

mgr inż. Daniel Tomporowski<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-5641-6062

dr inż. Robert Kasner<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-6866-4741

# Analiza nakładów energetyczno-środowiskowych w cyklu życia budynku

## *Assessment of the environmental loads in the life cycle of a building*

DOI: 10.15199/33.2022.04.17

**Streszczenie.** Ciągły wzrost cen nośników energii, a także coraz ostrzejsze wymagania dotyczące emisyjności i energochłonności w budownictwie zmuszają do poszukiwania nowych rozwiązań, począwszy od pozyskiwania surowców, wytwarzania (budowania), użytkowania, a w konsekwencji zagospodarowania zasobów energetyczno-surowcowych zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju. Celem pracy była szczegółowa analiza oceny nakładów energetyczno-środowiskowych w cyklu istnienia wybranego budynku handlowego. To naukowe postępowanie analityczne przeprowadzono z użyciem metody Life Cycle Assessment. Wyniki analizy wskazują na dominujący wpływ etapu eksploatacji na środowisko. Szczególnie w tym obszarze należy prowadzić dalsze działania zmierzające do poprawy efektywności energetycznej, a w konsekwencji emisyjności budynków.

**Słowa kluczowe:** budynek handlowo-usługowy; budownictwo; Life Cycle Assessment (LCA); IMPACT 2002+; zrównoważony rozwój.

**Abstract.** The continuous price increase of energy raw material, as well as the growing requirements regarding the emission and energy consumption of buildings, force us to look for new solutions, starting from obtaining raw materials, producing (constructing), exploitation and consequently managing energy and raw materials in accordance with the assumptions of a circular and sustainable economy development. The goal of the study was a detailed analysis of the energy and environmental loads in the life cycle of an existing commercial building. This scientific analytical procedure was performed using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The results of the analysis show the dominant influence of the exploitation phase on the environment. Particularly in this area further measures should be taken to improve the energy efficiency and consequently the emissivity of buildings.

**Keywords:** service facility; civil engineering; Life Cycle Assessment (LCA), IMPACT 2002+; sustainable development

W ramach każdego typu działalności gospodarczej wykorzystywane są zasoby przyrody [1,2]. W procesach wytwarzania powstaje wiele różnych substancji oraz odpadów, które stanowią obciążenie powodujące istotne zmiany środowiska w określonym czasie [3 – 5]. Współcześnie większość państw i organizacji międzynarodowych intensyfikuje działania, mające na celu złagodzenie negatywnych skutków tego typu wpływu na otoczenie [2, 4, 6]. Niezbędne są do tego odpowiednie narzędzia oceny, które umożliwiają uwzględnianie pojawiających się problemów środowiskowych [7 – 9]. Podstawowe narzędzie stanowi analiza środowiskowa obejmująca pełny cykl istnienia, czyli LCA (*Life Cycle Assessment*) [10]. Po wprowadzeniu norm z rodziny ISO 14000, metoda LCA sta-

ła się bardziej znana na świecie [11 – 13]. Jest narzędziem oceny zapewniającym uzyskiwanie porównywalnych wyników analiz przy jednoczesnym rozpatrywaniu wielu różnych problemów środowiskowych [14 – 16].

Tematyka oceny nakładów środowiskowych w odniesieniu do obiektów budowlanych z wykorzystaniem metody LCA była już prowadzona w mniej lub bardziej ograniczonym zakresie [17 – 20]. Nadal jednak nie wypracowano skutecznych rozwiązań obniżania nakładów środowiskowych w obiektach handlowo-usługowych [21 – 23], dlatego też celem pracy była szczegółowa analiza oceny nakładów energetyczno-środowiskowych w cyklu istnienia wybranego budynku handlowego. Postępowanie przeprowadzono z wykorzystaniem metody LCA [24] i metody IMPACT 2002+ [16], uwzględniając trzy podstawowe fazy w cyklu życia budynku handlowo-usługowego: wytwarzanie, eksploatację i zagospodarowanie użytkowe w formie składowania i recyklingu [25, 26].

