

dr inż. Marcin Dębiński^{1)*}

ORCID: 0000-0002-5967-0637

dr hab. inż. Janusz Bohatkiewicz²⁾

ORCID: 0000-0002-9659-2666

dr hab. inż. Sławomir Biruk¹⁾

ORCID: 0000-0003-4392-8426

mgr inż. Michał Karkowski²⁾

ORCID: 0000-0002-6323-3085

BIM technology application to carbon footprint calculations in housing

Zastosowanie technologii BIM do obliczania śladu węglowego w budownictwie mieszkaniowym

DOI: 10.15199/33.2024.11.14

Abstract. The article presents examples of the application of BIM technology in residential construction in which the carbon footprint of an investment is estimated in order to select optimal technological and material solutions taking into account the life cycle of the entire building. An overview of methods for assessing the carbon footprint in construction is presented, and the dimensions and levels of BIM are discussed with a detailed indication of areas related to carbon emissions. Based on the literature, an analysis of the possibility of reducing the carbon footprint by optimizing a construction project using BIM technology was developed. The results indicate the need for deeper analysis at the investment planning stage. Appropriate selection of technologies and planning of implementation affects the reduction of carbon footprint.

Keywords: carbon footprint; BIM; building information modeling; life cycle analysis.

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania technologii BIM w budownictwie mieszkaniowym do szacowania śladu węglowego inwestycji w celu dokonania wyboru optymalnych rozwiązań technologiczno-materiałowych, biorąc pod uwagę cykl życia całego obiektu. Zaprezentowano przegląd metod oceny śladu węglowego w budownictwie oraz omówiono wymiary i poziomy BIM ze szczegółowym wskazaniem obszarów związanych z emisją dwutlenku węgla. Na podstawie literatury opracowano analizę możliwości redukcji śladu węglowego przez optymalizację inwestycji budowlanej dzięki wykorzystaniu technologii BIM. Wyniki wskazują na konieczność głębokiej analizy na etapie planowania inwestycji. Odpowiedni dobór technologii i zaplanowanie realizacji wpływa na redukcję śladu węglowego.

Słowa kluczowe: ślad węglowy; BIM; modelowanie informacji o budynku; analiza cyklu życia.

The carbon footprint is one of the key elements of environmental protection strategies in the European Union and globally. According to a special report by the European Court of Auditors, the carbon footprint is a term used to refer to the total amount of CO₂ and other greenhouse gas emissions caused directly and indirectly by a product, activity of an individual, or organisation [1]. The European Union aims to reduce the carbon footprint by 40% by 2030 compared to 2005 levels [2]. The first directives introducing greenhouse gas emission reduction plans were published in 2003 [3]. The primary measures to achieve the targeted reduction will be implemented in 2027. Currently, the phase of implementing legal regulations and solutions related to emission monitoring is underway [4]. In the near future, the requirement to calculate the carbon footprint in building certificates will be introduced. The United States is also introducing measures aimed at reducing the carbon footprint. The responsibility for implementing solutions to eliminate or minimise greenhouse gas emissions has been shifted to building material manufacturers [5]. A crucial element of any investment project is the analysis of the entire lifecycle of the

Ślad węglowy to jeden z kluczowych elementów strategii ochrony środowiska w Unii Europejskiej i na całym świecie. Zgodnie ze specjalnym raportem przygotowanym przez European Court of Auditors **ślad węglowy** to termin używany w odniesieniu do całkowitej ilości CO₂ i emisji innych gazów cieplarnianych spowodowanych bezpośrednio i pośrednio przez produkt, działalność osoby fizycznej lub organizacji [1]. Unia Europejska planuje do 2030 r. o 40% zmniejszyć ślad węglowy w stosunku do poziomu z 2005 r. [2]. Pierwsze dyrektywy wprowadzające plany redukcji emisji gazów cieplarnianych zostały opublikowane w 2003 r. [3]. Główne działania mające na celu osiągnięcie zakładanej redukcji zostaną wdrożone w 2027 r. Obecnie jest realizowany etap wdrażania regulacji prawnych oraz rozwiązań związanych z monitorowaniem emisji [4]. W najbliższym czasie zostanie wprowadzony obowiązek obliczania śladu węglowego w certyfikatach budynków. Także Stany Zjednoczone wprowadzają rozwiązania mające na celu redukcję śladu węglowego. Ciężar rozwiązań, które mają wyeliminować lub zminimalizować emisję gazów cieplarnianych, został przeniesiony na producentów materiałów budowlanych [5]. Istotnym elementem każdego przedsięwzięcia inwestycyjnego jest analiza całego cyklu życia obiektu budowlanego i optymalizacja rozwiązań materiałowo-tech-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów

* Correspondence address: m.debinski@pollub.pl

building and the optimisation of material and technological solutions considering the carbon footprint. BIM technology can serve as a valuable tool in this process. The concept of information modelling in digital projects emerged in the 1970s, while the term BIM was first used in 2002 [6]. The use of software leveraging BIM facilitates the calculation of the carbon footprint and the selection of optimal construction technologies.

