

dr inż. arch. Michał Pierzchalski^{1)*}

ORCID: 0000-0001-8329-9252

dr hab. inż. Arkadiusz Węglarz²⁾

ORCID: 0000-0002-6356-7712

dr inż. Paweł Gilewski³⁾

ORCID: 0000-0002-6533-9203

mgr inż. Bernard Płomiński⁴⁾

Impact of bio-based thermal insulation products on the carbon footprint over the building life cycle

Wpływ biopochodnych wyrobów termoizolacyjnych na ślad węglowy w całym cyklu życia budynku

DOI: 10.15199/33.2024.12.21

Abstract. With the decarbonisation of the building sector, interest in natural insulation products is growing. This paper analyses the lifecycle carbon footprint of a single-family home for insulation made from various bio-based and traditionally used products. The simulations showed that the use of bio-based products for insulation reduces the carbon footprint over the life cycle of the building. Including the D-phase in the simulations always leads to a reduction in total emissions.

Keywords: carbon footprint; bio-based materials; LCA; WLC; embodied carbon.

Insulation materials contribute to improving the energy efficiency of buildings, resulting in lower energy demand and reduced greenhouse gas emissions during operation. The manufacturing processes of construction products also produce greenhouse gas emissions. However, embodied emissions vary from one construction product to another, as indicated by the data summarized in Tables 2-4. Embodied emissions are those that occur in phases A1-A3 and B4 of the building life cycle indicated in the Table 1. Thermal insulation materials of natural origin (biobased) can provide high energy efficiency of a building with low embodied carbon emissions. Biobased materials, are products consisting mainly of substances derived from living matter (biomass) that occurs naturally or is synthesized, often derived from renewable resources such as plants, animals or microorganisms.

In recent years, there has been a growing interest in natural construction products. Examples are composites based on cardboard waste, shives and plant fibres [1]. The use of natural fibres can be beneficial due to the low embodied carbon footprint due to CO₂ sequestration. Textile and agricultural waste can be used to produce insulation materials in line with the circular economy [2]. Studies show that appropriate mixtures of

Streszczenie. W związku z dekarbonizacją sektora budowlanego zwiększa się zainteresowanie naturalnymi wyrobami izolacyjnymi. W artykule przeanalizowano ślad węglowy w całym cyklu życia budynku jednorodzinne w przypadku zastosowania izolacji z różnych wyrobów biopochodnych i tradycyjnie wykorzystywanych. Przeprowadzone symulacje wykazały, że wyroby biopochodne zmniejszają ślad węglowy w całym cyklu życia budynku. Uwzględnienie fazy D w symulacjach zawsze powoduje zmniejszenie całkowitego poziomu emisji.

Słowa kluczowe: ślad węglowy; wyroby biopochodne; LCA; WLC; wbudowane emisje.

Materiały izolacyjne przyczyniają się do poprawy efektywności energetycznej budynków, co w efekcie zmniejsza zapotrzebowanie na energię oraz emisję gazów cieplarnianych podczas ich eksploatacji. Produkcja wyrobów budowlanych również powoduje emisję gazów cieplarnianych. W fazach A1-A3 oraz B4 (tabela 1) cyklu życia budynku występuje tzw. emisja wbudowana, która jest różna w przypadku różnych wyrobów (tabele 2 i 3). Materiały termoizolacyjne pochodzenia naturalnego (biopochodne) mogą zapewniać dużą efektywność energetyczną budynku przy małej wbudowanej emisji dwutlenku węgla. Materiały biopochodne to produkty składające się głównie z substancji pochodzących z materii żywej (biomasy), która występuje naturalnie lub jest syntetyzowana, często pochodzącej z odnawialnych zasobów, takich jak rośliny, zwierzęta czy mikroorganizmy.

W ostatnich latach zwiększa się zainteresowanie wyrobami budowlanymi pochodzenia naturalnego, takimi jak kompozyty na bazie odpadów kartonowych, paździerz i włókien roślinnych [1]. Wykorzystanie włókien naturalnych może być korzystne ze względu na mały wbudowany ślad węglowy z powodu sekwestracji CO₂. Tekstylne i rolne odpady można wykorzystać do produkcji materiałów izolacyjnych zgodnie z gospodarką o obiegu zamkniętym [2]. Badania pokazują, że odpowiednie mieszanki surowców roślinnych zapewniają izolacyjność cieplną taką, jak tradycyjne wyroby oraz stabilność wymiarową [1 – 5], choć mogą mieć większą przewodność cieplną niż deklarowana przez producentów [6].

W artykule dokonano przeglądu dostępnych wybranych wyrobów izolacyjnych pochodzenia naturalnego oraz wykonano

¹⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Architecture

²⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering

³⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Building Services, Hydro and Environmental Engineering

⁴⁾ The National Energy Conservation Agency (KAPE)

* Correspondence address: michal.pierzchalski@pw.edu.pl

Table 1. Life cycle stages of a building. Embodied emissions include stages A1-A3 and B4 (replacement during use). Own study based on the standard PN-EN 15804+A1:2014-041

Tabela 1. Etapy cyklu życia budynku. Emisja wbudowana obejmuje fazy A1-A3 oraz B4 (wymiana w trakcie eksploatacji). Opracowanie własne na podstawie normy PN-EN 15804+A1:2014-04

Construction works assessment information/Etapy cyklu życia budynku																
product stage/ faza wyrobu			construction process stage/ faza budowy		use stage/faza użytkowania							end of life stage/faza końca życia				suppl. info benefits/ korzyści
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Raw material supply/ Dostawa surowców	transport/ transport	Manufacturing/ wytwarzanie	transport/ transport	construction-installation process/ instalacja, wbudowanie	use/ użytkowanie	maintenance/ konserwacja	repair/ naprawa	replacement/ wymiana	refurbishment/ renowacja	operational energy use/ zużycie energii podczas użytkowania	operational water use/ zużycie wody podczas użytkowania	deconstruction demolition/ rozbiórka	transport/ transport	waste processing/ przetwarzanie odpadów	disposal/ usuwanie odpadów	reuse, recovery, recycling potential /potencjał ponownego wykorzystania, odzysku i recyklingu

Table 2. Construction products in the form of hardboards made of bio-based raw materials. Own study based on EPDs type III

Tabela 2. Wyroby budowlane w postaci twardej płyty wykonanych z surowców biopochodnych. Opracowanie własne na podstawie deklaracji środowiskowych EPD typu III

Product/Produkt	Density [kg/m ³]/ Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Thermal conductivity λ _d [W/mK]/Przewodność cieplna λ _d [W/mK]	GWP A1-A3 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP C3-C4 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP D [kgCO ₂ eq/m ³]	EPD type III No./ Źródło danych nr deklaracji EPD
Wood fibreboard (Prod. 1)/ Płyta z włókna drzewnego (Prod. 1)*	230	0,050	206,89	0,18	-47,61	278/2021
Wood fibreboard (Prod. 2)/ Płyta z włókna drzewnego (Prod. 2)	170	0,040	152,92	0,13	-35,19	278/2021
Wood fibreboard (Prod. 3)/ Płyta z włókna drzewnego (Prod. 3)	230	0,047	-242,29	385,98	-204,13	EPDSON20220210ICCIEN
Wood fibreboard (Prod. 4)/ Płyta z włókna drzewnego (Prod. 4)*	270	0,048	-133,99	470,74	-207,78	EPD-STE-202-00174-IBA1-EN
Straw boards (Prod. 5)/ Płyty ze słomy (Prod. 5)	140	0,043	-89,97	216,84	-71,16	21-0123-002-00.00-EN
Straw boards (Prod. 6)/ Płyty ze słomy (Prod. 6)*	240	0,049	-128,69	371,66	-125,14	21-0123-001.00.00-EN

* wyroby oznaczone grubą czcionką zostały użyte do dalszych analiz śladu węglowego w całym cyklu życia budynku

plant raw materials provide thermal insulation like traditional products and dimensional stability [1-5], although they may have a higher thermal conductivity than declared by manufacturers [6].

