

Agnieszka Kaliszuk-Wietecka, PhD, Eng.^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2476-6951

Zuzanna Gondek, Eng.²⁾

Life cycle assessment of a single-family residential building depending on the construction material used

Ocena cyklu życia jednorodzinnego budynku mieszkalnego w zależności od zastosowanego materiału konstrukcyjnego

DOI: 10.15199/33.2025.04.08

Abstract: This article addresses the topic of Life Cycle Assessment (LCA) of buildings. A greater number of buildings are being analysed for their carbon footprint and its reduction, as required by multi-criteria certification, the EU taxonomy and soon to be a national requirement for all new buildings. The present study analyses the carbon footprint and energy of a single-family residential building in two construction options, brick and timber frame, over its entire life cycle. The differences in performance in terms of embodied and operational carbon footprint and energy were analysed. This was followed by an assumption of bringing the building to a zero-energy standard. The findings indicate that a timber-framed building exhibits a 7% reduced carbon footprint and a 1% reduced energy footprint compared to a masonry building. The difference increases for the zero-energy standard when the operational footprint is zero, in which case the timber building generates a 25% lower carbon footprint and 15% lower energy.

Keywords: life cycle assessment; LCA; embodied carbon footprint; operational carbon footprint

Streszczenie: W artykule poruszono tematykę oceny cyklu życia budynku. Coraz częściej analizuje się budynki pod kątem śladu węglowego oraz jego redukcji, ponieważ wymagają tego certyfikacje wielokryterialne, unijna taksonomia, a od 2026 r. jego obliczenie stanie się krajowym wymaganiem w przypadku wszystkich nowych budynków. Na potrzeby artykułu przeanalizowano ślad węglowy wbudowany i operacyjny oraz energię pierwotną jednorodzinnego budynku mieszkalnego w dwóch wariantach konstrukcji: murowanej i drewnianej szkieletowej, w całym cyklu życia. Kolejnym krokiem analizy było przeprojektowanie budynku do standardu zeroenergetycznego. Wyniki wskazują, że budynek w konstrukcji drewnianej charakteryzuje się o 7% mniejszym całkowitym śladem węglowym i o 1% mniejszą energią pierwotną niż budynek murowany. Różnica ta zwiększa się w przypadku standardu zeroenergetycznego, kiedy ślad operacyjny jest równy zero, wtedy budynek drewniany generuje o 25% mniejszy ślad węglowy i o 15% mniejszą energię pierwotną.

Słowa kluczowe: cykl życia budynków; LCA; wbudowany ślad węglowy; operacyjny ślad węglowy

The article presents the environmental impact of a building depending on the type of construction. A single-family house in masonry and wooden frame construction is analyzed. The environmental impact is analyzed in terms of the embodied and operational carbon footprint and primary energy in the building's life cycle. A research gap has been defined, which is to determine the difference in the values of the parameters mentioned between a traditional masonry construction and a wooden frame construction considered to be low-carbon. This may be useful for determining national GWP requirement thresholds, as required by the EPBD [3].

Literature review

The construction sector is responsible for 47% of the world's annual CO₂ emissions, 27% of which is caused by the operation of buildings and the remaining 20% by the production of building materials and processes related to the construction of

W artykule zaprezentowano wpływ budynku na środowisko w zależności od typu konstrukcji. Analizie podlega budynek jednorodzinny w konstrukcji murowanej i drewnianej szkieletowej. Wpływ na środowisko przeanalizowano pod kątem wbudowanego i operacyjnego śladu węglowego oraz energii pierwotnej w cyklu życia budynku. Zdefiniowano lukę badawczą, którą jest określenie różnicy wartości wymienionych parametrów między tradycyjną konstrukcją murowaną a uznaną za niskoemisyjną drewnianą konstrukcją szkieletową. Może to być przydatne do określenia krajowych progów wymagań GWP, zgodnie z wymaganiami EPBD [3].

Przegląd literatury

Sektor budowlany odpowiada za 47% rocznej emisji CO₂ na świecie, z czego 27% przypada na eksploatację budynków, a pozostałe 20% na produkcję materiałów budowlanych i procesy związane ze wznoszeniem budynków, tj. tzw. wbudowany ślad węglowy [1]. Z tego powodu dekarbonizacja zasobów budowlanych ma kluczowy wpływ na zmniejszenie globalnej emisji dwutlenku

¹⁾ Warsaw University of Technology

²⁾ JW_A Sp. z o.o.