### Materiał i metody badań

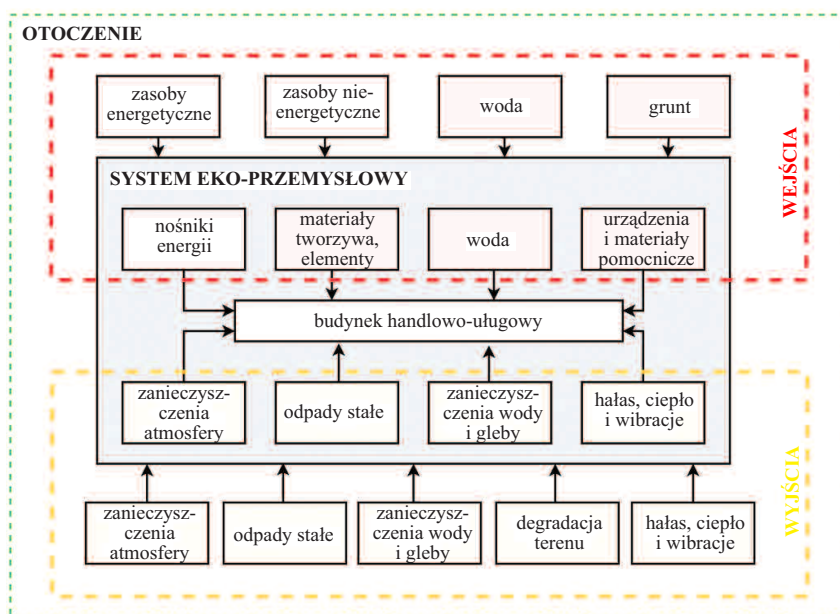
Badaniu poddano budynek handlowo-usługowy, zlokalizowany w miejscowości Janikowo (środkowa część Polski) wraz z drogami dojazdowymi, chodnikami i parkingiem. Zgodnie z rysunkiem 1 ogólne wejście do ekoprzemysłowego systemu obiektu stanowi zużycie zasobów energetycznych i nieenergetycznych, wody oraz użytkowanie gruntu. Wyjściami są natomiast generowane w cyklu istnienia emisje zanieczyszczeń do atmosfery, wody i gleby, odpady, ciepło, hałas, wibracje, promieniowanie oraz degradacja terenu [27].

W celu określenia skumulowanego obciążenia środowiska w cyklu istnienia budynku handlowo-usługowego konieczna jest znajomość ilości wykorzystywanych materiałów i elementów budowlanych, energii itd. oraz odpowiadających im wskaźników skumulowanego obciążenia. Całkowite skumulowane obciążenie otoczenia w cyklu istnienia budynku handlowo-usługowego (OjBHU) jest sumą:

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska; Wydział Inżynierii Łączącej i Środowiska

<sup>2)</sup> Politechnika Bydgoska; Wydział Inżynierii Mechanicznej

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: daniel.tomporowski@pg.edu.pl



**Rys. 1. Budynek handlowo-usługowy jako podsystem w eko-przemysłowym systemie obiektu**  
*Opracowanie własne na podstawie [10]*  
 Fig. 1. Retail and service building as a subsystem in the eco-industrial facility system

$$OjBHU = OwBHU + OeBHU + OzBHU \quad (1)$$

gdzie:

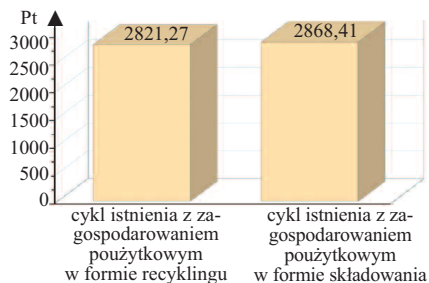
OwBHU – skumulowane obciążenie środowiska w fazie wytwarzania (w tym produkcja tworzyw, materiałów i elementów oraz wnoszenie obiektu budowlanego);  
 OeBHU – skumulowane obciążenie środowiska w fazie eksploatacji (z uwzględnieniem zużycia nośników energii i materiałów podczas użytkowania oraz okresowych remontów);  
 OzBHU – skumulowane obciążenie środowiska w fazie zagospodarowania użytkowego (np. w formie składowania na wysypisku odpadów lub recyklingu) [10].