Methods for estimating the carbon footprint

The carbon footprint has been defined as the total amount of carbon dioxide emissions, both direct and indirect, caused by the activities of an individual, organisation, or generated at various stages of a product's lifecycle [7, 8]. Three primary methods can be used to determine the carbon footprint: the Input-Output (IO) method, Life Cycle Assessment (LCA), and the Input-Output Life Cycle Assessment (IO-LCA) method. The Input-Output method pertains to organisations, while LCA is specific to products. The accuracy of these analyses depends on the assumptions made and the careful planning of appropriate steps [9].

The **IO method** is a way to estimate an organisation's carbon footprint. The first step is to select the departments within the company or organisation that should be included in the analysis, followed by identifying the sources and calculating the volume of greenhouse gas emissions, and then calculating the carbon footprint. The results and their analysis are subject to verification. Currently, two documents govern the calculation of an organisation's carbon footprint: the Greenhouse Gas Protocol (GHG) [10] and ISO 14064 standard [11].

In the case of **LCA analysis**, the first step is to break down the product into its components. In construction, these may include the production of building materials, transport and processes carried out on the construction site, and energy expenditures for heating and lighting during the building's maintenance phase. The next step is to define the purpose and scope of the analysis, followed by a quantitative and qualitative assessment of environmental impacts for all emission sources at each stage of the product's lifecycle. A report is produced based on the analysis of the results, which are subject to verification. More standards have been developed for LCA analysis of the environmental impact of products and services compared to the IO method. In the United Kingdom, the PAS 2050 standard was published [12], establishing guidelines for product categorisation. Japan has also published its standards, TSQ0010 [13], and the World Resources Institute, along with the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), developed the Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard [14]. The most well-known standard is ISO 14047. For buildings, LCA analysis is a highly complex process due to the number of products and components involved [9]. Table 1 presents a summary of carbon footprint assessment standards.

nologicznych z uwzględnieniem śladu węglowego. Pomocnym narzędziem może być technologia BIM. Sama idea modelowania informacji w projektach cyfrowych powstała w latach siedemdziesiątych XX w., natomiast pojęcie BIM pierwszy raz zostało użyte w 2002 r. [6]. Stosowanie oprogramowania komputerowego wykorzystującego BIM ułatwia obliczanie śladu węglowego i wybór optymalnych technologii budowy.

Metody szacowania śladu węglowego

Ślad węglowy został zdefiniowany jako całkowita ilość emisji dwutlenku węgla, bezpośrednio i pośrednio, spowodowana działalnością danego człowieka, organizacji lub wygenerowana na etapie życia produktu [7, 8]. Do określania śladu węglowego można wykorzystać trzy podstawowe metody: metodę wejścia i wyjścia (IO); analizę cyklu życia produktu (LCA) oraz metodę wejścia i wyjścia oceny cyklu życia produktu (IO-LCA). Metoda wejścia i wyjścia dotyczy organizacji, natomiast LCA produktów. Dokładność analiz zależy od założenia i zaplanowania odpowiednich kroków [9].

Metoda IO to sposób na oszacowanie śladu węglowego organizacji. Pierwszym krokiem jest wytypowanie działów przedsiębiorstwa lub organizacji, które powinny być uwzględniane w analizie, drugim identyfikacja źródeł i obliczenie wielkości emisji gazów cieplarnianych, a następnie obliczenie śladu węglowego. Wyniki i ich analiza podlegają weryfikacji. Obecnie istnieją dwa dokumenty, które regulują obliczanie śladu węglowego organizacji: Greenhouse Gas Protocol (GHG) [10] oraz norma ISO 14064 [11].