^{*)} Correspondence address: agnieszka.wietecka@pw.edu.pl

buildings, i.e. the so-called embodied carbon footprint [1]. For this reason, the decarbonization of building resources plays a key role in reducing global carbon emissions. As the energy efficiency of buildings improves, the importance of embodied emissions increases. In 2010, the European Parliament introduced the concept of a nearly zero-energy building (nZEB), which is characterized by high energy efficiency and the remaining energy required for its operation should be largely covered by renewable sources [2]. The idea of nZEB buildings has become crucial in the battle against global warming. In May 2024, the revised EPBD (Energy Performance of Building Directive) came into force, in which the nZEB standard would be replaced by zero-emission buildings (ZEB), defined as ‘requiring zero or very low energy consumption, producing zero carbon dioxide emissions from fossil fuels on site and producing zero or very low greenhouse gas emissions during operation’ [3]. An additional requirement will be the calculation of the carbon footprint of buildings over their entire life cycle [3]. Several member states have already created national guidelines for calculating the carbon footprint of buildings in accordance with the EPBD. The others, including Poland, are in the process of working to comply with the European directive.

Literature indicates that timber-framed buildings have a lower embodied carbon footprint than comparable reinforced concrete buildings. Duan et al. [4] in a review of more than 60 scientific articles, showed that the embodied carbon footprint of reinforced concrete residential buildings is 42.68% greater than that of solid wood buildings, while the embodied energy, which is the energy associated with the production of materials, is 23% greater in wooden buildings. Moschetti et al. [5] analyzed a Norwegian office building and concluded that the CO₂ emissions over the entire life cycle can be reduced by 20–22% compared to a reinforced concrete construction if a timber frame is used. Skullestad et al., on the other hand, analyzed four multi-story buildings and concluded that the impact of wooden buildings on climate change is 34–84% less than that of similar buildings made of reinforced concrete [6]. One of the alternative structures combining the advantages of wooden and concrete structures is a hybrid structure; according to Rinne et al., such a structure ranks between wooden and reinforced concrete structures in terms of carbon footprint, while being a more accessible design option [7].

Characteristics of the analyzed building

The building analyzed is a detached, single-family house with a brick structure, no basement and an integrated garage. It has two floors above ground: a ground floor and an attic. The usable area is 154.3 m², and the height of the building, measured from ground level at the main entrance to the building to the roof ridge, is 8.33 m. The plan of the building is shown in Figure 1. The masonry and wooden frame construction of this building were analyzed. The most important construction and material data are shown in Table 1.

In both types of construction, the external partitions were designed so that the heat transfer coefficients *U* are similar. The

węglu. Wraz ze wzrostem efektywności energetycznej budynków zwiększa się znaczenie emisji wbudowanych. W 2010 r. dyrektywa Parlamentu Europejskiego wprowadziła koncepcję budynku o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB), który charakteryzuje się dużą efektywnością energetyczną, a pozostała energia wymagana do jego eksploatacji powinna być w znacznej części pokryta ze źródeł odnawialnych [2]. Idea budynków nZEB stała się kluczowa w walce z globalnym ociepleniem. W maju 2024 r. weszła w życie zrewidowana dyrektywa EPBD (Energy Performance of Building Directive), w której standard nZEB miałby zostać zastąpiony budynkami zeroemisyjnymi (ZEB), zdefiniowanymi jako „wymagające zerowego lub bardzo niskiego zużycia energii, wytwarzające zerową emisję dwutlenku węgla z paliw kopalnych na miejscu i wytwarzające zerową lub bardzo niską emisję gazów cieplarnianych podczas eksploatacji” [3]. Dodatkowym wymaganiem będzie obliczenie śladu węglowego budynków w całym cyklu życia [3]. Część krajów członkowskich stworzyła już krajowe wytyczne do obliczania śladu węglowego budynków zgodnie z EPBD. Pozostałe, w tym Polska, są w trakcie prac mających na celu dostosowanie się do europejskiej dyrektywy.

Literatura wskazuje, że budynki w konstrukcji drewnianej charakteryzują się mniejszym wbudowanym śladem węglowym niż analogiczne budynki w konstrukcji żelbetowej. Duan i in. [4] w przeglądzie obejmującym ponad 60 artykułów naukowych wykazali, że wbudowany ślad węglowy budynków mieszkalnych żelbetowych jest o 42,68% większy niż budynków z drewna masywnego, natomiast energia wbudowana, będąca energią związaną z wytwarzaniem materiałów jest o 23% większa w budynkach w konstrukcji drewnianej. Moschetti i in. [5], w ramach analizy norweskiego budynku biurowego stwierdzili, że emisja CO₂ w całym cyklu życia może zostać zmniejszona o 20–22% w porównaniu z konstrukcją żelbetową, jeśli w budynku zostanie zastosowany szkielet drewniany. Z kolei Skullestad i in. po przeprowadzeniu analizy czterech budynków wielokondygnacyjnych stwierdzili, że wpływ budynków w konstrukcji drewnianej na zmianę klimatu jest o 34–84% mniejszy niż analogicznych budynków w konstrukcji z żelbetu [6]. Jedną z alternatywnych konstrukcji, łączących zalety konstrukcji drewnianych i betonowych jest konstrukcja hybrydowa; wg Rinne i in. taka konstrukcja plasuje się pod względem śladu węglowego pomiędzy konstrukcją drewnianą a żelbetową, będąc jednocześnie bardziej dostępną opcją projektową [7].