Przebieg skumulowanego obciążenia otoczenia w czasie stanowi sumę obciążeń w poszczególnych fazach cyklu istnienia i jest obliczany na bazie znanej charakterystyki obiektu budowlanego oraz planu jego eksploatacji, który powinien zawierać precyzyjny opis wszystkich prac eksploatacyjnych, remontowych i odpowiadające im zużycie materiałów, nośników energii, wody itd. w założonym okresie eksploatacji [10].

## Wyniki

Otrzymane wyniki badań zaprezentowano z podziałem na trzy sekcje. Dane dotyczą całego cyklu istnienia z uwzględnieniem zagospodarowania użytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów lub recyklingu oraz z podziałem na poszczególne etapy cyklu istnienia (wytwarzanie, eksploatacja, składowanie, recykling). Grupowanie wyni-

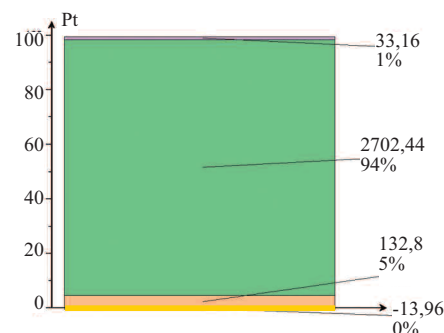
ków nastąpiło z zastosowaniem metody IMPACT 2002+ [16]. Otrzymane wartości poddano ważeniu oraz zsumowano, w celu wyznaczenia wagi efektu ekologicznego. Przeprowadzenie procesu ważenia pozwoliło na uzyskanie porównywalnych wyników w punktach środowiskowych (Pt). Cykl istnienia obiektu handlowo-usługowego, uwzględniający składowanie tworzyw, materiałów i elementów na wysypisku odpadów, wywierał łącznie więcej negatywnych następstw środowiskowych ( $2,87 \cdot 10^3$  Pt) w porównaniu z cyklem zagospodarowania użytkowego w formie recyklingu ( $2,82 \cdot 10^3$  Pt) (rysunek 2).



**Rys. 2. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanego budynku handlowo-usługowego, z uwzględnieniem formy zagospodarowania użytkowego**  
*Opracowanie autorskie*

Fig. 2. The results of grouping and weighing the environmental consequences occurring in the life cycle of the analyzed retail and service building, taking into account the form of post-use management

Z analizy poszczególnych etapów cyklu istnienia badanego obiektu wynika, że **eksploatacja stanowi największe źródło szkodliwego oddziaływania na otoczenie**. Jak już wspomniano, jest to spowodowane dużym zapotrzebowaniem na media, niezbędne do prawidłowego funkcjonowania budynku handlowo-usługowego – głównie gaz i energię elektryczną, która w Polsce jest wytwarzana przede wszystkim w procesach wykorzystujących konwencjonalne, kopalne źródła. Wynikają z tego niewielkie różnice w łącznym poziomie oddziaływania na otoczenie budynku z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania i recyklingu, ponieważ nakłady eksploatacyjne w obu przypadkach są porównywalne (rysunek 3).

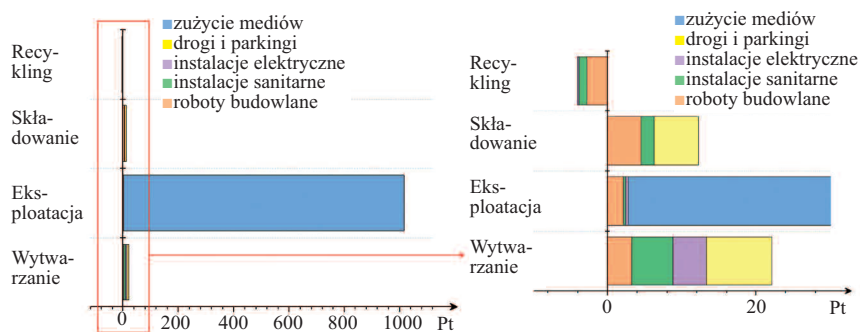


Oznaczenia: ■ recykling; ■ eksploatacja; ■ składowanie; ■ wytwarzanie

**Rys. 3. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych występujących w poszczególnych etapach cyklu istnienia analizowanego budynku handlowo-usługowego**  
*Opracowanie autorskie*

