meteorologiczny 2020. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, Polska.

- https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202020.pdf (dostęp: 07.11.2021).
283. Trwałość produktów z wełny mineralnej. Eurima — European Insulation Manufacturers Association, Bruksela, Belgia, listopad 2016. <https://www.eurima.org/benefits-of-mineral-wool-insulation> (dostęp: 23.10.2022).
284. Urząd Regulacji Energetyki, <https://www.ure.gov.pl/pl/energia-elektryczna/ceny-wskazniki/7852,Srednia-cena-sprzedazy-energii-elektrycznej-na-ryнку-konkurencyjnym-roczna-i-kwa.html> (dostęp: 09.11.2023)
285. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2023, KOBiZE, Warszawa, 2022, https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/monitorowanie_raportowanie_weryfikacja_emisji_w_eu_ets/WO_i_WE_do_monitorowania-ETS-2023.pdf (dostęp: 12.07.2023)
286. Zestawienie wzorów i wskaźników emisji substancji zanieczyszczających wprowadzanych do powietrza. WFOŚiGW Poznań, 2018, <https://www.wfosgw.poznan.pl/wp-content/uploads/2018/01/Definicja-i-wzór-efektu-OA-2018.pdf> (dostęp: 12.07.2023)

Streszczenie rozprawy doktorskiej
WIELOKRYTERIALNA METODA WYZNACZANIA GLOBALNEGO WSKAŹNIKA
ENERGOCHŁONNOŚCI BUDYNKÓW

Autor: mgr inż. Aleksandra Stachera

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

Promotor pomocniczy: dr inż. Mariusz Owczarek

Tematyka rozprawy dotyczy badania wpływu rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych na energochłonność budynków.

W pracy przedstawiono opracowanie wielokryterialnej metody umożliwiającej wybór optymalnej kombinacji składników wpływających na efektywność energetyczną budynków za pomocą globalnego wskaźnika energochłonności budynku.

W metodzie zostały wykorzystane kryteria: względne roczne zapotrzebowanie na energię końcową, koszt, trwałość, czas zwrotu nakładu inwestycyjnego (dla budynków modernizowanych) lub liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych (dla budynków projektowanych) oraz emisyjność dwutlenku węgla. Wartości tych kryteriów obliczane są w odniesieniu do konstrukcji obiektu referencyjnego lub bazowego, a wartości wag przypisanych poszczególnym kryteriom przyjmowane są na podstawie przedstawionych procedur doboru wag.

W rozprawie opracowano dwa sposoby wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności: hybrydowy i bezpośredni. Sposób hybrydowy, oparty na szczegółowej analizie poszczególnych składników (materiałowych, konstrukcyjnych, instalacyjnych) wpływających na energochłonność budynku, pozwala na precyzyjną, połączoną analizę wielokryterialną właściwości składników, ich optymalny wybór w celu konfigurowania wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych oraz ocenę tych wariantów. Sposób bezpośredni koncentruje się na ocenie i optymalnym wyborze wariantów rozwiązań, pomijając szczegółową analizę elementów składowych.

Weryfikację metody przeprowadzono na podstawie studiów przypadków, obejmujących zarówno modernizację istniejącego budynku, jak i projektowanie nowego obiektu.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa, bazująca na prezentowanej metodzie, wykazała wysoką skuteczność w kontekście modernizacji budynków, a także pozwoliła na szczegółową ocenę wpływu zmian wag kryteriów na globalny wskaźnik energochłonności. Wyniki analizy pozwoliły na sformułowanie rekomendacji wyznaczania globalnego wskaźnika

energochłonności przy złożeniu jednakowych wartości wag kryterialnych w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania modernizacyjnego.

Obliczenia na podstawie wielokryterialnej metody wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności sposobem hybrydowym dla budynku nowoprojektowanego, przeprowadzono przy założeniu jednakowych wag dla wszystkich kryteriów. Wyniki tych obliczeń umożliwiły ocenę energochłonności nowego obiektu w kontekście różnych kombinacji składników. Przyjęcie jednakowych wag kryterialnych pozwoliło na uzyskanie miarodajnej oceny, niemniej jednak wyniki te stanowiły punkt wyjścia do dalszej analizy, w której wagi kryterialne mogą być dostosowywane do konkretnych wymagań użytkownika lub specyfiki projektu. Przeprowadzono analizę wpływu zmiennych wag kryterialnych w funkcji redystrybucji wartości wskaźników kryteriów, a także analizę wpływu zmiany budynku bazowego. Wyniki tych analiz pozwoliły na potwierdzenie rekomendacji wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności przy złożeniu jednakowych wartości wag kryterialnych w celu wskazania najlepszego wariantu rozwiązania nowoprojektowanego.

