

Analiza wpływu rozwiązań materiałowych przegród zewnętrznych budynków nZEB na poziom emisji CO₂

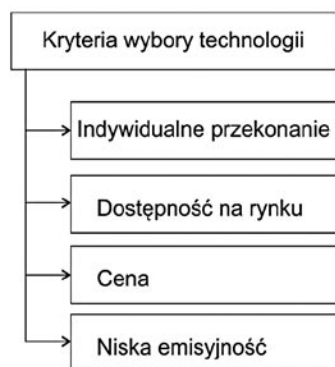
dr inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak, Politechnika Krakowska,
 dr inż. hab. Agnieszka Leśniak, prof. uczelni, Politechnika Krakowska,
 dr hab. inż. Przemysław Markiewicz-Zahorski, prof. uczelni, Politechnika Krakowska,
 dr hab. inż. arch. Arkadiusz Węglarz, prof. uczelni, Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

Upowszechnienie budownictwa niskoemisyjnego jest jednym z najbardziej pożądanych i skutecznych rozwiązań i bezwzględnie musi zdominować współczesny rynek budowlany. Bardzo potrzebne są badania naukowe dotyczące problematyki budownictwa niskoemisyjnego. Są one niezbędne dla stworzenia naukowo-teoretycznej, obiektywnej bazy wiedzy, która będzie służyła projektantom i wykonawcom budynków. Niniejsza praca przedstawia analizę porównawczą typowych rozwiązań technologiczno-materiałowych dla sektora mieszkalnego budownictwa wielorodzinnego w Polsce, przeprowadzaną pod kątem śladu węglowego i jak najniższej emisyjności. Przeprowadzone badania mają stanowić punkt odniesienia dla środowisk akademickich, biur projektowych, przemysłu budowlanego i deweloperów, umożliwiając weryfikację powszechnie stosowanych standardów architektoniczno-budowlanych i technologiczno-materiałowych oraz służyć ukierunkowaniu dalszych badań.

Ze względu na coraz bardziej odczuwalne globalne zmiany klimatyczne redukcja emisji dwutlenku węgla stała się krytycznym zagadnieniem dla przemysłu budowlanego. Budownictwo niskoemisyjne zostało uznane jako cel strategiczny, z ogromnym potencjałem redukcji emisji CO₂ [1]. W ciągu ostatnich dwóch dekad bezwzględna konieczność wprowadzenia zasad zrównoważonego rozwoju ze względu na postępujące zmiany klimatyczne była często kwestionowana [2]. Obecnie, dzięki jednoznacznym badaniom, powszechnie wiadomo, że gazy cieplarniane, zwłaszcza dwutlenek węgla, są główną przyczyną globalnego ocieplenia spowodowanego działalnością człowieka [3]. W związku z tym rozwój niskoemisyjnej gospodarki światowej stał się zasadniczym priorytetem, który ma powstrzymać konsekwencje dotychczasowego sposobu prowadzenia działalności gospodarczej („business-as-usual”) [4]. Prowadzone badania wykazały, że jednym z głównych sprawców emisji dwutlenku węgla jest sektor budowlany, który wyprzedza sektor transportu i sektor przemysłu. Budynki i budownictwo odpowiadają łącznie za 36% końcowego zużycia energii na świecie i 39% emisji CO₂ związanych z energią w 2015 roku [5]. Sektor budowlany od wielu lat podejmuje wysiłki na rzecz ograniczenia emisji dwutlenku węgla.