W przypadku **analizy LCA** pierwszym krokiem jest podział produktu na części składowe. W budownictwie mogą to być np.: produkcja materiałów budowlanych, transport i procesy realizowane na placu budowy, wydatki energii na ogrzewanie i oświetlenie w fazie utrzymania obiektu. W kolejnym kroku jest określany cel i zakres analizy, a następnie wykonywana ilościowa i jakościowa ocena obciążeń środowiska w przypadku wszystkich źródeł emisji na każdym z etapów życia produktu. Raport powstaje na podstawie analizy uzyskanych wyników, które poddawane są weryfikacji. Do analizy wpływu produktów i usług na środowisko metodą LCA opracowano więcej norm/standardów niż w przypadku metody IO. W Wielkiej Brytanii został opublikowany standard PAS 2050 [12], w którym określono zasady dotyczące kategoryzacji produktów. Swoje standardy opublikowała także Japonia: TSQ0010 [13] oraz World Resources Institute wraz z World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) – Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard [14]. Najbardziej znanym standardem jest norma ISO14047. W przypadku budynków analiza LCA jest bardzo złożonym procesem ze względu na liczbę produktów i elementów składowych [9]. W tabeli 1 zestawiono normy/standardy oceny śladu węglowego.

Wykonanie dokładnej analizy LCA jest bardzo czasochłonne, a obliczenia ułatwia zastosowanie oprogramowania spe-

Table 1. Standards for carbon footprint analysis [9]

Tabela 1. Normy i standardy analizy śladu węglowego [9]

Name/Norma/Standard	Publication date/Data publikacji	Type of analysis/Rodzaj analizy	Origin/Pochodzenie
ISO14064	2006	organization/organizacja	International Organization for Standardization/Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
Greenhouse Gas Protocol (GHG)	2004	organization/organizacja	WBCSD
PAS 2050	2008	product/produkt	British Standards Institution (BSI) (United Kingdom/Wielka Brytania)
Japanese Technical Specification TS-Q 0010	2009	product/produkt	Japanese Industrial Standards Committee (Japan/Japonia)
Product LCA standard	2011	product/produkt	WBCSD
ISO 14047	2012	product/produkt	International Organization for Standardization/ Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna

Conducting a detailed LCA analysis is very time-consuming, but calculations are facilitated by the use of specialised software, primarily employing Building Information Modelling (BIM) technology in construction. Currently, there are solutions available on the market as add-ons to the most popular types of software used for designing buildings and roads. By using these tools, an LCA analysis can be performed based on the created model of the object. According to the BIM Dictionary [15], BIM is a set of technologies, processes, and principles that enable multiple stakeholders (project participants, team members) to collaboratively design, build, and test an asset in a virtual space. Various dimensions of the BIM model are distinguished (Table 2), commonly from 4D to 7D, sometimes even up to 10D (where dimension 8D refers to safety; 9D to process optimisation; 10D to execution technology; and 6D

czajistycznego, w budownictwie głównie wykorzystującego technologię BIM (*Building Information Modelling*). Obecnie na rynku dostępne są rozwiązania w postaci nakładek na najbardziej popularne rodzaje oprogramowania wykorzystywanego do projektowania budynków i dróg. Dzięki ich zastosowaniu na podstawie stworzonego modelu obiektu wykonywana jest analiza LCA. Zgodnie z bimdictionary [15], BIM to zestaw technologii, procesów i zasad umożliwiający wielu interesariuszom (uczestnikom projektu, członkom zespołu projektowego) wspólne projektowanie, budowę i testowanie obiektu w przestrzeni wirtualnej. Wyróżnia się różne wymiary modelu BIM (tabela 2), najczęściej od 4D do 7D, czasem nawet 10D (wymiar 8D dotyczy bezpieczeństwa; 9D – optymalizacji procesów; 10D – technologii wykonania; 6D – pozwala na analizy środowiskowe, w tym obliczanie śladu węglowego).

Table 2. Characteristics of the BIM model [16]

Tabela 2. Charakterystyka modelu BIM [16]