The article reviews the available selected insulation products of natural origin and calculates the total carbon footprint on the example of a single-family residential building. A comparison of the use of natural insulating materials with typical insulation materials used in timber frame buildings, i.e. mineral wool, was made.

Literature research

A review of the literature shows that attempts are being made to use a variety of natural resources. For example, flax and hemp (both fibres and shives) are used [1, 4, 7, 15], cereal straw [1, 7, 15], reed [1, 4, 7], snail shells [7], nut shells, coconut [9], cork [1, 8, 15], wood fibre [1, 4], cellulose [4], cotton [1, 4], textile fibres (natural) [1, 4], rice husk [1], eucalyptus leaves [1], sheep's and goat's wool [1, 9], horsehair [9], corn stalks [1], cereal bran [1], banana leaves [1], bamboo

obliczenia całkowitego śladu węglowego na przykładzie jednorodzinne budynek mieszkalnego. Ponadto porównano zastosowanie naturalnych materiałów izolacyjnych z typowymi materiałami izolacyjnymi, jakie się stosuje w szkieletowych budynkach drewnianych, czyli wełną mineralną.

Przegląd literatury

Z przeglądu literatury wynika, że podejmowane są próby wykorzystania różnorodnych surowców naturalnych. Wykorzystuje się np. len i konopie, zarówno włókna, jak i paździerz [1, 4, 7, 15], słomę zbóż [1, 7, 15], trzcinę [1, 4, 7], muszle ślimaków [7], łupiny orzechów, kokos [9], korek [1, 8, 15], włókno drzewne [1, 4], celulozę [4], bawełnę [1, 4], włókna tekstylne (naturalne) [1, 4], łuskę ryżową [1], liście eukaliptusa [1], wełnę owczą i kozią [1, 9], włosie końskie [9], łodygi kukurydzy [1], otręby zbóż [1], liście bananowca [1], bambus [1], korę drzew [1], kenaf [1], trawę, w tym włókna alfa (trawa esparto) [1, 15], liście ananasa i eukaliptusa [1], trzcinę cukrową [9], tekturę [9], włókna jutowe [9], łodygi słonecznika [10] czy mech [5].

Table 3. Construction products in the form of soft insulating boards made of bio-based raw materials. Own study based on EPDs type III
 Tabela 3. Wyroby budowlane w postaci miękkich płyt izolacyjnych wykonanych z surowców biopochodnych. Opracowanie własne na podstawie deklaracji środowiskowych EPD typu III

Product/Produkt	Density [kg/m ³]/ Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Thermal conductivity λ_d [W/mK]/Przewodność cieplna λ_d [W/mK]	GWP A1-A3 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP C3-C4 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP D [kgCO ₂ eq/m ³]	EPD type III No./ Źródło danych nr deklaracji EPD
Hemp wool (Prod. 7)/ Włna konopna (Prod. 7)	36	0,041	-20,3	55,8	-24,4	BAU-EPD-Hempflax- 2022-1-GaBi
Hemp wool (Prod. 8)/ Włna konopna (Prod. 8)	35	0,039	-20,64	16,95	-	EPD-197
Grass insulation (Prod. 9)/ Izolacja z trawy (Prod. 9)^{2*}	40	0,041	-50,55	91,24	-16,6	23.0183.001-01. 00.01
Hemp wool (Prod. 10)/ Włna konopna (Prod. 10)	35	0,040	-22,2	-	-	S-P-02290
Textile insulation (Prod. 11)/ Izolacja z tekstyliów (Prod.11)	25	0,037	-11,21	29,93	-1,09	20231135682
Cellulose board (Prod. 12)/ Płyta celulozowa (Prod. 12)^{2*}	32-42	0,039	-14,00	0	56,92	S-P-08315
Hemp wool (Prod. 13)/ Włna konopna (Prod. 13)	35	0,04	-68,1	87,8	25,7	S-P-10546
Wood fibres board (Prod. 14)/Płyta z włókien drzewnych (Prod. 14)^{2*}		0,036	-28,7	78,3	-40,10	EPD-STE-20200175- IBA1-EN
Wood fibres board (Prod. 15)/Płyta z włókien drzewnych (Prod. 15)^{2*}	55	0,038	1,63	261,00	-208,00	EPD-PAV-20150043- IBA2-EN

^{2*} wyroby oznaczone grubą czcionką zostały użyte do dalszych analiz śladu węglowego w całym cyklu życia budynku

[1], tree bark [1], kenaf [1], grass, including alpha fibres (Esparto grass) [1, 15], pineapple and eucalyptus leaves [1], sugar cane [9], cardboard [9], jute fibres [9], sunflower stalks [10] or moss [5].

Bio-based products made of raw materials found in Poland, such as hemp fibres and shives, cellulose, cereal straw, wood fibre, grass, were selected for further analyses. Only products with Type III EPDs are included due to full information on their emissions. The emission data indicated in Type III EPDs are not 100% comparable. Calculations can occur for selected lifecycle phases (e.g. and selected phases, all lifecycle phases).

Materials with different structures were considered – hard and soft boards and loose insulation. In the case of hard boards, natural raw materials are present together with other components to form composites. In the case of soft insulation, other additives represent a small proportion – mainly for the purpose of achieving a compact structure, biological and fire protection.

Tables 1, 2 and 3 present a list of products with an indication of the basic physical characteristics, and an indication of the embodied greenhouse gas emission rate in the product phase A1 to A3, the end of life phase C3 and C4 and the potential for reuse and recycling D. Individual values have been recalculated to obtain a uniform indicator expressed in kg CO₂ eq. for 1 m³ of finished product. There are significant differences in the GWP of individual bio-based products, which do not differ significantly in physical characteristics, but only in the production and location of the production site. The differences in GWP may indicate a different energy mix – both electricity and the share from renewable energy.