Dla budynku nowoprojektowanego przeprowadzono również obliczenia sposobem bezpośrednim. Wyniki tych obliczeń umożliwiły ocenę energochłonności budynku w kontekście stosowania różnych wariantów rozwiązań. Przyjęcie jednakowych wag dla wszystkich kryteriów pozwoliło na uzyskanie wyników analizy zgodnych z wynikami rozwiązań przeprowadzonych sposobem hybrydowym.

Proponowana metoda może być rozwijana w kierunku zmiany liczby i rodzajów kryteriów analizy, badania wpływu zmian stopnia ważności poszczególnych kryteriów analizy, czy też w odniesieniu do zastosowania różnych rodzajów budynków. Dalszy rozwój tej metody może przyczynić się do bardziej precyzyjnej optymalizacji energetycznej obiektów budowlanych, odpowiadając na rosnące potrzeby zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Proponowana metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków pozwala na połączenie obu sposobów: hybrydowego i bezpośredniego w trakcie trwania różnych faz procedury projektowej przy bardzo skomplikowanych budynkach. W fazie koncepcyjnej można zastosować sposób bezpośredni, który pozwoli na szybką selekcję planowanych wariantów rozwiązań materiałowo-konstrukcyjno-instalacyjnych, aby następnie w fazie wykonawczej zastosować sposób hybrydowy w celu optymalizacji składników wybranych wariantów rozwiązań.

Porównanie sposobu hybrydowego i bezpośredniego w kontekście wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków uwidacznia istotne różnice w podejściu, dokładności oraz praktycznym zastosowaniu obu metod. Obydwa sposoby służą minimalizacji

wskaźnika energochłonności, ale różnią się stopniem szczegółowości oraz wymaganiami dotyczącymi danych wejściowych. Sposób hybrydowy, dzięki swojej złożoności, jest przydatny w projektach wymagających pełnej optymalizacji, np. w budynkach zeroenergetycznych, w których każdy składnik ma istotny wpływ na końcowy wynik. Z kolei, sposób bezpośredni sprawdza się w sytuacjach, w których priorytetem jest szybka ocena gotowych koncepcji wariantowych.

Na podstawie wyników realizacji pracy możliwe jest wskazanie istotnych cech proponowanej metody rozwiązania: (1) zastosowanie wielokryterialnej metody analizy energochłonności budynków powiększa zakres dotychczasowej praktyki wyboru wariantu rozwiązania budynku energooszczędnego polegający na bezpośrednim porównaniu poszczególnych wariantów rozwiązań użytych oddzielnie pod względem zapotrzebowania na energię końcową, kosztu wykonania oraz – w przypadku modernizacji – okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych; (2) propozycja globalnego wskaźnika energochłonności budynku wskazującego najlepsze rozwiązanie stanowi nowe podejście do oceny rozwiązania budynku energooszczędnego polegające na uwzględnieniu ważonego udziału wielu kryteriów w tej ocenie; (3) wprowadzenie nowego parametru efektywności ekonomicznej dla budynków nowoprojektowanych – liczby cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych, umożliwia zróżnicowanie podejścia do oceny budynków modernizowanych i projektowanych. Dotychczas czas zwrotu nakładów inwestycyjnych określano tylko dla prac modernizacyjnych budynku, a w przypadku budynków projektowanych nie opracowano podobnego sposobu weryfikacji opłacalności nowych inwestycji; (4) rekomendacja stosowania metody przy uwzględnieniu jednakowych wag kryterialnych zapewnia efektywne określenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku; (5) propozycja klas energochłonności wariantów rozwiązań modernizacyjnych lub projektowych umożliwia klasyfikację wariantów i ułatwia wybór optymalnego wariantu rozwiązania budynku; (6) uniwersalny charakter metody nie zakłada żadnych ograniczeń co do typu budynku, możliwości uwzględnienia specyficznych wymagań dotyczących regionu lokalizacji budynku i uwzględnienia innych kryteriów analizy.