Jednak aby sprostać międzynarodowym oczekiwaniom, trzeba przejść jeszcze długą drogę [6]. Biorąc pod uwagę dużą ilość nowego budownictwa każdego roku, konieczne jest znaczne zwiększenie udziału budynków niskoemisyjnych (LCBs). Korzyści płynące z LCB w porównaniu z budynkami konwencjonalnymi są dobrze znane [7]. Można je uogólnić jako potrójną strukturę, obejmującą środowisko, społeczeństwo i gospodarkę. Na poziomie środowiskowym wykazano, że LCB mogą wykazać 25% spadek emisji pod względem redukcji CO₂ w cyklu życia na jednostkę powierzchni. W przypadku dalszego rozwoju różnorodnych technologii produkcji i łańcuchów dostaw niskoemisyjnych materiałów budowlanych emisje dwutlenku węgla uległyby znacznemu zmniejszeniu [8]. Na poziomie społecznym lokatorzy budynków LCB wykazują wysoki poziom zadowolenia i dobrego samopoczucia. W kontekście zrównoważonego rozwoju ocena cyklu życia poszczególnych komponentów budynków, a także całych budynków, staje się coraz ważniejsza, aby wziąć pod uwagę całkowite zużycie energii, począwszy od produkcji materiałów budowlanych i budowy, poprzez fazę eksploatacyjną aż do rozbiórki [9]. Największa część zużycia energii w budynkach jest przypisana fazie eksploatacji, na którą wpływa kilka czynników. W artykule autorzy szukają odpowiedzi, jak poszczególne elementy i technologie budynku wpływają na emisyjność w skali całego budynku. Jest to problem istotny z punktu widzenia doboru technologii na etapie projektowania. Projektant dokonuje wyboru materiałów i technologii na etapie tworzenia koncepcji budynku w oparciu o różne kryteria (rys. 1). Najczęściej jest to kryterium najkorzystniejszej ceny, często pokrywające się z oczekiwaniami inwestora. Stosunkowo często wybór ten spowodowany jest również dostępnością danej technologii na rynku czy akcjami marketingowymi producentów. Jednak coraz częściej zauważalne jest świadome podejście zarówno inwestora, jak i projektanta w zakresie wyboru technologii ekologicznych, zdrowych, przyjaznych środowisku czy niskoemisyjnych. Są to często hasła wykorzystywane przez marketing, aby wypromować technologie, jednak pozytywna reakcja, jaką wywołują u odbiorców, świadczy o potrzebie tego rodzaju produktów. Ekologia, niskoemisyjność czy zdrowie – to cechy, za które inwestor jest w stanie zapłacić więcej.



Rys. 1. Kryteria wyboru technologii przez inwestorów (źródło własne autorów)

W artykule autorzy dokonali analizy wybranych technologii wznoszenia ścian zewnętrznych budynku. Dla każdego z materiałów został określony ślad węglowy, a następnie została wykonana analiza emisyjności w skali całego budynku. Pozwoli to na ocenę, jak wyższe koszty inwestycyjne materiałów niskoemisyjnych przełożą się na emisyjność całej inwestycji. Analizie zostały poddane przegrody zewnętrzne budynku, ponieważ jest to jeden z pierwszych wyborów, jakie dokonuje inwestor i projektant – technologia wznoszenia ścian.

Zewnętrzna obudowa budynku odgrywa również ważną rolę, ponieważ silnie oddziałuje na otaczający mikroklimat [10] i stanowi granicę między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym, wpływając na komfort cieplny mieszkańców [11] i straty energii w fazie eksploatacji [12].

2. Dane przyjęte do analizy

2.1. Zewnętrzna powłoka budynku

Zewnętrzna powłoka budynku odgrywa ważną rolę, ponieważ silnie oddziałuje na otaczający mikroklimat [13] i stanowi granicę między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym, wpływając na komfort cieplny mieszkańców [14] i straty energii w fazie eksploatacji [15]. W kontekście zrównoważonego rozwoju ocena cyklu życia poszczególnych komponentów budynków, a także całych budynków, staje się coraz ważniejsza, aby wziąć pod uwagę całkowite zużycie energii, począwszy od produkcji materiałów budowlanych i budowy, poprzez fazę eksploatacyjną aż do rozbiórki [16].

2.2. Materiały konstrukcyjne

Technologią dominującą na rynku budowlanym w Polsce w sektorze wielorodzinnego budownictwa mieszkalnego jest technologia monolityczna, żelbetowa. Realizacje tego typu obiektów również można spotkać w technologii słupowo-płytowej z wypełnieniem ścianami murowanymi. Do analizy przeprowadzonej w dalszej części artykułu przyjęto następujące materiały konstrukcyjne: bloczki z ceramiki poryzowanej, bloczki z betonu komórkowego oraz ściana z betonu zbrojonego.

2.3. Materiały termoizolacyjne

Głównym parametrem określającym charakterystykę termiczną materiału termoizolacyjnego jest współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(mK)]. Materiały termoizolacyjne mogą być skategoryzowane na podstawie różnych właściwości i cech, głównie gęstości, grubości i przewodności cieplnej [17, 18]. Konwencjonalne materiały termoizolacyjne mają przewodność cieplną w zakresie 19–46 mW/mK [19, 20]. Materiały termoizolacyjne, które zdominowały rynek materiałów budowlanych w Polsce to polistyren ekspandowany (EPS) oraz polistyren ekstrudowany (XPS), wełna skalna oraz wełna szklana i pianka poliuretanowa (PUR lub PU). Im niższa wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału termoizolacyjnego, tym lepszą ochronę cieplną przegrody zapewnia materiał termoizolacyjny. Do analizy przeprowadzonej w dalszej części artykułu przyjęto następujące materiały termoizolacyjne: wełnę mineralną, piankę PIR, styropian EPS.