Level/Wymiar modelu BIM	Description/Opis
4D	a 3D model with the data necessary for designing construction schedules. The 4D model enables three-dimensional simulation of the construction project's progression/model 3D wraz danymi niezbędnymi do projektowania harmonogramów budowlanych. Model 4D umożliwia trójwymiarową symulację przebiegu realizacji przedsięwzięcia budowlanego
5D	a 3D model includes additional information necessary for preparing cost estimates and material lists/model 3D uwzględnia dodatkowe informacje niezbędne do sporządzania kosztorysów i zestawień materiałowych
6D	a 3D model along with information that enables energy analysis of the building and calculation of the carbon footprint/model 3D wraz z informacjami umożliwiającymi dokonanie analizy energetycznej budynku oraz obliczania śladu węglowego
7D	a 3D model supplemented with information for managing and maintaining the facility (condition of the facility, equipment operation instructions, etc.)/model 3D uzupełniony o informacje do zarządzania i utrzymania obiektu (stan obiektu, instrukcje obsługi wyposażenia itp.)
8D	a 3D model containing additional information that allows for the identification of potential risks, risk assessment, and elimination of hazards to ensure safety on the construction site/model 3D dodatkowo zawierający informacje pozwalające na identyfikację potencjalnych ryzyk, dokonanie oceny ryzyka i eliminację zagrożeń w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy na budowie
9D	a 3D model that also includes information for optimizing construction processes (planning and analysis of resource utilization on the construction site). The concept of Lean Construction is utilized/model 3D dodatkowo zawierający informacje pozwalające na optymalizację procesów budowlanych (planowanie i analiza wykorzystania zasobów na budowie). Wykorzystywana jest koncepcja Lean Construction
10D	a 3D model enhanced with information that allows for the creation of digital models of prefabricated building elements/model 3D uzupełniony o informacje umożliwiające tworzenie cyfrowych modeli prefabrykowanych elementów budowlanych

allows for environmental analyses, including carbon footprint calculations).

According to Web of Science, the first articles with the keywords "BIM" and "carbon footprint" were recorded in 2008 [17], and the number of publications on this topic increases each year. By using BIM technology, precise data necessary for estimating the carbon footprint can be obtained as early as the design stage. BIM facilitates the comparison of various construction technologies in terms of greenhouse gas emissions, for example, between monolithic and prefabricated concrete [18]. The orientation of a building relative to cardinal directions and proper exposure of glazed partitions can influence energy requirements for heating and lighting. Proper positioning of the building on the construction site can also lead to a reduction in transport processes on-site and a decrease in temporary works (minimising storage areas, the length of temporary roads, or excavation protections). An incorrect building location may have additional negative environmental impacts, which can also be analysed using BIM technology [19, 20]. Selecting appropriate software to achieve the desired objective is also crucial [21]. BIM technology enables the acquisition of precise data for carbon footprint analysis.

Analysis of research based on literature

Construction is one of the largest producers of greenhouse gases. This is due to the high fuel and energy consumption during the transport of building materials and the execution of construction processes, particularly due to the energy-intensive nature of material production. One parameter characterising emission is GWP (Global Warming Potential). Myint and Shafique [22], based on an Indian database, determined the greenhouse gas emissions associated with the production of various building materials. Figure 1 shows the results for the analysis of selected materials used in construction [23].

Significant differences are observed in GWP values across various materials, with the highest values attributed to reinforcing steel, whose production requires substantial energy. Window frames and vinyl panels displayed similar results. Sand, a natural material with emissions primarily arising from extraction, had the lowest GWP value. For individual products or complex processes, results presented in various reports and publications

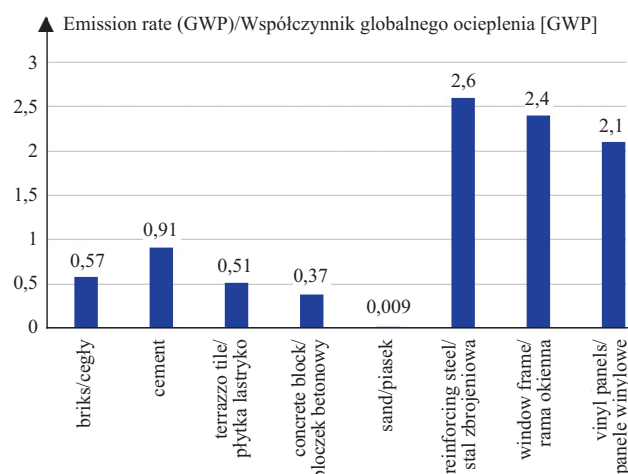


Fig. 1. Emission index (GWP) for selected building materials [23]

Rys. 1. Współczynnik Globalnego Ocieplenia (GWP) przykładowych materiałów budowlanych [23]

Zgodnie z Web of Science w 2008 r. odnotowano pierwsze artykuły ze słowami kluczowymi BIM i ślad węglowy [17], a liczba prac dotycząca tej tematyki zwiększa się co roku. Dzięki zastosowaniu technologii BIM można uzyskać dokładne dane niezbędne do oszacowania śladu węglowego już na etapie projektowania. Stosowanie BIM ułatwia porównywanie różnych technologii budowlanych w aspekcie emisji gazów cieplarnianych, np. monolitycznej i prefabrykacji betonowej [18]. Usytuowanie budynku względem stron świata i właściwe wyeksponowanie przegród szklanych może wpływać na zapotrzebowanie na energię w celu ogrzewania i oświetlenia budynku. Właściwe usytuowanie budynku na działce budowlanej może także prowadzić do minimalizacji procesów transportowych na placu budowy czy zmniejszenia zakresu robót tymczasowych (minimalizacja powierzchni składowych, długości dróg tymczasowych czy zabezpieczenia wykopów). Niewłaściwa lokalizacja budynku może mieć dodatkowy negatywny wpływ na środowisko, który także można analizować przy użyciu technologii BIM [19, 20]. Istotny jest również dobór właściwego oprogramowania do realizacji celu, który ma zostać osiągnięty [21]. Technologia BIM pozwala pozyskać dokładne dane do analizy śladu węglowego.