Do dalszych analiz wytypowano wyroby biopochodne wykonane z surowców występujących w Polsce, takich jak włókna i paździerz konopne, celuloza, słoma zbóż, włókno drzewne, trawa. Uwzględniono tylko wyroby posiadające deklaracje EPD typu III ze względu na pełną informację o ich emisji. Dane o emisji wskazane w deklaracjach EPD typu III nie są w 100% porównywalne. Obliczenia mogą dotyczyć wybranych faz lub wszystkich faz cyklu życia budynku. Analizowano materiały o różnej strukturze – płyty twarde i miękkie oraz izolacje w postaci luźnej. W przypadku twardych płyt surowce naturalne występują wraz z innymi komponentami, tworząc kompozyty, a w przypadku izolacji miękkiej inne dodatki stanowią niewielki udział. Są one dodawane głównie w celu uzyskania zwartej struktury, ochrony biologicznej i przeciwpożarowej.

W tabelach 1, 2 oraz 3 podano podstawowe cechy fizyczne wyrobów oraz wskaźnik wbudowanej emisji gazów cieplarnianych w fazach: A1-A3 wyrobu, C3 i C4 końca cyklu życia oraz potencjału ponownego użycia i recyklingu D. Poszczególne wartości przeliczono, aby uzyskać jednolity wskaźnik wyrażony w kg CO₂eq. w przypadku 1 m³ gotowego wyrobu. Poszczególne wyroby biopochodne, które nie różnią się znacznie cechami fizycznymi, a jedynie producentem i lokalizacją miejsca produkcji, mają znacznie różne wskaźniki GWP. Można to wskazywać na różny miks energetyczny (energii elektrycznej oraz energii z OZE). Wartości ujemne GWP w fazach A1-A3 (faza wyrobu) oznaczają, że w poszczególnych etapach cyklu życia wyrób budowlany pochłania więcej gazów cieplarnianych, niż emituje. W przypadku wyrobów pochodzenia roślinnego związane jest to z procesem sekwestracji dwutlenku węgla w trakcie wzrostu roślin. W fazie D ujemna war-

Negative GWP values in phases A1-A3 (product phase) mean that at each stage of the life cycle, the construction product absorbs more greenhouse gases than it emits. In the case of products of plant origin, this is related to the process of carbon dioxide sequestration during plant growth. In phase D, a negative value can result from reuse, recovery or recycling. Carbon sequestration can only be included in a building's carbon footprint calculation for a full life cycle analysis.

Most of the bio-based products listed in the tables contain additives, e.g. sodium hydroxide or sodium carbonate (flame retardants), added to increase resistance to mould and fungi and to repel pests, as well as to increase resistance to fire. Other chemical compounds used for this purpose may be aluminium hydroxide compounds, ammonium salts [14]. Another common addition of soft insulation in the form of boards are polyethylene, polypropylene or polyester fibres (about 8%). During welding, they bind natural fibres, thanks to which the board maintains the assumed cuboid form. In the case of hard boards, polyurethane adhesives (e.g. 4,4'-diphenylmethanediisocyanate) (approx. 1.5 – 3.5%) and paraffin waxes (approx. 0.5 – 3.0%) are used instead of plastic fibres. The use of these additives, in particular plastic fibres and polyurethane adhesives, prevents biodegradation after demolition, e.g. through composting or fermentation, as there is a risk of introducing microplastics into the environment. This also makes it difficult to recycle this type of product.

Whole life cycle carbon footprint analysis

In order to determine the share of GHG emissions for individual products in the entire life cycle of the building, a detailed BIM model of a single-family residential building was created in ARCHICAD. A two-storey building without a basement was designed, set on a reinforced concrete foundation slab. The building was designed in timber frame technology. The total area of the building is 183.15 m², the net area with adjustable temperature is 126.68 m². The energy standard of the building is nZEB. In Poland, the nZEB standard was defined in the National Plan to increase the number of low-energy buildings from 2015. According to the Plan, it is a building in accordance with the provisions of the Regulation of the Minister of Infrastructure on the technical conditions to be met by buildings and their location (Journal of Laws 2022.0.1225, as amended), which came into force on January 1, 2021. The building has a heating system using a ground source heat pump, a mechanical supply and exhaust ventilation system with recuperation and does not have a cooling system.

For the purposes of the analysis, seven variants of thermal insulation of the model building were adopted:

- W1 – glass mineral wool insulation with a high thermal conductivity coefficient $\lambda_d = 0.040$ [W/mK];
- W2 – insulation made of wool, grass and straw;
- W3 – wood wool insulation (products with a high carbon footprint and high thermal conductivity);

tość może wynikać z ponownego wykorzystania, odzysku lub recyklingu. Sekwestracja dwutlenku węgla może być uwzględniana w obliczeniach śladu węglowego budynku tylko w przypadku analizy pełnego cyklu życia.

Większość wymienionych w tabelach wyrobów biopochodnych zawiera dodatki, np. wodorotlenek sodu lub węgiel sodu (uniepalniacze), dodawane w celu zwiększenia odporności na pleśń i grzyby oraz odporności na ogień, a także odstraszania szkodników. Innymi stosowanymi w tym celu związkami chemicznymi mogą być związki boru, wodorotlenek glinu oraz sole amonowe [14]. Kolejnym często spotykanym dodatkiem do miękkiej izolacji w postaci płyt są włókna polietylenowe, polipropylenowe lub poliestrowe (ok. 8%). Podczas zgrzewania wiążą one włókna naturalne, dzięki czemu płyta utrzymuje formę prostopadłościanu. W przypadku twardych płyt zamiast włókien z tworzyw sztucznych stosuje się kleje poliuretanowe, np. 4,4'-difenylometanodiizocyanian (ok. 1,5 – 3,5%) oraz woski parafinowe (ok. 0,5 – 3,0%). Stosowanie tych dodatków, a szczególnie włókien z tworzyw sztucznych oraz klejów poliuretanowych, uniemożliwia biodegradację po rozbiórce np. przez kompostowanie czy fermentację, gdyż pojawia się ryzyko wprowadzenia mikroplastiku do środowiska. Utrudnia to również recykling tego typu wyrobów.

Analiza śladu węglowego w całym cyklu życia

W celu określenia udziału emisji GHG z poszczególnych wyrobów w całym cyklu życia budynku wykonano szczegółowy model BIM w programie ARCHICAD jednorodzinny budynek mieszkalny. Zaprojektowano drewniany budynek dwukondygnacyjny w technologii szkieletowej, niepodpiwniczony, posadowiony na żelbetowej płycie fundamentowej. Powierzchnia całkowita budynku wynosi 183,15 m², a powierzchnia netto o regulowanej temperaturze 126,68 m². Standard energetyczny budynku to nZEB. W Polsce standard ten został zdefiniowany w Krajowym Planie z 2015 r. mającym na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii. Budynek taki jest zgodny z obowiązującymi w Polsce przepisami Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022.0.1225 z późn. zm.), które weszły w życie 1 stycznia 2021 r. Budynek wyposażony jest w instalację grzewczą wykorzystującą gruntową pompę ciepła oraz instalację wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z rekuperacją, natomiast nie ma instalacji chłodzenia.