2.4. Warianty ścian zewnętrznych przyjęte do analizy

Grubość warstwy konstrukcyjnej przyjęto zgodnie z dostępnością na rynku, natomiast grubości warstw termoizolacyjnych przyjęto w taki sposób, aby spełnione były wymagania obowiązujące dla polskiego standardu budynków o niemal zerowym zużyciu energii nZEB.

Do analizy przyjęto następujące warianty:

Wariant 1 – płyta g-k 1,23 cm; bloczki ceramiczne 25 cm; wełna mineralna twarda 20 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 2 – płyta g-k 1,23 cm; beton komórkowy 25 + 5 cm; wełna mineralna twarda 12 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 3 – płyta g-k 1,23 cm; żelbet monolityczny 25 cm; wełna mineralna twarda 22 cm;

Wariant 4 – płyta g-k 1,23 cm; bloczki ceramiczne 25 cm; styropian fasadowy 20 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 5 – płyta g-k 1,23 cm; beton komórkowy 25 + 5 cm; styropian fasadowy 12 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 6 – płyta g-k 1,23 cm; żelbet monolityczny 25 cm; styropian fasadowy 22 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 7 – płyta g-k 1,23 cm; bloczki ceramiczne 25 cm; pianka poliuretanowa 10 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

Wariant 8 – płyta g-k 1,23 cm; beton komórkowy 25 + 5 cm; pianka poliuretanowa 6 cm; tynk zewnętrzny 1 cm;

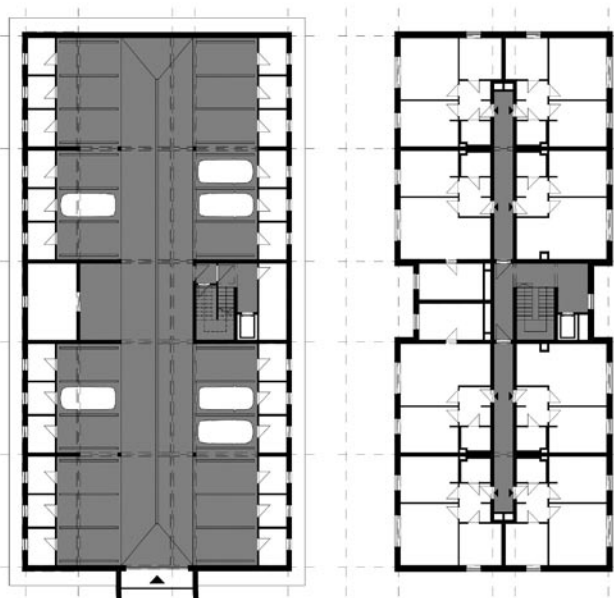
Wariant 9 – płyta g-k 1,23 cm; żelbet monolityczny 25 cm; pianka poliuretanowa 15 cm; tynk zewnętrzny 1 cm.

2.5. Budynek przyjęty do analizy

Analizowany budynek to wielorodzinnny budynek mieszkalny z centralnie usytuowaną klatką schodową z pionem windowym, podpiwniczeniem z wielostanowiskowym garażem i z przekryciem wentylowanym stropodachem dwudzielnym. W budynku na każdej z 4 kondygnacji użytkowych znajduje się po 8 mieszkań. Z powodu jednostronnej orientacji mieszkań, ze względu na zapewnienie wymaganego przepisami doświetlenia, rekomendowana jest orientacja budynku na osi wschód-zachód.



Rys. 2. Widok budynku



Rys. 3. Rzut garaży podziemnych i powtarzalnej kondygnacji mieszkalnej

3. Opis metodyki wyznaczania optymalnego wariantu konstrukcyjno-materiałowego dla modelowego budynku

Dla każdego z wyżej wymienionych wariantów modelowego budynku wielorodzinnego wykonano szczegółowy kosztorys. Oprócz kosztów całkowitych dla każdego wariantu konstrukcyjno-materiałowego budynku wykonano zestawienie materiałów budowlanych tworzących budynek oraz zestawienie pracy sprzętu budowlanego. Ponieważ każdy z wariantów budynku miał identyczną charakterystykę energetyczną budynku (EU, EK, EP), pominięto fazę użytkowania obiektu. Do dalszych analiz i wyboru optymalnego wariantu konstrukcyjno-materiałowego przyjęto następujące parametry:

$PBEK_i$ – wielkość energii końcowej (w kWh) zużytej w procesie wznoszenia budynku w określonym wariantcie konstrukcyjno-materiałowym,
 $PBEP_i$ – wielkość energii pierwotnej (w kWh) zużytej w procesie wznoszenia budynku w określonym wariantcie konstrukcyjno-materiałowym,

$EC_{CO_2_i}$ – wielkość emisji CO_2 (w $kg\ CO_2$) powstałej w wyniku zużycia energii końcowej w procesie wznoszenia budynku w określonym wariantcie konstrukcyjno-materiałowym,
 ES_i – wielkość energii wbudowanej (w kWh) w materiałach zużytych w procesie wznoszenia budynku w określonym wariantcie konstrukcyjno-materiałowym,
 EC_i – wielkość śladu węglowego (w $kg\ CO_2$) w materiałach zużytych w procesie wznoszenia budynku w określonym wariantcie konstrukcyjno-materiałowym,
 $Koszt_i$ – koszt całkowity budowy określonego wariantu konstrukcyjno-materiałowego budynku.

$PBEK_i$ wyznaczono według wzoru:

$$PBEK_i = \sum Moc_j \cdot T_j \quad (1)$$

gdzie:

Moc_j – moc maszyny lub elektronarzędzia budowlanego, [KW],
 T_j – czas pracy maszyny lub elektronarzędzia budowlanego, [m-h],

$PBEP_i$ wyznaczono według wzoru:

$$PBEP_i = PBEK_i \cdot wi \quad (2)$$

gdzie:

wi – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej, przyjęto dla oleju napędowego (ON) $wi_{ON} = 1,1$ dla energii elektrycznej (EE): $wi_{EE} = 3,0$

$EC_{CO_2_i}$ wyznaczono według wzoru:

$$EC_{CO_2_i} = PBEK_i \cdot wCO_{2-i_j} \quad (3)$$

gdzie:

wCO_{2-i_j} – wskaźnik emisji CO_2 w wyniku zużycia 1 kWh energii elektrycznej lub 10 l oleju napędowego zgodnie z aktualnymi danymi KOBiZE: w $CO_{2-i_{EE}}$ wynosi: $0,712\ kgCO_2/kWh$, a dla ON $wCO_{2-i_{ON}}$ wynosi [12]: $2,63\ kgCO_2/litr$.

ES_i wyznaczono według wzoru:

$$ES_i = \sum Masa_j \cdot ws_j \quad (4)$$

gdzie:

$Masa_j$ – masa zużytego materiału [kg] dla określonego wariantu konstrukcyjno-materiałowego budynku,
 ws_j – wskaźnik energii wbudowanej dla określonego materiału budowlanego i określonego wariantu konstrukcyjno-materiałowego [kWh/kg] uzyskany z brytyjskiej bazy danych na stronie [20].

EC_i wyznaczono według wzoru:

$$EC_i = \sum Masa_j \cdot wc_j \quad (5)$$

gdzie:

$Masa_j$ – masa zużytego materiału [kg] dla określonego wariantu konstrukcyjno-materiałowego budynku,

Tabela 1. Wyniki wielokryterialnego wyboru wariantu konstrukcyjno-materiałowego modelowego budynku

LP.	Nazwa wariantu	PBEK _i	PBEP _i	EC_CO ₂ _i	ES _i	EC _i	KOSZT _i
		kWh	kWh	kgCO ₂	kWh	kgCO ₂	PLN
1.	BK_WM	392 400	443 414	93 383	3 727 554	995 666	5 925 862
2.	BK_PIR	392 400	446 566	91 409	3 602 201	959 816	5 719 083
3.	BK_EPS	392 400	443 414	93 505	3 773 611	997 647	6 233 179
4.	PT_WM	392 400	443 414	93 480	4 761 759	1 272 448	5 910 504
5.	PT_PIR	392 400	446 566	91 504	4 820 184	1 271 939	5 775 362
6.	PT_EPS	392 400	443 414	93 246	5 192 048	1 316 516	5 963 432
7.	ZB_WM	429 713	485 717	114 033	3 793 963	1 043 173	6 169 097
8.	ZB_PIR	429 713	488 897	111 872	3 937 692	1 052 443	6 070 007
9.	ZB_EPS	429 713	485 717	113 800	3 817 808	1 039 318	6 196 851
	MIN=	392 400	443 414	91 409	3 602 201	959 816	719 083

wc_j – wskaźnik jednostkowej emisji CO₂ dla określonego materiału budowlanego i określonego wariantu konstrukcyjno-materiałowego [kWh/kg] uzyskany z brytyjskiej bazy danych na stronie [21].