Charakterystyka analizowanego budynku

Analizowano dom jednorodzinny w konstrukcji mururowanej, wolnostojący, niepodpiwniczony z wbudowanym garażem. Ma on dwie kondygnacje nadziemne: parter i poddasze użytkowe. Powierzchnia użytkowa wynosi 154,3 m², a wysokość budynku, liczona od poziomu gruntu przy głównym wejściu do budynku do kalenicy, 8,33 m. Rzut budynku przedstawiono na rysunku 1. Przeanalizowano konstrukcję mururowaną i drewnianą szkieletową tego budynku. Najważniejsze dane konstrukcyjno-materiałowe przedstawiono w tabeli 1.

W obu typach konstrukcji przegrody zewnętrzne zostały zaprojektowane tak, aby wartości współczynników przenikania ciepła *U* były zbliżone. Wyjściowym wariantem jest budynek

starting variant is a building with a brick structure, while the layers of the frame building partitions have been adjusted using available components [8]. The calculated heat transfer coefficients of the external partitions are summarized in Table 2. They comply with the technical conditions of 2021 [9].

Analysis method

The environmental impact of the building was determined by conducting a life cycle assessment (LCA). The analysis is based on ISO 14040 and ISO 14044, which define the framework and principles of its implementation. Table 3 shows the life cycle phases, which according to PN-EN 15978 are divided into 4 stages: production (modules A1–A3), construction (modules A4–A5), use (modules B1–B7), end of life (modules C1–C4) and potential benefits or burdens beyond the system boundaries (module D).

The LCA analysis of the building, included in the article covers the following phases: A1–A3: extraction of raw materials, transportation to the production site and production processes; B4: exchange of materials during the life cycle of the building; B6: operational energy consumption; C1–C4: end-of-life phase including deconstruction, transportation to the waste treatment plant, treatment and disposal. Based on table 2.1 from Eurocode 0 [10], a 50-year service life of the building was assumed.

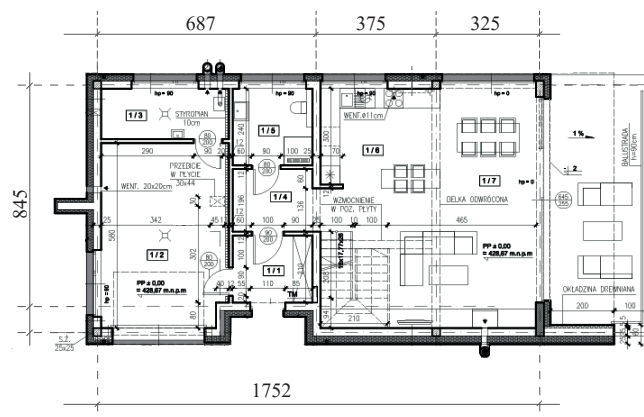


Fig. 1. Ground plan of the building under analysis
Rys. 1. Rzut parteru analizowanego budynku

w konstrukcji murowanej, natomiast warstwy przegród budynku szkieletowego zostały dopasowane, z wykorzystaniem dostępnych produktów [8]. Obliczone współczynniki przenikania ciepła przegród zewnętrznych zestawiono w tabeli 2. Są one zgodne z warunkami technicznymi z 2021 r. [9].

Metoda analizy

Wpływ budynku na środowisko oceniono, przeprowadzając ocenę cyklu życia LCA (ang.

Life Cycle Assessment). Podstawą do sporządzenia analizy są normy ISO 14040 oraz ISO 14044, które definiują ramy i zasady jej przeprowadzania. Tabela 3 przedstawia fazy cyklu życia, które zgodnie z normą PN-EN 15978 dzielą się na 4 stadia: produkcji (moduły A1–A3), konstrukcji (moduły A4–A5), użytkowania (moduły B1–B7), końca życia (moduły C1–C4) oraz potencjalnej korzyści lub obciążenia poza granicami systemu (moduł D).

W analizie LCA budynku, zamieszczonej w artykule, znalazły się fazy: A1–A3: wydobycie surowców, transport do zakładu produkcyjnego oraz procesy produkcyjne; B4: wymiana materiałów w trakcie cyklu życia budynku; B6: operacyjne zużycie energii; C1–C4: faza końca życia obejmująca dekonstrukcję, transport do zakładu przetwarzania odpadów, przetwarzanie oraz utylizację. Na podstawie tabeli 2.1 z Eurocode 0 [10] przyjęto pięćdziesięcioletni okres użytkowania budynku.