Na potrzeby analizy przyjęto siedem wariantów wykonania izolacji termicznej modelowego budynku:

- W1 – izolacja ze szklanej wełny mineralnej o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_d = 0,040$ [W/mK];
- W2 – izolacja z wełny z traw i słomy;
- W3 – izolacja z wełny drzewnej (produkty o dużym śladzie węglowym i współczynniku przewodzenia ciepła);
- W4 – izolacja z wełny drzewnej (produkty o niższym niż w W3 śladzie węglowym i współczynniku przewodzenia ciepła);
- W5 – izolacja celulozowa (w postaci luźnej);

- W4 – wood wool insulation (products with a lower carbon footprint and thermal conductivity coefficient than in W3);
- W5 – cellulose insulation (in loose form);
- W6 – an additional variant with glass mineral wool insulation with a low thermal conductivity coefficient $\lambda_d = 0.035$ [W/mK];
- W7 – an additional variant with insulation made of rock wool with a low thermal conductivity coefficient $\lambda_d = 0.035$ [W/mK].

Tables 2 ÷ 4 list selected physical parameters given by manufacturers in EPDs of type III. In the case of thermal conductivity, it is assumed that the values declared by manufacturers are λ_d declarations. Only in one case did the authors of the EPD provide two values: the declared value and the calculation value. This applies to wood fibre panels (Prod. 3), where $\lambda_d = 0.047$ and $\lambda_{calc} = 0.049$ [W/mK]. According to the PN-EN ISO 10456:2009 standard, the design value is a value that takes into account specific external and internal conditions, including aging, which can be considered typical of this product after being built into the building envelope. Such values should be taken in energy performance calculations. An amendment of +0.002 [W/mK] for all thermal insulation products was adopted for the energy performance calculations.

Calculations of the designed energy performance of the buildings indicated that the buildings achieved the EP index from 64.7 kWh/m² year (building W4) to 66.3 kWh/m² year (building W3). The calculations were made with the Audytor OZC 7.0 Pro program in accordance with the methodology described in the Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of 27 February 2015 on the methodology for determining the energy performance of a building or part of a building and energy performance certificates (Journal of Laws of 2015, item 376).

In the external walls, the insulation in the front wall is 4 cm thick, between the structural posts 15 cm, and in the roof the insulation between the rafters is 24 cm. The above thicknesses remain unchanged in all variants. The thickness of the layer of additional insulation in the walls in the form of panels – constituting additional thermal insulation and acting as

- W6 – dodatkowy wariant z izolacją ze szklanej wełny mineralnej o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_d = 0,035$ [W/mK];
- W7 – dodatkowy wariant z izolacją ze skalnej wełny mineralnej o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_d = 0,035$ [W/mK].

W tabelach 2 ÷ 4 zestawiono wybrane parametry fizyczne podane przez producentów w deklaracjach EPD typu III. W przypadku przewodności cieplnej założono, że podawane przez producentów to wartości deklarowane λ_d . Tylko w jednym przypadku autorzy deklaracji EPD podali dwie wartości – deklarowaną oraz obliczeniową. Dotyczy to płyt z włókna drzewnego (Prod. 3), gdzie $\lambda_d = 0,047$, a $\lambda_{obl} = 0,049$ [W/mK]. Zgodnie z normą PN-EN ISO 10456:2009 wartość obliczeniowa to wartość uwzględniająca określone warunki zewnętrzne i wewnętrzne, a także starzenie, którą można uznać za typową po wbudowaniu tego wyrobu w przegrodę budynku. Takie wartości należy przyjmować w obliczeniach charakterystyki energetycznej. Do obliczeń zaprezentowanych w artykule przyjęto poprawkę +0,002 [W/mK] w przypadku wszystkich wyrobów termoizolacyjnych.

Obliczenia projektowanej charakterystyki energetycznej wykazały, że budynki osiągnęły wskaźnik EP od 64,7 kWh/m²rok (budynek W4) do 66,3 kWh/m²rok (budynek W3). Obliczenia wykonano w programie Audytor OZC 7.0 Pro zgodnie z metodą opisaną w Rozporządzeniu w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376).

W ścianach zewnętrznych izolacja w przedściance ma grubość 4 cm, między słupkami konstrukcyjnymi 15 cm, a w dachu izolacja między krokwiami wynosi 24 cm. Taką grubość izolacji przyjęto we wszystkich wariantach. Zmienna jest tylko grubość dodatkowej warstwy izolacji w ścianach w postaci płyt, stanowiącej dodatkową izolację termiczną oraz pełniącą rolę wiatrochronną, a także dodatkowego ocieplenia podkrokwiowego w dachu.

W budynku referencyjnym (W1) oraz w dodatkowych wariantach W6 i W7 zastosowano przegrody zaizolowane termicznie przy użyciu wełny mineralnej skalnej i szklanej (tabela 5). Pozostałe wyroby budowlane użyte w poszczególnych wariantach

Table 4. List of construction products made of newspaper pulp (LFCI) and wood fibres (the bulk density of the product for which emission factors have been indicated is given in brackets) Own study based on EPDs type III

Tabela 4. Zestawienie wyrobów budowlanych w postaci luźnej wykonanych z celulozy gazetowej (LFCI) i włókien drzewnych (w nawiasach podano gęstość objętościową wyrobu, w przypadku którego wskazano wskaźniki emisyjności) Opracowanie własne na podstawie deklaracji środowiskowych EPD typu III

Product/Produkt	Density [kg/m ³]/ Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Thermal conductivity λ_d [W/mK]/Przewodność cieplna λ_d [W/mK]	GWP A1-A3 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP C3-C4 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP D [kgCO ₂ eq/m ³]	EPD type III No./ Źródło danych nr deklaracji EPD
Loose fill cellulose (Prod. 16)/ Celuloza (Prod. 16) ^{3*}	28-60 (35)	0,037	-46,55	56,7	-16,63	EPD-PSG- -20210030- -IBA1-DE
Loose fill cellulose (Prod. 17)/ Celuloza (Prod. 17)	26-60 (35)	0,038	-44,8	56,35	-31,12	RTS_150_21
Loose fill cellulose (Prod. 18)/ Celuloza luzem (Prod. 18)	26-65 (35)	0,038	-43,05	0	45,5	S-P-08311
Wood fibres (loose) (Prod. 19)/ Włókna drzewne (Prod. 19)	35-60 (35)	0,038	-13,99	51,1	-22,93	EPD-STE- 20200172- -IBA1-EN

^{3*} wyrób został użyty do dalszych analiz śladu węglowego w całym cyklu życia budynku

windproof, and in the roof – additional insulation under the rafters – is variable.

In the reference building (W1) and in the additional variants W6 and W7, thermally insulated partitions with the use of rock and glass mineral wool were used. Individual products for these variants are listed in Table 5.

Other construction products used in the building do not undergo significant changes in individual variants of buildings. Slight differences only concern the number of façade boards, which is a consequence of changes in the thickness of external walls. In the case of mineral wool insulation, a vapour-permeable windproof membrane with a low carbon footprint was additionally used. The products selected for analysis for individual variants are listed in Table 6 (walls) and Table 7 (roofs).