4. Analiza wyników wielokryterialnego wyboru wariantu konstrukcyjno-materiałowego modelowego budynku

W celu wyboru optymalnego wariantu konstrukcyjno-materiałowego modelowego budynku wyznaczono wartości wszystkich wyżej wymienionych parametrów. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone przez autorów analizy porównawcze śladu węglowego wykazały niewielkie zróżnicowanie pomiędzy rozpatrywanymi rozwiązaniami technologiczno-materiałowymi. Przyjmując jako kryterium optymalizacji minimum wartości każdego z 6 parametrów, optymalnym rozwiązaniem (5 wartości minimalnych na 6 kryteriów) jest wariant techniczno-materiałowy budowy ścian w technologii z betonu komórkowego i ocieplanie ścian zewnętrznych pianką poliuretanową (wariant 8). Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że otrzymane wyniki ściśle zależą od źródłowych baz danych śladu węglowego dla konkretnych materiałów budowlanych. W poszczególnych krajach na wartości baz danych mają wpływ proces produkcyjny i zastosowane źródła energii w tym procesie.

BIBLIOGRAFIA

[1] Zeroemisyjna Polska 2050, Raport WWF Polska, Warszawa, 2020
 [2] Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L., Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets, *Nature*, tom. 529, nr 7587, Nature Publishing Group, 1/2016, str. 477–483
 [3] Shi Q., Yu T., Zuo J., What leads to low-carbon buildings? A China study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 50, Elsevier Ltd, 1/2015 str. 726–734
 [4] Zhang L., Li Q., Zhou J., Critical factors of low-carbon building development in China's urban area, *J. Clean. Prod.*, tom. 142, 1/2017, str. 3075–3082

[5] Dean B., Dulac J., Petrichenko K., Graham P., Towards zero, APA, 2016
 [6] Zhang Y., Wang Y., Barriers' and policies' analysis of China's building energy efficiency, *Energy Policy*, tom 62, 11/2013, str. 768–773
 [7] Li J., Towards a low-carbon future in China's building sector-A review of energy and climate models forecast, *Energy Policy*, tom 36, nr 5, 5/2008,, str. 1736–1747
 [8] Cho S. H., Chae C. U., A study on life cycle CO₂ emissions of low-carbon building in South Korea, *Sustain.*, tom 8, 6/2016
 [9] Tupenaite L., Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Turskis Z., Seniut M., Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation, *J. Civ. Eng. Manag.*, tom 16, nr 2, 5/2010, str. 257–266
 [10] Pisello A. L., Castaldo V. L., Pignatta G., Cotana F., Santamouris M., Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation, *Energy Build.*, tom 114, 2/2016, str. 180–190
 [11] (PDF) A comparative study of the thermal comfort of different building materials in madurai. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/288363877_A_comparative_study_of_the_thermal_comfort_of_different_building_materials_in_madurai. [Accessed: 19-Mar-2021]
 [12] De Lieto Vollaro R., Guattari C., Evangelisti L., Battista G., Carnielo E., Gori P., Building energy performance analysis: A case study, *Energy Build.*, tom 87, 1/2015, str. 87–94
 [13] Pisello A.L., Castaldo V.L., Pignatta G., Cotana F., Santamouris Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation, *Energy Build.*, 114/2016, str. 180–90
 [14] Madhumathi R. S. A., Sundararaja M.C., A comparative study of the thermal comfort of different building materials in Madurai, *Int J Earth Sci Eng*, 7/2014, str. 1004–1018
 [15] De Lieto Vollaro R., Guattari C., Evangelisti L., Battista G., Carnielo E., Building energy performance analysis: a case study, *Energy Build.*, 87/2015, str. 87–94
 [16] Dong Y. H., Thomas S., A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong, *Build Environ*, 89/2015, str. 183–191
 [17] Schiavoni F. A. S., D'Alessandro F., Bianchi F., Insulation materials for the building sector: a review and comparative analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 62/2016, str. 988–1011
 [18] Llantoy N., Châfer M., A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate, *Energy Build.* 225/2020, tom 225
 [19] Villasmil J. W. W., Fischer L.J., A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 103/2019, str. 71–84
 [20] Cabeza L.F., Castell A., Medrano M., Martorell I., Pérez G., Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction, *Energy Build.* 42/2010, str. 630–636
 [21] Independent building test, research, instruments and information – BSRIA. [Online]. Available: <https://www.bsria.com/uk/>. [Accessed: 16-Sep-2021].