Wybór faz do analizy uzasadniony jest dostępnością danych oraz istotnością poszczególnych faz w całym cyklu życia. Obli-

Table 1. Structural and material data of the compared buildings in masonry and timber frame construction

Tabela 1. Dane konstrukcyjno-materiałowe porównywanych budynków w konstrukcji murowanej i drewnianej szkieletowej

Description of construction and material specifications	Masonry construction	Timber frame construction
Foundations	Pad and strip foundations made of reinforced C16/20 concrete, lean concrete C12/15	Pad and strip foundations made of reinforced C16/20 concrete, lean concrete C12/15
Slab on the ground	Reinforced concrete floor on sand and gravel bed, insulated with expanded polystyrene (EPS)	Reinforced concrete floor on sand and gravel bed, insulated with wood fiber boards
External wall	Clay blocks wall (25 cm) on cement-lime mortar, insulated with expanded polystyrene (EPS), finished with thin-layer plaster on the outside and smooth cement-lime plaster on the inside	Construction with wood fiber thermal insulation, stabilized with boards; sill plate and top plate
Internal wall	Clay block wall (11.5 cm) with cement-lime mortar	Beam posts filled with insulation, covered with plasterboard
Slab	Wet-cast reinforced concrete floor (18 cm) made of C20/25 concrete	Beam construction, wood fiber insulation
Roof	Rafter-purlin construction made of pine wood, insulated with mineral wool. Cement tiles are used as roofing.	Rafter-purlin construction: rafters with insulation mats; insulation board for over-rafter insulation. Cement roof tiles are used as roofing.
Window and door joinery	Triple-glazed windows in aluminum frames, aluminum exterior doors, wooden interior doors	Triple-glazed windows in wooden frames, aluminum exterior doors, wooden interior doors

The selection of phases for analysis is justified by the availability of data and the significance of individual phases in the overall life cycle. The calculations for phases A1–A3 and C1–C4 were based on Environmental Product Declarations (EPDs) from the publicly available databases of the Building Research Institute (ITB), the International EPD System, OEKOBADAT, and the IBU. Materials produced in Poland were selected as a priority, while declarations from foreign manufacturers were used in case of lack of data.

Phase B4 concerns the replacement of materials with a shorter lifespan than the assumed building life cycle. Operational energy consumption in phase B6 was assumed based on the results of the building energy performance certificate, prepared in accordance with applicable regulations [11].

Embodied and operational carbon emissions

The impacts in the life cycle of a building can be divided into embodied and operational impacts, although these terms are most often used in the context of carbon dioxide, i.e. embodied carbon and operational carbon:

- **Embodied carbon** is defined as the carbon emissions associated with the materials and construction processes over the life cycle of a building or infrastructure. It covers the following life cycle phases: A1–A5, B1–B5, C1–C4;

- **operational carbon**, which is the carbon dioxide emission resulting from energy and fuel consumption in the building's use phase (B6) [12].

Two main environmental indicators resulting from the life cycle analysis were analyzed:

1) **GWP_{total}** (Total Global Warming Po-

Table 2. U-values of external envelope elements of buildings in brick and timber frame construction

Tabela 2. Współczynniki przenikania ciepła U elementów obudowy zewnętrznej budynków w konstrukcji murowanej i drewnianej szkieletowej

External partition	Heat transfer coefficient U [W/m ² ·K]	
	Brick construction	Timber frame construction
External wall no. 1	0.17	0.17
External wall no. 2	0.14	0.14
Internal wall	0.33	0.32
Slab on the ground	0.22	0.23
Ceiling above 1st floor	0.14	0.14
Ceiling above ground floor	0.36	0.34
Roof	0.14	0.14
Terrace	0.19	0.19
External window	0.90	0.90
External door	1.30	1.30

zienia faz A1–A3 oraz C1–C4 bazowały na deklaracjach środowiskowych produktów EPD (ang. Environmental Product Declaration), pochodzących z ogólnodostępnych baz ITB, International EPD System, OEKOBADAT, IBU. Priorytetowo wybierane były materiały produkowane w Polsce, natomiast w przypadku braku danych wykorzystano deklaracje producentów zagranicznych.

Faza B4 dotyczy wymiany materiałów, których trwałość jest krótsza niż przyjęty cykl życia budynku. Operacyjne zużycie energii w fazie B6 zostało przyjęte na podstawie wyników świadectwa charakterystyki energetycznej budynku, wykonanego zgodnie z obowiązującymi przepisami [11].

Emisje wbudowane i operacyjne

Oddziaływania w cyklu życia budynku można podzielić na wbudowane i operacyjne, choć najczęściej określa się tych używa się w kontekście dwutlenku węgla, tzw. węgiel wbudowany (ang. embodied carbon) i węgiel operacyjny (ang. operational carbon):

- **węgiel wbudowany**, to emisja dwutlenku węgla związana z materiałami i procesami budowlanymi w całym cyklu życia budynku lub infrastruktury. Obejmuje następujące fazy cyklu życia: A1–A5, B1–B5, C1–C4;

- **węgiel operacyjny**, to emisja dwutlenku węgla wynikająca ze zużycia energii i paliw w fazie użytkowania budynku (B6) [12].