Analiza badań na podstawie literatury

Budownictwo jest jednym z największych producentów gazów cieplarnianych. Wynika to z dużego zużycia paliw i energii podczas transportu materiałów budowlanych oraz realizacji procesów budowlanych, a przede wszystkim z energochłonności produkcji materiałów. Jednym z parametrów charakteryzujących emisję gazów jest GWP (ang. *Global Warming Potential*) – współczynnik globalnego ocieplenia. Myint i Shafique [22], na podstawie indyjskiej bazy danych, określili wartości emisji gazów cieplarnianych przy produkcji różnych materiałów budowlanych. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki dotyczące analizy przykładowych materiałów wykorzystywanych w budownictwie [23]. Widoczne są

znaczące różnice wartości wskaźnika GWP w przypadku poszczególnych materiałów. Największą wartość osiągnęła stal zbrojeniowa, której produkcja wymaga dużej ilości energii. Podobne wyniki uzyskały ramy okienne i panele winylowe. Najmniejszą wartością GPW charakteryzował się piasek, który jest materiałem naturalnym i głównym źródłem emisji jest sam proces wydobycia. W przypadku pojedynczych produktów lub złożonych procesów wyniki prezentowane w różnych raportach i publikacjach są niejednorodne. Istniejące normy/standardy wskazują szczegółowo metodę analiz i dokładność prowa-

are inconsistent. Existing standards specify detailed methods of analysis and the precision required in calculations. Unfortunately, analysts lack access to detailed input data, resulting in considerable variations in estimating the impact of a given material on the carbon footprint. An example is the carbon footprint analysis of a residential building [24]. The authors considered a three-story residential house. Based on the energy required to construct the building, MacKay [25] estimated that 16 tonnes of CO₂ would be emitted during its construction. Janković [26], analysing a similar building, found that its construction would emit 26 tonnes of CO₂. The 2021 Circular Ecology report [27] estimated CO₂ emissions at 78 tonnes. These differences result from the use of different input data and assumptions.

CO₂ emissions can be associated with social costs (SPC). In 2022, Rennert et al. [28] estimated the SPC at \$185 (744 PLN) per tonne of CO₂ emissions. For a single building, this difference reaches \$11,470 (46,109 PLN). In 2022, 109,308 single-family homes were built in Poland. Incorrectly chosen input parameters could lead to an estimation of social costs with a national error exceeding 5 billion PLN.

Bibliometric analyses conducted by Zhen Liu et al. [17] indicated that the impact of using BIM in estimating and reducing the carbon footprint is not yet well understood. According to Web of Science, 524 articles over 14 years have been published with information on the connection between building information modelling technology and its impact on greenhouse gas emissions [17]. According to Mazur and Olenchuk [29], the use of BIM technology enables precise simulation and determination of a building's carbon footprint when constructed using various technologies. The authors conducted a detailed analysis of masonry and wooden building, with the wooden structure showing the lowest greenhouse gas emissions, not only due to its construction but also its subsequent maintenance [29]. The publication by Li Xiao Juan et al. [18] includes an analysis using BIM technology to select the construction method for a concrete building. The analyses considered both monolithic and prefabricated technologies, with the prefabricated building exhibiting the smallest carbon footprint.

Based on the literature, the average annual CO₂ emissions of a building constructed with monolithic technology, a prefabricated reinforced concrete building, and a wooden building were determined. The results are presented in Figure 2. Wooden buildings have the lowest greenhouse gas emissions. Structural or functional requirements, such as fire resistance or durability, may limit the use of natural materials that have the least

emissions. Osoby wykonujące analizy nie mają niestety dostępu do szczegółowych danych wejściowych, co powoduje znaczne różnice w szacowaniu wpływu zastosowania danego materiału na ślad węglowy. Przykładem może być analiza śladu węglowego budynku mieszkalnego [24]. Autorzy przyjęli trzykondygnacyjny dom mieszkalny. Na podstawie energii potrzebnej do wzniesienia budynku MacKay [25] oszacował, że podczas jego realizacji zostanie wyemitowanych 16 t CO₂. Janković [26] analizując podobny budynek, stwierdził, że jego budowa spowodowałaby emisję 26 t CO₂. Raport Circular Ecology z 2021 r. [27] szacuje emisję CO₂ na 78 t. Różnice te wynikają z przyjęcia różnych danych wejściowych i założeń.