Otrzymane wyniki analizy studiów przypadków modernizowanego budynku referencyjnego oraz nowoprojektowanego budynku bazowego wskazują na wysoką skuteczność opracowanej metody. Proponowana metoda umożliwia wyraźne wskazanie rozwiązania najbardziej korzystnego, z zastrzeżeniem, że ostateczna decyzja dokonania wyboru wariantu rozwiązania może pozostawać w gestii użytkownika.

Proponowana metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków charakteryzuje się dużym potencjałem rozwojowym. Analizy przeprowadzone w ramach

niniejszej pracy wykazały, że opracowana metoda doboru wag kryteriów decyzyjnych za pomocą wprowadzonego współczynnika wpływu wartości wskaźnika kryterium na wartość wagi wymaga dalszego doskonalenia. Zmiana wag kryterialnych, w zależności od specyfiki badanego obiektu, może znacząco wpłynąć na ostateczny wybór optymalnej kombinacji składników budynku. W związku z tym, dalsze badania nad bardziej zaawansowanymi metodami doboru wag kryterialnych, np. opartymi na dynamicznym modelowaniu preferencji lub algorytmach uczących się, mogą przyczynić się do dalszego rozwoju prezentowanej metody.

Metoda optymalizacji wielokryterialnej, oparta na uwzględnieniu różnych kryteriów, takich jak zapotrzebowanie na energię, koszt, trwałość, czas zwrotu inwestycji lub liczba cykli zrównoważenia nakładów inwestycyjnych oraz emisja dwutlenku węgla, stanowi skuteczne narzędzie wspierające projektowanie budynków pod względem efektywności energetycznej. Wdrożenie opracowanej metody w praktyce inżynierskiej będzie możliwe po utworzeniu ogólnie dostępnych baz danych, które umożliwią aktualizowanie informacji na temat materiałów budowlanych, kosztów oraz parametrów energetycznych. Istotnym krokiem w implementacji metody będzie zintegrowanie proponowanych narzędzi analitycznych z istniejącymi systemami oprogramowania wykorzystywanymi w projektowaniu budynków, co pozwoli na łatwiejsze wykorzystanie tej metody.

Summary of Doctoral Dissertation
MULTI-CRITERIA METHOD FOR DETERMINING THE GLOBAL ENERGY
CONSUMPTION INDICATOR OF BUILDINGS

Author: mgr inż. Aleksandra Stachera

Promoter: prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

Auxiliary promoter: dr inż. Mariusz Owczarek

The subject of the dissertation concerns the study of the impact of material-construction-installation solutions on the energy consumption of buildings.

This work presents the development of a multi-criteria method enabling the selection of the optimal combination of components influencing the energy efficiency of buildings using the global building energy consumption indicator.

The criteria used in the method include: the relative annual final energy demand, cost, durability, investment payback time (for modernized buildings) or the number of cycles to balance investment cost (for designed buildings) and carbon dioxide emissions. The values of these criteria are calculated with respect to the structure of the reference or base object, and the values of the weights assigned to the individual criteria are adopted based on the presented weight selection procedures.

In this dissertation two ways of determining the global building energy consumption indicator were developed, i.e. hybrid and direct. The hybrid way, based on a detailed analysis of individual components (material, structural, installation) affecting the energy consumption of the building, allows for a precise, combined multi-criteria analysis of the properties of the components, their optimal selection in order to configure variants of modernization or design solutions and the evaluation of these variants. The direct way focuses on the evaluation and optimal selection of solution variants, omitting a detailed analysis of the components.

The method was verified based on case studies covering both the modernization of an existing building and the design of a new facility.

The conducted computational analysis, based on the presented method, showed high effectiveness in the context of building modernization, and allowed for a detailed assessment of the impact of changes in criteria weights on the global building energy consumption indicator. The results of the analysis allowed for the formulation of recommendations for determining the global building energy consumption indicator with the assumption of identical values of criteria weights in order to indicate the best variant of the modernization solution.