Przeanalizowano **2 główne wskaźniki środowiskowe** będące wynikiem analizy cyklu życia:

1) **GWP_{total}** (ang. Total Global Warming Potential, całkowity potencjał tworzenia efektu cieplarnianego), określany również jako **ślad węglowy**, wyrażony w kg ekwiwalentu CO₂ oraz

Table 3. Life cycle phases. Own draft based on PN-EN 15978 standard

Tabela 3. Fazy cyklu życia. Opracowanie własne na podstawie normy PN-EN 15978

Product stage	Construction stage	Use stage	End of life	Benefits and loads beyond the system boundaries
A1	Raw material supply	Use	Deconstruction / Demolition	Potential for reuse, recovery or recycling
A2	Transport	Maintenance	Transport	
A3	Manufacturing	Repair	Waste processing	
A4	Transport to construction site	Replacement	Disposal	
A5	Construction and installation process	Refurbishment		
B1		Operational energy use		
B2		Operational water use		
B3				
B4				
B5				
B6				
B7				
C1				
C2				
C3				
C4				
D				

tential), also referred to as **carbon footprint**, expressed in kg of CO₂ equivalent and

2) **PENRT** (Total non-renewable primary energy demand), also referred to as **primary energy**, expressed in MJ.

In the analysis, the **global warming potential** was calculated separately for

- **fossil**, i.e. emissions from the combustion of fossil fuels, and
- **biogenic**, i.e. related to the emission and sequestration of biogenic carbon stored in plants during their growth as a result of photosynthesis.

According to the PN-EN 15804+A2 standard, the results for the global warming potential are given separately for fossil and biogenic sources. The aim is to raise awareness of the emissions of biogenic natural materials. The calculation method used for biogenic carbon is the so-called $-1/+1$ method, according to which the absorption of carbon dioxide is defined as -1 kg CO₂ eq. CO₂ per kg CO₂ absorbed from the atmosphere (included in module A1), while at the end of the life cycle, all the carbon dioxide stored in the material is released, which is characterized by $+1$ kg CO₂ eq. per kg CO₂ absorbed from the atmosphere. Regardless of the end-of-life scenario (reuse, recycling, incineration or landfill), the life cycle emission balance is 0 CO₂ eq. per kg CO₂ absorbed from the atmosphere [13]. This method was adopted in the calculations presented in the article.

Results and analysis

The **actual state** defines the analyzed building in two construction types, with the actual energy consumption in the operating phase. The data from the energy performance certificates are shown in Table 4. The operational phase varies depending on the type of construction, as the energy performance calculation takes into account the thermal mass, which in a massive building causes the accumulation of thermal energy and thus reduces energy demand. The results, broken down into embodied and operational impacts, are shown in Table 5.

The primary embodied energy over the life cycle accounts for 24% of the total primary energy for the masonry construction and 21% of the total primary energy for the timber construction. Over the entire life cycle, a timber structure has a 7% lower carbon footprint and 1% lower primary energy than

Table 4. The results of the energy performance certificates for actual state

Tabela 4. Wyniki świadectw charakterystyki energetycznej stanu faktycznego

Energy performance certificate	Structure	
	Brick	Timber frame
Usable energy demand factor [kWh/(m ² ·year)]	55.2	58.1
Final energy demand factor [kWh/(m ² ·year)]	93.4	97.0
Non-renewable primary energy factor [kWh/(m ² ·year)]	115.1	119.2

2) **PENRT** (ang. Total non-renewable primary energy demand, całkowite zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną), określany również jako **energia pierwotna**, wyrażony w MJ.

W analizie **potencjał tworzenia efektu cieplarnianego** został obliczony z rozróżnieniem na:

- **kopalny**, czyli emisje związane ze spalaniem paliw kopalnych, oraz
- **biogeniczny**, czyli związany z emisją oraz sekwestracją węgla biogenicznego zgromadzonego w roślinach podczas ich wzrostu w wyniku fotosyntezy.

Zgodnie z normą PN-EN 15804+A2 wyniki dotyczące potencjału tworzenia efektu cieplarnianego podaje się osobno w przypadku źródeł kopalnych i biogenicznych. Ma to na celu zwiększenie świadomości na temat emisji biogenicznych materiałów pochodzenia naturalnego. Metodą obliczeń wykorzystywaną w przypadku węgla biogenicznego jest tzw. metoda $-1/+1$, wg której pochłanianie dwutlenku węgla jest określone jako -1 kg ekw. CO₂ na kg CO₂ pochłoniętego z atmosfery (uwzględnione w module A1), natomiast na końcu cyklu życia cały dwutlenek węgla zgromadzony w materiale zostaje uwolniony, co charakteryzuje się $+1$ kg ekw. CO₂ na kg CO₂ pochłoniętego z atmosfery. Niezależnie od scenariusza końca życia materiału (ponowne wykorzystanie, recykling, spalanie czy składowanie), bilans emisji w cyklu życia jest równy 0 ekw. CO₂ na kg CO₂ pochłoniętego z atmosfery [13]. Taka metoda została przyjęta w obliczeniach przedstawionych w artykule.