To determine the carbon footprint of the various alternatives, the authors performed Whole Life Carbon (WLC) calculations. WLC is an environmental analysis that takes into account greenhouse gas emissions (CO₂ equivalent) generated over the

building and do not undergo significant changes. Small differences concern only the number of facade boards, which is a consequence of changes in the thickness of external walls. In the case of mineral wool insulation, a vapour-permeable windproof membrane with a low carbon footprint was additionally used. The products selected for analysis for individual variants are listed in Table 6 (walls) and Table 7 (roofs). For calculations, a thermal conductivity correction factor of +0,002 [W/mK] was used.

To determine the carbon footprint of the various alternatives, the authors performed Whole Life Carbon (WLC) calculations. WLC is an environmental analysis that takes into account greenhouse gas emissions (CO₂ equivalent) generated over the

- calculations were performed according to the LCA method (ang. *Life Cycle Assessment*), described in the standard PN-EN 15978;

Table 5. Products used in variants W1, W6 and W7 of the building. Data based on EPDs type III

Tabela 5. Wyroby zastosowane w wariantach W1 oraz W6 i W7 budynku. Dane na podstawie deklaracji środowiskowych EPD typu III

Product/Produkt	Density [kg/m ³]/ Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Thermal conductivity λ_d [W/mK]/Przewodność cieplna λ_d [W/mK]	GWP A1-A3 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP C3-C4 [kgCO ₂ eq/m ³]	GWP D [kgCO ₂ eq/m ³]	EPD type III No./ Źródło danych nr deklaracji EPD
Glass wool (Prod.20)/Wełna mineralna szklana (Prod. 20)	17,5	0,040	16,9	0,38	–	156/2021
Rock wool (Prod. 21)/ Wełna mineralna skalna (Prod. 21)	no data available/ brak danych	0,035	32,00	0,50	-1,19	EPD-RW_07-2023_RW-CEE_EN-0001
Glass wool (Prod. 22)/Wełna mineralna szklana (Prod. 22)	19,1	0,035	13,40	3,08	-1,09	S-P-12769
Rock wool (Prod. 23)/Wełna mineralna skalna (Prod. 23)	no data available/ brak danych	0,035	101,33	1,57	-3,77	EPD-RW_07-2023_RW-CEE_EN-0001

Table 6. Thermal insulation products used in external walls in individual building variants. Own study

Tabela 6. Wyroby termoizolacyjne zastosowane w ścianach zewnętrznych w poszczególnych wariantach budynku. Opracowanie własne

Building variant/ Wariant budynku	Products used (1 - pre-wall insulation, 2 - insulation between structural posts, 3 - outer layer)/Zastosowane wyroby (1 – izolacja przedścianki, 2 – izolacja między słupkami konstrukcyjnymi, 3 – zewnętrzna warstwa)	Thermal conductivity λ_{calc} [W/mK]/ Przewodność cieplna λ_{obl} [W/mK]	Layer thickness [cm]/ Grubość warstwy [cm]	U-value [W/m ² K]/ Współczynnik U [W/m ² K]
W1	1 – glass wool (Prod. 20)/1 – wełna mineralna szklana (Prod. 20)	0,042	4	0,19
	2 – glass wool (Prod. 20)/2 – wełna mineralna szklana (Prod. 20)	0,042	15	
	3 – glass wool (Prod. 20)/3 – wełna mineralna szklana (Prod. 20)	0,042	4	
W2	1 – grass insulation (Prod. 9)/1 – izolacja z trawy (Prod. 9)	0,043	4	0,18
	2 – grass insulation (Prod. 9)/2 – izolacja z trawy (Prod. 9)	0,043	15	
	3 – straw boards (Prod. 6)/3 – płyty ze słomy (Prod. 6)	0,051	6	
W3	1 – wood wool (Prod. 15)/1 – wełna drzewna (Prod. 15)	0,040	4	0,20
	2 – wood wool (Prod. 15)/2 – wełna drzewna (Prod. 15)	0,040	15	
	3 – wood wool boards (Prod. 1)/3 – płyta z włókna drzewnego (Prod. 1)	0,052	1,8	
W4	1 – wood wool (Prod. 14)/1 – wełna drzewna (Prod. 14)	0,038	4	0,18
	2 – wood wool (Prod. 14)/2 – wełna drzewna (Prod. 14)	0,038	15	
	3 – wood wool boards (Prod. 3)/3 – płyta z włókna drzewnego (Prod. 3)	0,049	4	
W5	1 – cellulose board (Prod.12)/1 – celuloza płyta (Prod.12)	0,041	4	0,20
	2 – loose fill cellulose (Prod. 16)/2 – celuloza luzem (Prod. 16)	0,040	15	
	3 – wood wool boards (Prod. 4)/3 – płyta z włókna drzewnego (Prod.4)	0,050	2,2	
W6 (without layer 3)/ W6 (bez warstwy 3)	1 – glass wool (Prod. 21)/1 – wełna mineralna szklana (Prod. 21)	0,037	4	0,20
	2 – glass wool (Prod. 21)/2 – wełna mineralna szklana (Prod. 21)	0,037	15	
W7 (without layer 3)/ W7 (bez warstwy 3)	1 – rock wool (Prod. 21)/1 – wełna mineralna skalna (Prod. 21)	0,037	4	0,20
	2 – rock wool (Prod. 21)/2 – wełna mineralna skalna (Prod. 21)	0,037	15	

Table 7. Thermal insulation products used in the roof in individual building variants

Tabela 7. Wyroby termoizolacyjne zastosowane w dachu w poszczególnych wariantach budynku

Building variant/Wariant	Applied products (A – insulation between rafters, B – extra layer under the rafters)/Zastosowane wyroby (A – izolacja między krokiewkami, B – dodatkowa warstwa pod krokiewkami)	Thermal conductivity λ_{calc} [W/mK]/ Przewodność cieplna λ_{obl} [W/mK]	Layer thickness [cm]/ Grubość [cm]	U-value [W/m ² K]/ Współczynnik U [W/m ² K]
W1	A – glass wool (Prod. 20)/A – wełna mineralna szklana (Prod. 20)	0,042	24	0,15
	B – glass wool (Prod. 20)/B – wełna mineralna szklana (Prod. 20)	0,042	5	
W2	A – grass insulation (Prod. 9)/A – izolacja z trawy (Prod. 9)	0,043	24	0,15
	B – grass insulation (Prod. 9)/B – izolacja z trawy (Prod. 9)	0,043	6	
W3	A – wood fibres board (Prod.15)/A – izolacja z włókien drzewnych (Prod.15)	0,040	24	0,15
	B – wood fibres board (Prod.15)/B – izolacja z włókien drzewnych (Prod.15)	0,040	4	
W4	A – wood fibres board (Prod.14)/A – izolacja z włókien drzewnych (Prod.14)	0,038	24	0,15
	B – wood fibres board (Prod.14)/B – izolacja z włókien drzewnych (Prod.14)	0,038	4	
W5	A – loose fill cellulose (Prod. 16)/A – celuloza luzem (Prod. 16)	0,039	24	0,15
	B – cellulose board (Prod.12)/B – celuloza płyta (Prod.12)	0,041	4	
W6	A – glass wool (Prod. 22)/A – wełna mineralna szklana (Prod. 22)	0,037	24	0,14
	B – glass wool (Prod. 22)/B – wełna mineralna szklana (Prod. 22)	0,037	4	
W7	A – rock wool (Prod. 23)/A – wełna mineralna skalna (Prod. 23)	0,037	24	0,14
	B – rock wool (Prod. 23)/B – wełna mineralna skalna (Prod. 23)	0,037	4	

entire life cycle of a building (according to the LCA methodology and with the phases indicated in Table 1). The following assumptions were made in the calculations:

- the calculations were performed in accordance with the LCA (Life Cycle Assessment) methodology described in EN 15978;
- stages A4-A5 were calculated for variant W1 and this value was applied to the other variants without change. It was assumed that transportation and processes would be very similar for all variants, and the differences would not significantly affect the entire building life cycle;
- emission factors for bio-based products and mineral wool were adopted from Type III EPDs. For other products, emission factors from the ÖKOBAUDAT database were used;
- emissions for life cycle stages: Product stage A1-A3, Operational energy use B6, Endoflife stages C1-C2, C3-C4, and element D (reuse, recovery, recycling potential) were adopted from Type III EPDs and data from the ÖKOBAUDAT database;
- the following operational phases were omitted: B1, B2,

B3, B4, B5, and B7. The main reason for this was the significant differences in the values in the EPD declarations due to different assumptions, as well as the total lack of data for the phases in the individual EPD declarations and the ÖKOBAUDAT database;

- a building life cycle of 50 years was assumed.

The results of the calculations are summarized in Table 8 and shown in graphs (Figure).

Table 8. Calculation results in individual stages of the building variants' life cycle

Tabela 8. Wyniki obliczeń w poszczególnych fazach cyklu życia wariantów budynku

Building variant/Wariant budynku	A1-A3	A4-A5	B6	C1-C2	C3-C4	D	Total/ Łącznie	Total without D/ Łącznie bez D
	[Mg CO ₂ eq.]							
W1	-4,12	1,34	116,27	0,57	39,55	-16,03	137,58	153,62
W2	-11,57	1,34	115,39	0,69	46,67	-18,96	133,65	152,61
W3	-3,59	1,34	117,19	0,55	58,38	-31,67	142,19	173,87
W4	-9,82	1,34	114,38	0,56	44,99	-18,91	132,54	151,45
W5	-10,97	1,34	116,92	0,60	47,22	-18,75	136,36	155,11
W6	-3,93	1,34	116,74	0,55	39,13	-15,78	138,05	153,83
W7	-2,55	1,34	116,75	0,56	38,93	-15,78	139,25	155,03

- fazy A4-A5 obliczono w przypadku wariantu W1 i zastosowano tę wartość w pozostałych wariantach bez zmian. Przyjęto, że transport i procesy będą bardzo podobne we wszystkich wariantach, a różnice nie wpłynęłyby istotnie na cały cykl życia budynku;

- wskaźniki emisji wyrobów biopochodnych oraz wełny mineralnej przyjęto z deklaracji środowiskowych EPD typu III. W przypadku pozostałych wyrobów użyto wskaźników emisyjności z bazy ÖKOBAUDAT;

- emisja w przypadku faz cyklu życia: fazy wyrobu A1-A3, fazy użytkowania B6; fazy końca życia C1-C2, C3-C4 oraz element D (ponowne użycie, odzysk, recykling) przyjęto z deklaracji środowiskowych EPD typu III oraz danych z bazy ÖKOBAUDAT;

- pominięto następujące fazy operacyjne: B1; B2; B3; B4; B5, a także B7. Głównym powodem były znaczne różnice wartości w deklaracjach EPD, spowodowane przyjęciem różnych założeń, a także całkowity brak danych w przypadku faz w poszczególnych deklaracjach EPD oraz bazie ÖKOBAUDAT;

szczególnych deklaracjach EPD oraz bazie ÖKOBAUDAT;

- przyjęto cykl życia budynku (faza B6) 50 lat.

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 8 oraz na rysunku.

Wyniki analizy WLC

Analiza WLC wykazała, że warianty z wykorzystaniem biopochodnych wyrobów termoizolacyjnych (W2, W4, W5 z wyjątkiem W3) charakteryzują się niższym pozio-

WLC analysis results

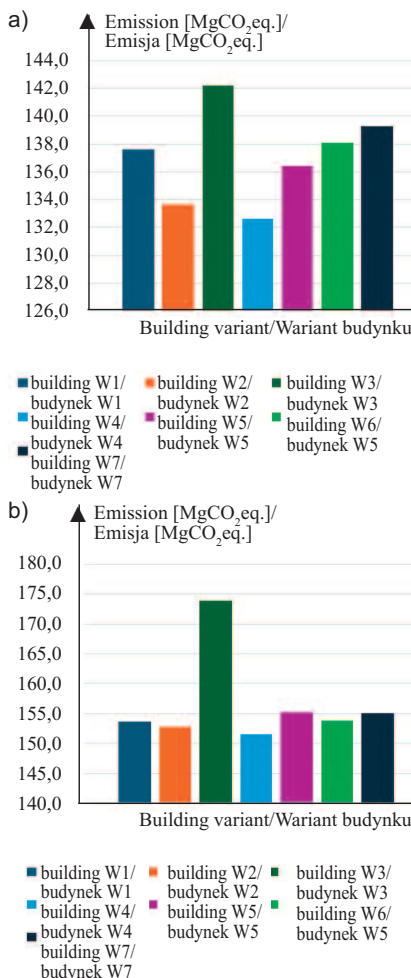
The WLC analysis indicates that variants using bio-based thermal insulation products (W2, W4, W5 except W3) have lower emissions over the entire life cycle, but only if we take into account element D. Regardless of whether we take into account phase D, the lowest emission level is for the W4 variant.

The high emissions of the W3 variant may be due to the fact that the generation processes are energy-intensive and the final energy comes from high-emission sources. The EPD does not include information about taking into account CO₂ sequestration and how to calculate the A1-A3 product phase. However, there is information that 261.3 kg of CO₂ equivalent stored in the fibreboard leaves the product system in module C3.

For the rock wool variants, the W7 variant achieved the highest level of greenhouse gas emissions. This is due to the production processes of rock wool, for which basalt rock is used, for which melting points are higher than glass mass. In addition, coke is used in the production processes, unlike glass wool, where natural gas or electricity is used. A significant share of recycled raw material (cullet) in the case of glass wool is also important [11 – 12].

End of Life Analysis (Phase D)

The concept of the circular economy is a technical and organizational solution in which products, materials and raw materials remain in circulation for as long as possible, while minimizing waste generation. According to [16], Module D covers the potential environmental burdens or benefits of reusing building components, or recycling, beyond the life cycle of the facility. Therefore, this module can be a measure of the extent to which a model building meets the assumptions of the circular economy. In order for module D to be a real measure of the circular economy, it is necessary to determine the amount of emissions that can be avoided in the future due to the reuse of a given building element or recycling. It is practically impossible to determine this value precisely because the technologies that will be common in 50 years for phase A1-A3 and phase D are currently unknown. Since manufacturers of building materials and elements do not provide detailed descriptions of the anticipated solutions in phase D, the current methods or technologies that can be used in phase D are already described below for individual material variants.