Emisję CO₂ można utożsamiać z kosztami społecznymi (SPC). W 2022 r. Rennert in. [28] określili SPC na 185 dolarów (744 złotych) za emisję tony CO₂. W przypadku budynku różnica ta sięga 11 470 dolarów (46 109 złotych). W 2022 r. w Polsce wybudowano 109 308 budynków jednorodzinnych. Niewłaściwie dobrane parametry wyjściowe mogą skutkować oszacowaniem kosztów społecznych z błędem wynoszącym w skali kraju ponad 5 mld zł.

Analizy bibliometryczne dokonane przez Zhen Liu i in. [17] wykazały, że wpływ zastosowania BIM w szacowaniu i redukcji śladu węglowego nie jest jeszcze dobrze rozpoznany. Zgodnie z Web of Science przez 14 lat opublikowano 524 artykuły zawierające informacje o połączeniu technologii modelowania z informacją o budynku i wpływie na emisję gazów cieplarnianych [17]. Zdaniem Mazura i Olenchuka [29] wykorzystanie technologii BIM pozwala na dokładne symulowanie i określenie śladu węglowego budynku realizowanego w różnych technologiach. Autorzy poddali szczegółowej analizie budynek murowany i drewniany. Najmniejszą emisją gazów cieplarnianych charakteryzował się budynek drewniany, nie tylko ze względu na budowę, ale również późniejsze utrzymanie [29]. W publikacji Li Xiao Juan i in. [18] zawarto analizę z wykorzystaniem technologii BIM doboru technologii wykonywania konstrukcji budynku betonowego. W analizach uwzględniono technologię monolityczną i prefabrykowaną. Najmniejszy ślad węglowy uzyskano w przypadku budynku prefabrykowanego.

Na podstawie literatury określono średnioroczną emisyjność CO₂ budynku wykonanego w technologii monolitycznej, żelbetowego budynku prefabrykowanego oraz budynku drewnianego. Wyniki przedstawiono na rysunku 2. Najmniejszą emisyjnością gazów cieplarnianych charakteryzują się budynki drewniane. Wymagania konstrukcyjne lub użytkowe, np. odporność ogniowa czy trwałość powodują, że nie zawsze istnieje możliwość stosowania materiałów naturalnych mających najmniejszy wpływ na tworzenie efektu cieplarnianego. Prefabrykacja betonowa pozwala na zmniejszenie emisji CO₂ w stosunku do technologii monolitycznej.

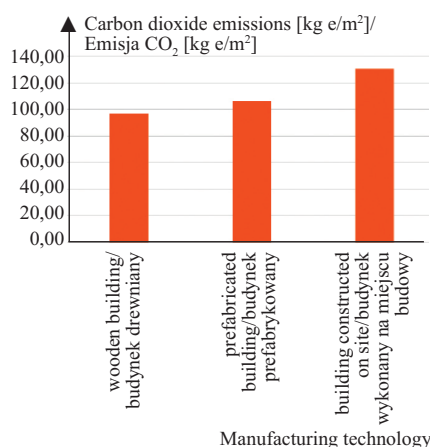


Fig. 2. Carbon dioxide emissions for various technologies of construction of a single-family building [18, 29]

Rys. 2. Emisja CO₂ w przypadku różnej technologii wykonania budynku jednorodzinnego [18, 29]

impact on greenhouse gas emissions. Concrete prefabrication allows for a reduction in CO₂ emissions compared to monolithic technology.