Wyniki i ich analiza

Stan faktyczny określa analizowany budynek w dwóch typach konstrukcji, z faktycznym zużyciem energii w fazie operacyjnej. Dane ze świadectw charakterystyki energetycznej przedstawiono w tabeli 4. Faza operacyjna różni się w zależności od rodzaju konstrukcji, ponieważ w obliczeniach charakterystyki energetycznej uwzględniono masę termiczną, która w budynku masywnym powoduje akumulację energii cieplnej, a tym samym zmniejsza zapotrzebowanie na energię. Wyniki z podziałem na parametry wbudowane i operacyjne przedstawiono w tabeli 5.

Ślad węglowy wbudowany w całym cyklu życia stanowi 36% całkowitego śladu węglowego w przypadku konstrukcji murowanej i 29% całkowitego śladu węglowego w przypadku

Table 5. Results of the LCA analysis in the actual state

Tabela 5. Wyniki analizy LCA w przypadku stanu faktycznego

	GWP total [kg CO ₂ eq] for:		PENRT [MJ] for:	
	brick structure	timber frame structure	brick structure	timber frame structure
Embodied	98 117	73 730	1 035 354	880 082
Operational	176 983	182 893	3 196 787	3 310 383
Total	275 099	256 623	4 232 142	4 190 465
Total per m² per year	36	33	549	543

a brick structure. The results broken down by life cycle phase are shown in Figure 2.

Redevelopment of the analyzed building to a zero-energy standard. A zero-energy building is one whose primary energy demand is zero. Renewable energy sources play an important role in it. In the analyzed case, it was assumed that the heat source would be an air-to-water heat pump with an electric compressor and an electric heater, powered by a photovoltaic system, which generates enough electricity throughout the year to drive the heat pump. The energy demand indicators from the energy performance certificates are shown in Table 6. In such a building, the operational carbon footprint and operational primary energy are zero. Therefore, only the embodied carbon footprint and embodied primary energy are analyzed in the life cycle. The results are shown in Table 7.

The results for the actual state showed that the operational phase accounts for the majority of the carbon footprint and primary energy in the life cycle. Depending on the type of construction, the share of use stage varies from 64 to 71% for the carbon footprint and from 76% to 79% for primary energy. The wooden building has a 7% lower carbon footprint and 1% less primary energy over its life cycle. In the case of a zero-energy building, the operational phase is reduced to zero. The analysis then focuses on the embodied carbon footprint and embodied primary energy, where the timber building achieves the lowest result – 25% lower for the carbon footprint and 15% lower for the primary energy. These results are achieved assuming a zero biogenic carbon balance over the life cycle (carbon dioxide sequestration in phase A1 is balanced by carbon dioxide emissions in phase C).

The relationship between absorbed and emitted carbon dioxide over the life cycle is worth illustrating, as shown in Figure 3. Fossil greenhouse gases are fully emitted, while biogenic gases are absorbed in the initial phase and emitted in the final phase of the life cycle.

Conclusions

In accordance with the EPBD, buildings will use less and less energy during their use phase. New buildings will be subject to stricter requirements regarding the primary energy factor (EP), and existing buildings with the worst energy performance will undergo thermomodernization [3]. As the energy

konstrukcji drewnianej. Energia pierwotna wbudowana w cyklu życia stanowi 24% całkowitej energii pierwotnej w przypadku konstrukcji murowanej i 21% całkowitej energii pierwotnej w przypadku konstrukcji drewnianej. W całym cyklu życia konstrukcja drewniana charakteryzuje się o 7% mniejszym śladem węglowym oraz o 1% mniejszą energią pierwotną niż konstrukcja murowana. Wyniki z podziałem na fazy cyklu życia przedstawiono na rysunku 2.

Przeprojektowanie analizowanego budynku do standardu zeroenergetycznego.

Budynek zeroenergetyczny to taki, którego zapotrzebowanie na energię pierwotną jest równe zero. Istotną rolę odgrywają w nim odnawialne źródła energii. W analizowanym przypadku założono, że źródłem ciepła będzie pompa ciepła powietrze-woda, sprężarkowa elektryczna z grzałką elektryczną, zasilana z instalacji fotowoltaicznej, która w ciągu roku wytwarza wystarczającą ilość energii elektrycznej potrzebnej do napędu pompy ciepła. Wskaźniki zapotrzebowania na energię ze świadectw charakterystyki energetycznej przedstawiono w tabeli 6. W takim budynku operacyjny ślad węglowy oraz operacyjna energia pierwotna są równe zero. W cyklu życia

analizowane są zatem tylko wbudowany ślad węglowy i wbudowana energia pierwotna. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.