Comparison of the carbon footprint over the entire life cycle of the building (50 years): a) including element D; b) excluding element D

*Own calculations
Porównanie śladu węglowego w całym cyklu życia budynku (50 lat): a) łącznie z elementem D; b) bez uwzględniania elementu D*

Obliczenia własne

mem emisji w całym cyklu życia niż pozostałe, ale tylko jeśli uwzględnimy element D. Natomiast bez względu na to, czy uwzględnimy fazę D, najniższy poziom emisji ma wariant W4. Wysoka emisja wariantu W3 może wynikać z tego, że procesy wytwórcze są energochłonne, a energia końcowa pochodzi ze źródeł wysokoemisyjnych. W deklaracji EPD nie ma informacji o uwzględnieniu sekwestracji CO₂ i sposobie liczenia faz wyrobu A1-A3. Jest natomiast informacja, że 261,3 kg ekwiwalentu CO₂ zmagazynowanego w płycie pilśniowej opuszcza produkt w fazie C3.

W przypadku wariantów z zastosowaniem skalnej wełny mineralnej wariant W7 osiągnął najwyższy poziom emisji gazów cieplarnianych. Wynika to procesów wytwórczych wełny skalnej, do której wykorzystuje się skałę bazaltową, w przypadku której temperatura topnienia jest wyższa niż masy szklanej. Dodatkowo w procesach produkcyjnych wykorzystuje się koks w odróżnieniu od wełny szklanej, gdzie używa się gazu ziemnego lub energii elektrycznej. Znaczenie ma również duży udział surowca z recyklingu (stłuczki szklanej) w przypadku wełny szklanej [11 – 12].

Analiza końca cyklu życia (faza D)

Koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym to rozwiązanie techniczno-organizacyjne, w którym produkty i surowce pozostają w obiegu możliwie jak najdłużej. Zgodnie z [16], moduł D obejmuje potencjalne obciążenia lub korzyści dla środowiska wynikające z ponownego wykorzystania elementów budynku lub ich recyklingu. Moduł ten może

być więc miarą stopnia, w jakim modelowy budynek spełnia założenia gospodarki cyrkularnej. Aby moduł D był rzeczywistą miarą gospodarki cyrkularnej, konieczne jest określenie wielkości emisji, której uda się w przyszłości uniknąć w związku z ponownym wykorzystaniem danego elementu budynku lub jego recyklingiem. Precyzyjne określenie tej wartości jest praktycznie niemożliwe, ponieważ nie są obecnie znane technologie, jakie będą powszechne za 50 lat w przypadku faz A1-A3 i fazy D. Z tego powodu do liczbowego oszacowania wartości emisji w fazie D posłużyły deklaracje EPD III. W związku z tym, że producenci materiałów i elementów budowlanych nie podają dokładnych opisów przewidywanych rozwiązań w fazie D, opiszemy obecne sposoby lub technologie, których można będzie użyć w fazie D w przypadku poszczególnych wariantów materiałowych.

Kluczowe materiały wykorzystane we wszystkich wariantach materiałowych:

- drewno, jeśli jest odpowiednio zabezpieczone, to przetrwa założony pięćdziesięcioletni okres eksploatacji budynku.

Key materials used in all material variants:

■ **wood**, if properly protected, will relatively easily survive the assumed 50-year life of the building. After cleaning, the wood can be used directly in the new construction. Other wooden elements of the building, on the other hand, can be processed into wood-based products. In Poland, there are many lines where post-consumer wood is thoroughly cleaned of metals and plastics, and then shredded into chips used in the production of chipboards. The last wooden elements can be used to produce energy through: gasification, direct combustion, use in cogeneration devices, etc.;

■ **glass** that can be handed over to a window glass factory or a glass wool factory in the form of cullet.

Key materials used in individual material variants:

■ **variants: W1, W6 and W7**; In these variants, the dominant insulation material is mineral wool and glass wool. These materials can be used in thermal modernization as granules designed to blow air into voids, flat roofs, spaces between rafters, etc. Demolition mineral wool can also be used to produce heat-absorbing mortar or geopolymer [13].

■ **variant: W2**; Thermal insulation made of grass and straw, depending on the degree of contamination after the demolition of the building, will be used to produce energy in the cogeneration process or composted and used in agriculture;

■ **variant: W3**; It is assumed that the wood fibre panels (Prod. 15) will burn in the cogeneration process after the demolition of the building;

■ **variant: W4**; The management of fibreboard or wood wool boards may include: material recycling, reuse or production of fuel used in biomass boilers;

■ **variant: W5**; Cellulose, both in the form of boards and in bulk, is a completely ecological material, made from recycled paper. After the demolition of the building, it can be reused or recycled materially.

Other materials obtained from the demolition of a model building, such as metals, plastics and concrete aggregate, etc. They are usually taken to recycling plants, where they are 100% further processed into products useful to the economy.

Some of the recycling technologies described above are not possible to use in Polish conditions due to legal conditions or the level of technology implementation, but the purpose of these descriptions was to show the advisability of counting the D phase in the carbon footprint methodology.

Conclusions

On the basis of the simulations carried out, the following conclusions can be formulated:

• the lowest emissions were achieved for the variant using bio-based materials based on wood wool insulation based on products with a low carbon footprint and low thermal conductivity (W4 variant);

• if phase D is not included in the WLC analysis, all the simulation results obtained are very similar to each other and, apart from the W4 variant, it is not possible to clearly determine which solution is the most advantageous;

Drewno po oczyszczeniu można w sposób bezpośredni wykorzystać w nowej konstrukcji. Inne drewniane elementy budynku można natomiast przetworzyć na produkty drewnopochodne. W Polsce istnieje wiele linii technologicznych, na których drewno użytkowe jest szczegółowo oczyszczane, a następnie wykorzystywane w produkcji płyt wiórowych. Elementy drewniane można też wykorzystać do produkcji energii przez zgazowanie, bezpośrednie spalanie, wykorzystanie w urządzeniach kogeneracyjnych itp.

■ **szkło**, które w postaci stłuczki szklanej może być przekazane do huty szkła okiennego lub fabryki wełny szklanej.

Kluczowe materiały wykorzystane we poszczególnych wariantach materiałowych:

■ **warianty: W1, W6 i W7**; w tych wariantach dominującym materiałem izolacyjnym jest wełna mineralna. Te materiały mogą być wykorzystane w termomodernizacji jako granulaty przeznaczone do wdmuchiwania w pustki powietrzne, stropodachy, przestrzenie między krokiewiami itp. Z porozbiórkowej wełny mineralnej można również produkować zaprawę ciepłochłonną lub geopolimer [13];

■ **wariant: W2**; izolacje cieplne z trawy i słomy, w zależności od stopnia zanieczyszczenia, zostaną wykorzystane po rozbiórce budynku do produkcji energii w procesie kogeneracyjnym lub będą kompostowane i wykorzystane w rolnictwie;

■ **wariant: W3**; zakłada się, że płyty z włókna drzewnego (Prod. 15) ulegną spaleniowi po rozbiórce budynku w procesie kogeneracyjnym;

■ **wariant: W4**; zagospodarowanie płyt pilśniowych lub z wełny drzewnej może obejmować recykling materiałowy, ponowne użycie lub produkcję paliwa wykorzystywanego w kotłach na biomase;

■ **wariant: W5**; celuloza, zarówno postaci płyt, jak i luzem jest materiałem całkowicie ekologicznym, wykonanym z recyklingu papieru. Po rozbiórce budynku może być ponownie wykorzystana lub poddana recyklingowi materiałowemu.