Data on buildings constructed using various technologies, presented in Table 3, indicate significant differences in social costs. The construction of a monolithic building increases social costs by over 35% compared to a wooden structure. A prefabricated reinforced concrete building generates social costs more than 9% higher than a wooden building. The difference in social costs between a prefabricated and monolithic reinforced concrete building is over 23%. These results highlight the necessity of detailed

Table 3. The social costs of carbon dioxide emissions [18, 29]

Tabela 3. Koszty społeczne emisji CO₂ [18, 29]

Technology/Technologia	Area [m ²]/ Powierzchnia [m ²]	Carbon dioxide emissions [kg e/m ²]/ Emisja CO ₂ [kg e/m ²]	Social cost [\$]/year/ Koszty społeczne [\$]/r
Wooden building/ Budynek drewniany	100	96,72	7193,07
Prefabricated building/ Budynek prefabrykowany	100	105,88	7874,30
Monolithic concrete building/ Budynek z betonu monolitycznego	100	130,79	9726,87

analysis when selecting materials and construction technologies, not only in terms of cost, durability, and construction time but also ecological criteria. For investment decisions, the use of multi-criteria optimisation methods is essential. BIM technology facilitates access to data for carbon footprint calculations and enables comparative analysis of construction options. Alvi et al. described examples of BIM applications in the context of the carbon footprint, highlighting the primary area for emissions analysis during the design stage [30]. This is supported by research and conclusions published by Kurian et al. [20]. Currently, the impact of BIM tools on the carbon footprint is primarily recognised regarding its projection based on design solutions, which is a crucial aspect in combating excessive CO₂ emissions.

Summary

The application of BIM technology for estimating the carbon footprint in buildings is still relatively underexplored. Bibliometric data shows an increasing number of articles each year with keywords “BIM” and “carbon footprint.” BIM-based software primarily aids in providing precise building data during the design, construction, management, and maintenance stages. BIM technology facilitates the comparison of different construction technologies, taking the carbon footprint into account as early as the design phase. The selection of an optimal variant should consider not only the building’s construction phase but also its maintenance and demolition. Traditional evaluation criteria for design options, such as time and cost, should be expanded to include environmental and social requirements. Increased design costs can lead to subsequent savings throughout the building’s lifecycle. By using BIM technology, technolo-

Dane dotyczące budynków wzniesionych w różnych technologiach, przedstawione w tabeli 3, wskazują na duże różnice w kosztach społecznych. Realizacja budynku monolitycznego powoduje wzrost kosztów społecznych o ponad 35% w stosunku do budynku o konstrukcji drewnianej. Prefabrykowany budynek żelbetonowy generuje koszty ponad 9% większe niż budynek z drewna. W przypadku budynku żelbetonowego prefabrykowanego i monolitycznego różnica w kosztach społecznych wynosi ponad 23%. Wyniki te wskazują na konieczność prowadzenia szczegółowych analiz doboru materiałów i technologii budowlanych nie tylko przy uwzględnieniu kosztu, trwałości, czasu realizacji, ale

także kryteriów ekologicznych. W przypadku podejmowania decyzji inwestycyjnych konieczne jest stosowanie metod optymalizacji wielokryterialnych. Technologia BIM ułatwia uzyskanie danych do obliczenia śladu węglowego oraz prowadzenie analiz porównawczych wariantów realizacyjnych. Przykłady zastosowania technologii BIM w kontekście śladu węglowego opisał Alvi et al., wskazując jako główny obszar możliwości analizy wielkości emisji na etapie projektu [30]. Potwierdzają to badania i wnioski opublikowane przez Kurian et al [20]. Obecnie rozpoznano głównie wpływ narzędzi BIM na ślad węglowy w odniesieniu do jego prognozowania w zależności od rozwiązań projektowych. Jest to istotny element w walce z nadmierną emisją CO₂.

Podsumowanie

Zastosowanie technologii BIM do szacowania śladu węglowego w budynkach jest jeszcze mało rozpoznane. Na podstawie danych bibliometrycznych można zaobserwować, że co roku zwiększa się liczba artykułów ze słowami kluczowymi BIM i ślad węglowy. Oprogramowanie wykorzystujące technologię BIM w głównej mierze pomaga dostarczyć dokładne dane o budynku na etapie projektowania, realizacji, zarządzania i utrzymania. Technologia BIM już na etapie projektowania ułatwia porównanie różnych technologii budowlanych z uwzględnieniem śladu węglowego. Wybór optymalnego wariantu powinien obejmować nie tylko etap realizacji budynku, ale także jego utrzymanie i rozbiórkę. Tradycyjne kryteria oceny wariantów projektowych, takie jak czas i koszt realizacji powinny być uzupełnione o wymagania ekologiczne i społeczne. Zwiększone koszty projektowania mogą skutkować późniejszymi oszczędnościami w całym cyklu życia obiektu. Dzięki zastosowaniu technologii BIM można dobrać technologie oraz materiały tak, aby zredukować ślad wę-

gies and materials can be selected to reduce the carbon footprint, which directly benefits environmental conditions and lowers the social costs associated with greenhouse gas emissions.

