

Janusz BELOK, Beata WILK-SŁOMKA

Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

OCENA ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH W ASPEKTCIE ODDZIAŁYWAŃ ŚRODOWISKOWYCH

Streszczenie. Niniejszy artykuł przedstawia najnowsze osiągnięcia w zakresie wykonywania ocen środowiskowych na bazie analizy cyklu życia (LCA). Omówiono dwa zasadnicze podejścia do ustalenia kategorii oddziaływania na środowisko: podejście zorientowane na efekty pośrednie oraz końcowe w środowisku. Zaprezentowano wyniki oceny środowiskowej ściany warstwowej wykonanej w trzech wariantach materiałowych, przeprowadzonej przy pomocy oprogramowania GaBi. Przeanalizowano ponadto wpływ na środowisko materiałów użytych do wykonania warstwy konstrukcyjnej i izolacyjnej przyjętych rozwiązań przegród budowlanych.

Słowa kluczowe: ocena oddziaływania na środowisko, analiza cyklu życia, kategoria oddziaływania na środowisko, efekty pośrednie i końcowe w środowisku

EVALUATION OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE ASPECT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS

Summary. This paper presents the latest achievement in performing environmental evaluations based on the life cycle assesment (LCA). Two basic approaches to determine the categories of environmental impact were discussed: an approach focused on the intermediate and final effects in the environment. The results of the environmental evaluation of the wall layer made of three different material variants, performed with the use of GaBi, software were presented. Moreover, the impact of the materials used to perform structural and insulation layers on the environment of agreed solutions of building partitions was analyzed.

Keywords: the impact evaluation on the environment, life cycle assesment, impact category on the environment, intermediate and final effects in the environment

1. Wprowadzenie

Podczas produkcji wyrobów, na różnych jej etapach, emitowane są substancje negatywnie oddziałujące na środowisko. Substancje te wprowadzane są do powietrza, wody i gleby w postaci gazowej, ciekłej oraz stałej. Przyczyniają się one do negatywnych zjawisk

w środowisku, nazywanych efektami końcowymi. Należą do nich: efekt cieplarniany, oddziaływanie na zdrowie ludzi, zakwaszanie i eutrofizacja środowiska, smog letni, zmniejszenie warstwy ozonowej, zmniejszenie zasobów naturalnych (abiotycznych).

W związku z wprowadzeniem aspektów zrównoważonego rozwoju w budownictwie następuje wzrost wymagań środowiskowych dotyczących wyrobów budowlanych. Powstają nowe rozporządzenia dotyczące wprowadzania na rynek UE wyrobów budowlanych, nakazujące uwzględnienie szkodliwego wpływu wyrobów i obiektów na środowisko. Dużą uwagę zwraca się na energooszczędność obiektów, zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych. Promuje się stosowanie surowców przyjaznych środowisku, materiałów nadających się do recyklingu i pochodzących z recyklingu. Metodologia oceny środowiskowej wyrobu jako oceny cyklu życia LCA wpisuje się w te zagadnienia. Dzięki niej jest możliwe określenie, kwalifikacja i ocena potencjalnego wpływu cyklu produkcji wyrobu lub wykonywania usług na jakość środowiska. Można wskazać procesy w systemie wyrobu, które w najbardziej negatywny sposób oddziałują na środowisko, wprowadzić modyfikacje pozwalające niwelować negatywny wpływ [3, 4].

2. Ogólna charakterystyka techniki oceny cyklu życia – LCA

Ocena środowiskowa wyrobu, jako ocena cyklu życia LCA, wciąż jest stosunkowo nową techniką zarządzania środowiskowego w Polsce, mimo iż jej początki na świecie sięgają lat 60. XX wieku. Ocena środowiskowa powinna teoretycznie uwzględniać wszystkie czynniki wpływające na środowisko, które są związane z danym wyrobem. Poprzez wyrób w metodologii LCA określa się każdy towar lub usługę, natomiast badania dotyczą systemu wyrobu, czyli całego procesu produkcji, fazy użytkowania i utylizacji. Stosując metodę LCA, możemy w najpełniejszym wymiarze wypełnić teoretyczne założenia oceny środowiskowej.

Analiza cyklu życia została szczegółowo opisana w normach serii ISO 14040 z zakresu zarządzania środowiskowego. Definicja LCA (ang. *Life Cycle Assessment*) przedstawiona w normach brzmi: *Ocena cyklu życia to zebranie i ocena wejść, wyjść oraz potencjalnych wpływów na środowisko systemu wyrobu w okresie jego cyklu życia* [7]. Do podstawowych elementów LCA należą:

- zidentyfikowanie i ocena ilościowa obciążeń wprowadzanych do środowiska, tj. materiały, energia, emisja i odpady wprowadzane do środowiska,
- ocena potencjalnych wpływów tych obciążeń,
- oszacowanie dostępnych opcji w celu zmniejszenia tych obciążeń.

W metodzie LCA można wyodrębnić cztery etapy: określenie celu i zakresu, analiza zbioru wejść i wyjść, ocena wpływu oraz interpretacja wyników.