Wyniki w przypadku stanu faktycznego wskazały na przeważający udział fazy operacyjnej w śladzie węglowym i energii pierwotnej w cyklu życia. W zależności od typu konstrukcji udział użytkowania waha się od 64 do 71% w przypadku śladu węglowego oraz od 76% do 79% w przypadku energii pierwotnej. Budynek drewniany charakteryzuje się o 7% mniejszym śladem węglowym i o 1% mniejszą energią pierwotną w cyklu życia. W przypadku budynku zeroenergetycznego udział fazy operacyjnej maleje do zera. Analizie podlega wtedy wbudowany ślad węglowy i wbudowana energia pierwotna, gdzie niższy wynik osiąga budynek w konstrukcji drewnianej – o 25% w przypadku śladu węglowego i o 15% w przypadku energii pierwotnej. Wyniki takie są osiągnięte przy założeniu zerowego bilansu węgla biogenicznego w cyklu życia (sekwestracja dwutlenku węgla w fazie A1 jest równoważona przez emisję dwutlenku węgla w fazie C).

Warta zobrazowania jest relacja pomiędzy pochłoniętym a wyemitowanym dwutlenkiem węgla w cyklu życia, co przedstawiono na rysunku 3. W pełni emitowane są kopalne gazy cieplarniane, natomiast gazy biogeniczne są pochłaniane w początkowej i emitowane w końcowej fazie cyklu życia.

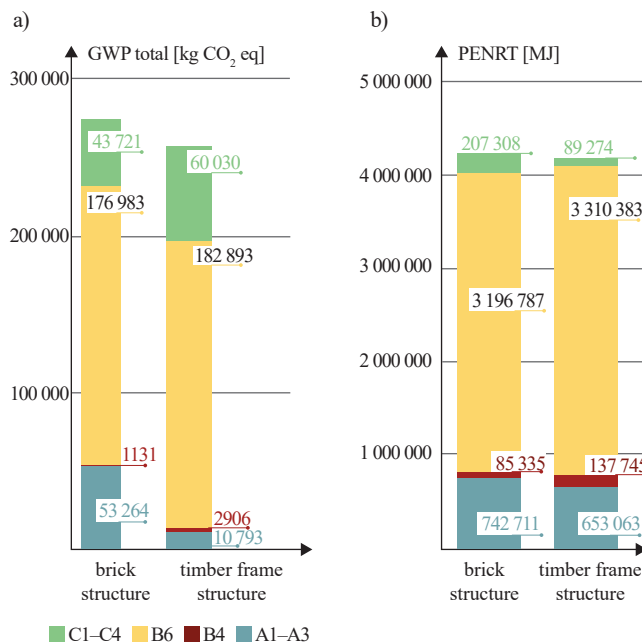


Fig. 2. Carbon footprint (a) and primary energy (b) by life cycle phases

Rys. 2. Ślad węglowy (a) i energia pierwotna (b) z podziałem na fazy cyklu życia

Table 6. Energy demand factors from energy performance certificates for a zero-energy building

Tabela 6. Wskaźniki zapotrzebowania na energię ze świadectw charakterystyki energetycznej w przypadku budynku zeroenergetycznego

Energy performance certificate	Structure	
	Brick	Timber frame
Usable energy demand factor [kWh/(m ² ·year)]	55.2	58.1
Final energy demand factor [kWh/(m ² ·year)]	39.6	40.9
Non-renewable primary energy factor [kWh/(m ² ·year)]	0.0	0.0

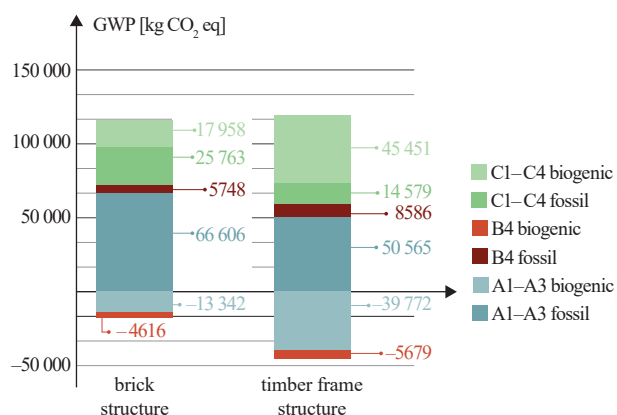


Fig. 3. Embodied Global Warming Potential (GWP) including fossil and biogenic carbon

Rys. 3. Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) wbudowany z uwzględnieniem węgla kopalnego i biogenicznego

efficiency of buildings increases, the embodied carbon footprint and embodied energy over the life cycle, and thus their minimization, will become more important. The two main strategies for reducing the embodied carbon footprint are to reduce the amount of materials used and to use low-carbon materials. The first strategy involves reducing the weight of the materials used, e.g. by optimizing structural elements or eliminating certain finishing materials. Low-carbon materials, on the other hand, can include natural, recycled or locally produced materials. The earlier the decision is made to analyze the building's environmental impact, preferably during the design phase or even the concept phase, the better the outcome. This is crucial for choosing the optimal design and selecting the best materials.