Fig. 3. The results of grouping and weighing the environmental consequences occurring at individual stages of the life cycle of the analyzed retail and service building

Współcześnie, zmiany klimatu stanowią jeden z kluczowych problemów ochrony środowiska na całym świecie. Najczęściej są one rozważane w kontekście globalnego ocieplenia powodowanego emisją gazów cieplarnianych (GHG). Jeden z najważniejszych czynników, sprzyjających pogłębieniu tego problemu, stanowi eksploatacja konwencjonalnych źródeł energii. Z tego względu, w cyklu istnienia obiektu handlowo-usługowego, zużycie mediów (wytwarzanych z konwencjonalnych źródeł) na etapie eksploatacji wyróżniało się najwyższym poziomem emisji związków powodujących globalne ocieplenie ( $1,01 \cdot 10^3$  Pt) (rysunek 4).



**Rys. 4.** Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych emisji związków powodujących globalne ocieplenie, występujących w cyklu istnienia analizowanego budynku handlowo-usługowego

*Opracowanie autorskie*  
Fig. 4. Results of grouping and weighing of the environmental consequences of emissions of compounds causing global warming, occurring in the life cycle of the analyzed retail and service building

## Podsumowanie i wnioski

W ostatnich latach można zaobserwować szczególnie dynamiczny wzrost znaczenia roli problemów z dziedziny ochrony środowiska, których nieuwzględnianie będzie powodowało w przyszłości m.in. powstawanie barier rozwoju gospodarczego. Nowe regulacje prawne oraz normy modyfikują dotychczasowe zasady działalności gospodarczej, odnosząc się również do obiektów budowlanych. Zasadne staje się więc prowadzenie analiz mających na celu optymalizację ekologiczno-energetyczną budynków oraz racjonalizacja etapów ich cyklu istnienia.

Najwyższy stopień szkodliwego oddziaływania na otoczenie oraz największy poziom emisji gazów szklarniowych, w cyklu istnienia analizowanego budynku, odnotowano w przypadku etapu eksploatacji, ze względu na duże zużycie energii pochodzącej z konwencjonalnych źródeł energii (zapotrzebowanie na ciepło i prąd).

Cykl istnienia budynków handlowo-usługowych charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem zużycia energii oraz emisji szkodliwych substancji nim spowodowanych. Zmniejszenie zużycia konwencjonalnych surowców energetycznych, oprócz zwiększenia sprawności energetycznej, może zostać osiągnięte wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. W zależności od zastosowanej technologii, ilość energii skumulowanej w materiałach budowlanych jest duża i może wynosić od 5,5 do 6,5 GJ×Mg<sup>-1</sup>. Materiałem, który istotnie podwyższa poziom energii skumulowanej, jest cement, ponieważ jego produkcja jest bardzo energochłonna.

Drugi zasadniczy materiał mający wpływ na wielkość energochłonności to stal zbrojeniowa i konstrukcyjna. Zwiększenie stosowania lekkich betonów oraz materiałów izolacyjnych umożliwia znaczne zmniejszenie zapotrzebowania na energię w fazie wytwarzania. Dodatkowo ich zastosowanie ma również kluczowe znaczenie w zmniejszeniu energochłonności eksploatacyjnej.

Podczas eksploatacji budynku handlowo-usługowego możliwa jest optymalizacja ekologiczno-energetyczna zużycia zasobów, np. przez dobór wielkości i kubatury obiektu do pełnionej przez niego funkcji, utrzymanie dobrego stanu technicznego, wprowadzenie usprawnień w procesach obsługi i użytkowania czy wdrażanie rozwiązań mających na celu ograniczenie zużycia mediów. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że podstawowe znaczenie dla ekologiczno-energetycznej modernizacji obiektów budowlanych będzie miało zmniejszenie energochłonności ich eksploatacji.