Received: 02.10.2024

Revised: 30.10.2024

Published: 25.11.2024

głowy. Przekłada się to bezpośrednio na stan środowiska, jak i zmniejszenie kosztów społecznych emisji gazów cieplarnianych.

Badania powstały w ramach zadania zleconego pn. „Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego” finansowanego z dotacji celowej Ministra Edukacji i Nauki nr umowy MEiN/2022/DPI/2575, działanie „PO SAŚIEDZKU – międzyuczelniane staże badawcze i wizyty studyjne”.

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.10.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.10. 2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literature

- [1] How do the EU institutions and bodies calculate, reduce and offset their greenhouse gas emissions? Special Report European Court of Auditors. Luksemburg 2014 European Union.
- [2] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-ets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en (30.04.2024).
- [3] Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC.
- [4] <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vkmiobvzi1x7?ctx=vhsjgh0wpcp9> (30.04.2024).
- [5] <https://www.epa.gov/greenerproducts/what-embodied-carbon> (30.04.2024).
- [6] Rokooci S. Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes, Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015.v ol. 210: 87 – 95.
- [7] Wiedmann T, Minx J. A definition of Carbon Footprint, ISA Res Rep. 2007. vol. 7: 1 – 7.
- [8] Weidema BP, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment [J], J Ind Ecol. 2008. vol. 12: 3 – 6.
- [9] Gao T, Liu Q, Wang J, A comparative study of carbon footprint and assessment standards, International Journal of Low-Carbon Technologies. 2014. Vol. 9/3: 237 – 243.
- [10] WRI. The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard (Revised Edition) [M]. 2011 Geneva, Switzerland World Business Council for Sustainable Development.
- [11] ISO 14064. The greenhouse gas, 2006 Geneva, Switzerland International Organization for Standardization.
- [12] BSI, PAS 2050-Specification for the Assessment of the Geneva, Switzerland, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services. 2008 London, UK British Standards Institution.
- [13] Technical Specification TSQ0010 General principles for the assessment and labeling of Carbon Footprint of Products. The Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry.
- [14] WRI. Product life cycle accounting and reporting standard. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland, 2011.
- [15] <https://bimdictionary.com/>(30.04.2024).
- [16] Piwkowski W. at all. BIM STANDARD PL, Polski Związek Pracodawców Budownictwa. Warszawa 2020.
- [17] Iu Z, Li P, Wang F, Osmani M, Demian P. Building Information Modeling (BIM) Driven Carbon Emission Reduction Research: A 14-Year Bibliometric Analysis. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022.vol. 19.
- [18] Xiao-juan Li, Wan-jun Xie, Le Xu, Lu-lu Li, C.Y. Jim, Tai-bing Wei, Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM. Energy and Buildings. 2022. vol. 266.
- [19] Xining Yang, Mingming Hu, Jiangbo Wu, Bin Zhao. Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China, Journal of Cleaner Production. 2018. vol. 183: 729 – 743.
- [20] Kurian R, Kulkarni KS, Ramani PV, Meena CS, Kumar A, Cozzolino R. Estimation of Carbon Footprint of Residential Building in Warm Humid Climate of India through BIM. Energie. 2021; vol. 14.
- [21] Lu C, Chen JY, Pan CA, Jeng T. A BIM Tool for Carbon Footprint Assessment of Building Design. Proceedings of the 20th Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). 2015.
- [22] Nwe Ni Myint, Muhammad Shafique, Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings, Case Studies in Construction Materials. 2024. vol. 20.
- [23] IFC. Indian construction material database of Embodied Energy and Global Warming Potential. 2017; [Online]. Available: <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2022/04/IFC-India-Construction-Materials-Database-Methodology-Report.pdf>.
- [24] <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co2-emitted-building-new-house> (20.04.2024).
- [25] MacKay D. Sustainable Energy – without the hot air. UIT Cambridge Ltd., Cambridge, UK, 2009.
- [26] The Conversation. Embodied carbon: why truly net zero buildings could still be decades away, by Ljubomir Jankovic. 2021.
- [27] Circular Ecology: COP26 House – An Embodied Carbon Exemplar. November 4, 2021.
- [28] Rennett K, Errickson F, Prest BC et al. Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. Nature. 2022. vol. 610: 687 – 692.
- [29] Mazur Ł, Olenchuk A. Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach: Carbon Footprint of Masonry and Timber-Frame Constructions in Single-Family Houses. Sustainability. 2023. vol. 15 (21).
- [30] Alvi S, Kumar H, Khan R. Integrating BIM with carbon footprint assessment of buildings: A review. Materials Today: Proceedings; 2023. vol. 93: 497 – 504.