Calculations based on the multi-criteria method of determining the global building energy consumption indicator using the hybrid way for a newly designed building were carried out assuming identical weights for all criteria. The results of these calculations allowed for the assessment of the energy consumption of the new facility in the context of various combinations of components. The adoption of identical criterion weights allowed for obtaining a reliable assessment, however, these results were the starting point for further analysis, in which the criterion weights can be adjusted to specific user requirements or project specifics. An analysis of the impact of variable criterion weights in the function of redistribution of the criteria indicator values was carried out, as well as an analysis of the impact of changing the base building. The results of these analyses confirmed the recommendation to determine the global building energy consumption indicator with the assumption of identical criteria weight values in order to indicate the best variant of the newly designed solution.

For the newly designed building, calculations were also carried out using the direct way. The results of these calculations allowed for the assessment of the building's energy consumption in the context of using different variants of solutions. The adoption of identical weights for all criteria allowed for obtaining analysis results consistent with the results of solutions performed using the hybrid way.

The proposed method can be developed in the direction of changing the number and types of analysis criteria, to study the impact of changes in the degree of importance of individual analysis criteria, or in relation to the use of different types of buildings. Further development of this method can contribute to more precise energy optimization of buildings, responding to the growing needs of sustainable development in construction.

The proposed method for determining the global building energy consumption indicator of buildings allows for combining both hybrid and direct way during various phases of the design procedure for very complex buildings. In the conceptual phase, the direct way can be used, which will allow for a quick selection of planned variants of material-construction-installation solutions, and then in the implementation phase, the hybrid method can be used to optimize the components of the selected solution variants.

A comparison of the hybrid and direct ways in the context of determining the global building energy consumption indicator of buildings highlights significant differences in the approach, accuracy, and practical application of both ways. Both ways serve to minimize the energy consumption indicator, but they differ in the level of detail and requirements for input data. The hybrid way, due to its complexity, is useful in projects requiring full optimization, e.g. in zero-energy buildings, in which each component has a significant impact on the final

result. In turn, the direct way works well in situations where the priority is to quickly evaluate ready-made variant concepts.

Based on the results of the work, it is possible to indicate the essential features of the proposed solution method: (1) the use of a multi-criteria method for the analysis of energy consumption of buildings extends the scope of the current practice of selecting a variant of an energy-efficient building solution, consisting in a direct comparison of individual variants of solutions used separately in terms of final energy demand, cost of execution and – in the case of modernization – the payback period of investment outlays; (2) the proposal of a global building energy consumption indicator indicating the best solution is a new approach to the assessment of an energy-efficient building solution, consisting in taking into account the weighted share of many criteria in this assessment; (3) the introduction of a new economic efficiency parameter for newly designed buildings – the number of cycles to balance investment cost, allows for a differentiation of the approach to the assessment of modernized and designed buildings. So far, the payback period of investment outlays has been determined only for building modernization works, and in the case of designed buildings, no similar method for verifying the profitability of new investments has been developed; (4) the recommendation to use the method with identical criterion weights ensures an effective determination of the global building energy consumption indicator; (5) the proposal of energy consumption classes for variants of modernization or design solutions enables the classification of variants and facilitates the selection of the optimal variant of the building solution; (6) the universal nature of the method does not assume any limitations as to the type of building, the possibility of taking into account specific requirements concerning the region of the building location and taking into account other analysis criteria.

The obtained results of the analysis of case studies of the modernized reference building and the newly designed base building indicate the high effectiveness of the developed method. The proposed method allows for a clear indication of the most beneficial solution, with the reservation that the final decision on the selection of the solution variant may remain at the user's discretion.

The proposed method for determining the global building energy consumption indicator of buildings has a large development potential. The analyses conducted in the work shown that the developed method of selecting the weights of decision criteria using the introduced coefficient of the impact of the criterion indicator value on the value of the weights requires further improvement. Changing the criteria weights, depending on the specifics of the examined object, can significantly affect the final selection of the optimal combination of building

components. Therefore, further research on more advanced methods for selecting criterion weights, e.g. based on dynamic preference modeling or learning algorithms, can contribute to the further development of the presented method.

The multi-criteria optimization method, based on taking into account various criteria such as the relative annual final energy demand, cost, durability, investment payback time or the number of cycles to balance investment cost and carbon dioxide emission, is an effective tool supporting the design of buildings in terms of energy efficiency. The implementation of the developed method in engineering practice will be possible after the creation of generally available databases that will allow for updating information on building materials, costs, and energy parameters. An important step in the implementation of the method will be the integration of the proposed analytical tools with existing software systems used in building design, which will allow for easier use of this method.