Inne materiały pozyskane z rozbiórki budynku, jak metale, tworzywa sztuczne oraz kruszywo betonowe itp. są zazwyczaj wywożone do zakładów recyklingu, gdzie w 100% ulegają dalszemu przetworzeniu. Niektóre z opisanych technologii recyklingu nie są możliwe do zastosowania w warunkach polskich ze względu na uwarunkowania prawne lub poziom wdrożenia technologii, ale celem tych opisów było pokazanie licznej fazy D w metodzie określenia śladu węglowego.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że:

• najniższy poziom emisji CO₂ osiągnięto w przypadku wariantu z wykorzystaniem materiałów biopochodnych bazujących na izolacji z wełny drzewnej na bazie produktów charakteryzujących się niskim śladem węglowym i niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła (wariant W4);

• w przypadku nieuwzględnienia fazy D w analizie WLC wszystkie otrzymane wyniki symulacji są do siebie bardzo podobne i poza wariantem W4 nie da się jednoznacznie stwierdzić, jakie rozwiązanie jest najkorzystniejsze. Dopiero przeprowadzenie pełnej analizy WLC, z uwzględnieniem fazy D, uwy-

- only a full WLC analysis with Phase D highlights the lower emission levels resulting from the use of bio-based materials compared to traditionally used materials;
- in each of the options considered, taking into account Phase D leads to a reduction in emissions. The level of this reduction ranges from 11 – 22% of total emissions;
- the use of bio-based construction products can reduce the carbon footprint over the entire life cycle of a building compared to standard solutions. However, not every bio-based construction product guarantees a reduction in the embodied carbon footprint;
- from the point of view of the circular economy, the insulation materials used in all variants can be easily used and reused. In particular, products made of natural materials are of great practical importance in terms of climate neutrality in the construction industry. They can be obtained locally (e.g. straw, grasses) and locally developed after the demolition of the building (e.g. for the production of thermal energy).

Received: 05.08.2024
Revised: 27.09.2024
Published: 20.12.2024

pułka niższy poziom emisji wynikający z zastosowania materiałów biopochodnych w porównaniu z tradycyjnie wykorzystywanymi;

- w każdym z rozpatrywanych wariantów uwzględnienie fazy D prowadzi do zmniejszenia poziomu emisji CO₂ o 11 – 22%;
- zastosowanie biopochodnych wyrobów budowlanych może spowodować zmniejszenie śladu węglowego w całym cyklu życia budynku w porównaniu ze standardowymi rozwiązaniami. Nie każdy biochodny wyrób budowlany gwarantuje jednak obniżenie wbudowanego śladu węglowego;
- z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym, materiały izolacyjne zastosowane we wszystkich wariantach mogą być w łatwy sposób zagospodarowane i wielokrotnie użyte. Szczególnie izolacje z materiałów naturalnych mają duże znaczenie praktyczne w aspekcie neutralności klimatycznej budownictwa. Można je pozyskać lokalnie (np. słoma, trawy) i lokalnie zagospodarować po rozbiórce budynku (np. do produkcji energii ciepłej).

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.08.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 27.09.2024 r.
Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

- [1] Cosentino L, Fernandes J, Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023; DOI: 10.3390/en16124676.
- [2] Savio L, Pennacchio R, Patrucco A, Manni V, Bosia D. Natural Fibre Insulation Materials: Use of Textile and Agri-food Waste in a Circular Economy Perspective. *Mater. Circ. Econ.* 2022; DOI: 10.1007/s42824-021-00043-1.
- [3] Bakatovich A, Gaspar F, Boltrushевич N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Constr. Build. Mater.* 2022; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
- [4] Grazieschi G, Asdrubali F, Thomas G. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Clean. Environ. Syst.* 2021; DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100032.
- [5] Bakatovich A, Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material. *Construction and Building Materials*. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116699.
- [6] Ranefjård O, Strandberg-de Bruijn PB, Wadsö L. Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden. *Materials (Basel)*. 2024; DOI: 10.3390/ma17092021.
- [7] Yadav M, and Agarwal M. Biobased building materials for sustainable future: An overview. *Mater. Today Proc.* 2021; DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.165.
- [8] Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy Build.* 2011; DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [9] Hetimy S, Megahed N, Eleinen OA, Elgheznavy D. Exploring the potential of sheep wool as an eco-friendly insulation material: A comprehensive review and analytical ranking. *Sustain. Mater. Technol.* 2023; p. e00812, 2024, DOI: 10.1016/j.susmat.2023. e00812.
- [10] Martínez B, Bernat-Maso E, L. Gil L. Applications and Properties of Hemp Stalk-Based Insulating Biomaterials for Buildings: Review, *Materials (Basel)*. 2023; DOI: 10.3390/ma16083245.
- [11] MIWO. Wełna mineralna w twoim domu. [Online]. <https://miwo.pl/ochrona-srodowiska/>
- [12] Steidl T, Krause P. Wełna w izolacji cieplnej: szklana, skalna, drzewna, a nawet owcza. *Inżynier Budownictwa*. 2013, [Online]. <https://inzynierbudownictwa.pl/welna-w-izolacji-cieplnej-szklana-skalna-drzewna-a-nawet-owcza/>.
- [13] Łażniewska-Piekarczyk B i in. Wełna mineralna perspektywy i bariery ponownego wykorzystania, we: Współczesne problemy ochrony środowiska i energetyki, M. Bogacka and K. Pikoń, Eds., Gliwice: Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śląska, 2021, pp. 167–176.
- [14] Fabijańska M, Zaorski R. Ekologiczne aspekty wykorzystania wybranych materiałów stosowanych jako izolacje termiczne – polemika. *Celulozowe izolacje termiczne*. *Izolacje*. 2015; 2 [Online]. <https://www.izolacje.com.pl/artykul/sciany-stropy/167852,ekologiczne-aspekty-wykorzystania-wybranych-materialow-stosowanych-jako-izolacje-termiczne-polemika>.
- [15] Bourbia S, Kazeoui H, Belarbi R. A review on recent research on bio-based building materials and their applications. *Mater Renew Sustain Energy*. 2023; DOI: 10.1007/s40243-023-00234-7.
- [16] Metodyka szacowania śladu węglowego budynków. *Izolacje*. 2023; 1, [Online] <https://www.izolacje.com.pl/artykul/ekologia-w-budownictwie/273038,metodyka-szacowania-slada-weglowego-budynkow>.