## Literatura

- [1] Singh R, Kumar S. Green Technologies and Environmental Sustainability. Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2017.
- [2] McLellan B. Sustainable Future for Human Security. Singapore: Springer Nature Singapore; 2018.
- [3] Flizikowski J, Bieliński K. Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization. USA: IGI Global; 2012.
- [4] Yang M, Yu X. Energy Efficiency: Benefits for Environment and Society. London: Springer; 2015.
- [5] Sasmal J. Resources, Technology and Sustainability. Singapore: Springer; 2016.
- [6] Ekardt F. Sustainability: Transformation, Governance, Ethics, Law. Cham: Springer International Publishing; 2020.
- [7] Frankl P, Rubik F. Life Cycle Assessment in Industry and Business; Berlin, Heidelberg: Springer; 2000.

[8] Piotrowska K, Piasecka I. Specification of Environmental Consequences of the Life Cycle of Selected Post-Production Waste of Wind Power Plants Blades. Materials. 2021; doi: 10.3390/ma14174975.

[9] Graczyk M, Rybaczewska-Błażejowska M. Continual Improvement as a Pillar of Environmental Management. Management. 2010; 1: 297 – 305.

[10] Górzyński J. Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów. Warszawa: Wydawnictwo WNT; 2007.

[11] ISO 14044: 2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.

[12] ISO 14040: 2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.

[13] Guinée J. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Netherlands: Springer; 2002.

[14] Kurczewski P, Kłos Z. Technical Objects Classification for Environmental Analyses. Zagadnienia Eksploat. Masz. 2005; 40: 127 – 138.

[15] Tomporowski A, Flizikowski J, Kruszelnicka W, Piasecka I, Kasner R, Mroziński A, Kovalyshyn S. Destructiveness of Profits and Outlays Associated with Operation of Offshore Wind Electric Power Plant. Part 1: Identification of a Model and Its Components. Pol. Marit. Res. 2018; doi: 10.2478/pomr-2018-0064.

[16] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int. J. Life Cycle Assess. 2003; doi: 10.1007/BF02978505.

[17] Bauer M, Mösele P, Schwarz M. Green Building; Berlin Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg; 2010.

[18] Motoasca E, Agarwal AK, Breesch H. Energy Sustainability in Built and Urban Environments. Singapore: Springer Singapore; 2019.

[19] Plastrik P, Cleveland J. Life After Carbon. The Next Global Transformation of Cities. Washington, USA: Island Press; 2018.

[20] Oladokun MG, Aigbavboa CO. Simulation-Based Analysis of Energy and Carbon Emissions in the Housing Sector. Cham: Springer International Publishing; 2018.

[21] Yang F, Chen L. High-Rise Urban Form and Microclimate: Climate-Responsive Design for Asian Mega-Cities. Singapore: Springer Singapore; 2020.

[22] Mercader-Moyano P. Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering. Cham: Springer International Publishing; 2017.

[23] Drück H, Pillai RG, Tharian MG, Majeed AZ. Green Buildings and Sustainable Engineering: Proceedings of GBSE 2018. Singapore: Springer Singapore; 2019.

[24] Recchia L, Boncinelli P, Cini E, Vieri M, Pegna FG, Sarri D. Multicriteria Analysis and LCA Techniques: With Applications to Agro-Engineering Problems. London-New York: Springer; 2011.

[25] Tomporowski A, Piasecka I, Flizikowski J, Kasner R, Kruszelnicka W, Mroziński A, Bieliński K. Comparison Analysis of Blade Life Cycles of Land-Based and Offshore Wind Power Plants. Pol. Marit. Res. 2018; doi: 10.2478/pomr-2018-0046.

[26] Piasecka I, Baldowska-Witos P, Piotrowska K, Tomporowski A. Eco-Energetical Life Cycle Assessment of Materials and Components of Photovoltaic Power Plant. Energies. 2020; doi: 10.3390/en13061385.

[27] Littlewood J, Howlett RJ, Capozzoli A, Jain LC. Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of SEB 2019. Singapore: Springer Singapore; 2020.

Przyjęto do druku: 04.04.2022 r.