Table 7. Results of the LCA analysis for a zero-energy standard
Tabela 7. Wyniki analizy LCA w przypadku standardu zeroenergetycznego

	GWP total [kg CO ₂ eq] for:		PENRT [MJ] for:	
	brick structure	timber frame structure	brick structure	timber frame structure
Embodied	98 117	73 730	1 035 354	880 082
Operational	0	0	0	0
Total	98 117	73 730	1 035 354	880 082
Total per m² per year	13	10	113	114

Wnioski

Zgodnie z dyrektywą EPBD, budynki będą zużywać coraz mniej energii w fazie użytkowania. Nowe budynki, ponieważ wymagany wskaźnik nieodnawialnej energii pierwotnej EP będzie coraz bardziej restrykcyjny, a budynki istniejące o najgorszej charakterystyce energetycznej będą poddawane termomodernizacji [3]. Wraz ze zwiększaniem efektywności energetycznej budynków na znaczeniu zyskiwać będą wbudowany ślad węglowy i wbudowana energia w cyklu życia, a tym samym ich minimalizacja. Dwie główne strategie redukcji wbudowanego śladu węglowego to ograniczenie ilości wykorzystanych materiałów oraz zastosowanie materiałów niskoemisyjnych. Pierwsza polega na redukcji masy użytych materiałów np. przez optymalizację elementów konstrukcyjnych lub rezygnację z niektórych materiałów wykończeniowych. Do materiałów niskoemisyjnych można z kolei zaliczyć materiały naturalne, pochodzące z recyklingu lub produkowane lokalnie. Im wcześniej, najlepiej już na etapie projektowania lub nawet powstawania koncepcji, podejmie się decyzję o przeanalizowaniu wpływu budynku na środowisko, tym lepsze efekty można osiągnąć. Jest to kluczowe z punktu widzenia doboru optymalnej konstrukcji oraz doboru materiałów. ▶

This paper was co-financed under the research grant of the Warsaw University of Technology supporting the scientific activity in the discipline of Civil Engineering, Geodesy and Transport.

Publikacja została sfinansowana w ramach grantu badawczego Politechniki Warszawskiej, wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Received: 13.12.2024
Revised: 14.01.2025
Published: 25.04.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 13.12.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.01.2025 r.
Opublikowano: 25.04.2025 r.

Literature

- [1] <https://architecture2030.org/why-the-building-sector/>, date of access: 11.03.2025
- [2] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of May 19, 2010 on the energy performance of buildings, 2010
- [3] RICS. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD): overview. 2024; <https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/latest-news/RICS-EPBD-oveview.pdf>
- [4] Duan Z, Huang Q, Zhang Q. Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320>
- [5] Moschetti R, Brattebø H, Sparrevik M. Exploring the pathway from zero-energy to zero-emission building solutions: A case study of a Norwegian office building. *Energy Build*. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.047>
- [6] Skullestad JL, Bohne RA, Lohne J. (2016). High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure – A comparative LCA of structural system alternatives. *Energy Procedia*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>
- [7] Rinne R, Ilgin HE, Karjalainen M. Comparative study on life-cycle assessment and carbon footprint of hybrid, concrete and timber apartment buildings in Finland. *International journal of environmental research and public health*. 2022; <https://doi.org/10.3390/ijerph19020774>
- [8] Komorowski M. Manual for designing and building with STEICO. Basics. Building physics. Installation recommendations, III. Warsaw. 2020
- [9] Regulation of the Minister of Infrastructure and Construction of November 14, 2017, amending the regulation on the technical conditions to be met by buildings and their location (DzU z 2017 r., poz. 2285)
- [10] EN 1990:2004, Basis of structural and geotechnical design, 2004
- [11] Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of February 27, 2015, on the methodology for determining the energy performance of a building or part of a building and energy performance certificates, as amended
- [12] Adams M, Burrows V, Richardson S, Drinkwater J, Gamboa C, Collin C, Le Den X, Riemann LO, Porter S, Secher AQ. Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. World Green Building Council. 2019
- [13] Andersen CME, Garnow A, Sørensen CG, Wittchen A, Stranddorf LK, Hoxha E, Rasmussen, FN, Birgisdottir, H. Whole Life Carbon Impact of: 45 Timber Buildings. Department of the Built Environment, Aalborg University, København.