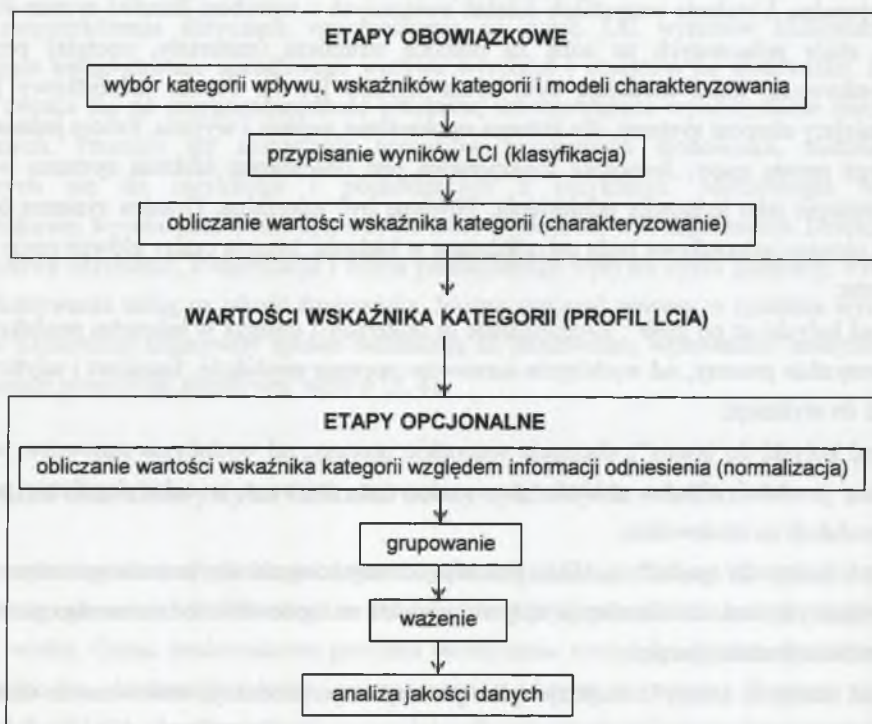
Zdefiniowanie celu LCA polega na określeniu zamierzonego zastosowania, przyczyn prowadzenia badań oraz odbiorcy badań. Na tej podstawie określa się sposób prowadzenia analizy. Podczas definiowania zakresu badań należy określić trzy powiązane ze sobą zagadnienia: system wyrobu poddanego badaniu, granice systemu oraz jednostkę funkcjonalną. Ustalenie wszystkich działań związanych z wyrobem stanowi system wyrobu, czyli zbiór połączonych ze sobą za pomocą strumieni (materiały, energia) procesów jednostkowych, które modelują cykl życia wyrobu [5, 7]. Proces jednostkowy jest to najmniejszy element systemu, dla którego są określane wejścia i wyjścia. Proces jednostkowy podlega prawu masy. Jednostka funkcjonalna jest ilościowym efektem systemu wyrobu, stosowanym jako jednostka odniesienia. Powinna być mierzalna. Granica systemu określa, które procesy jednostkowe będą uwzględniane w badaniu. Istnieją cztery główne opcje granic systemu:

- „od kołyski aż po grób”: uwzględniane są materiały i energia w łańcuchu produkcji oraz wszystkie procesy, od wydobycia surowców poprzez produkcję, transport i użytkowanie aż do utylizacji;
- „od kołyski do bramy”: obejmuje wszystkie procesy, od wydobycia surowców poprzez fazę produkcji (brama zakładu przemysłowego; używana w celu określenia wpływu produkcji na środowisko);
- „od bramy do grobu”: zawiera procesy od użytkowania do końcowego etapu życia, wykorzystywana do określenia wpływu produktu na środowisko od momentu opuszczenia zakładu produkcyjnego;
- „od bramy do bramy”: obejmuje tylko procesy etapu produkcji, stosowana do określenia wpływu etapu produkcji lub pojedynczego procesu na środowisko.

W [7] zaproponowano, aby przy ustalaniu granic systemu pod uwagę wziąć następujące procesy jednostkowe: pozyskiwanie surowców, wejścia i wyjścia w podstawowym cyklu wytwarzania i przetwarzania, dystrybucję i transport, produkcję i wykorzystanie paliw, energii elektrycznej i ciepła, użytkowanie wyrobów, likwidację powstających w procesie odpadów, odzyskiwanie materiałów pomocniczych, operacje dodatkowe.

Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI – ang. *Life Cycle Inventory*) obejmuje zebranie i ilościowe określenie wejść (np. materiały, energia) oraz wyjść (np. odpady, ścieki, emisja zanieczyszczeń) dla danego systemu wyrobu w okresie jego cyklu życia. Ocena wpływu cyklu życia (LCIA – ang. *Life Cycle Impact Assessment*) ukierunkowana jest na zrozumienie i ocenę wielkości oraz znaczenie możliwego wpływu systemu wyrobu na środowisko. Podczas oceny LCIA wyniki analizy zbioru LCI są przypisywane do danej kategorii wpływu, czyli klasy reprezentującej rozpatrywane kwestie środowiskowe. Do każdej kategorii wpływu dobierany jest wskaźnik kategorii oraz zostaje obliczona wartość tego wskaźnika. Na rys. 1 przedstawiono etapy oceny wpływu cyklu życia. Pierwszym etapem LCIA jest wybór kategorii wpływu, czyli konsekwencje w środowisku powodowane przez obciążenie go strumieniami wejść i wyjść systemu. Można zastosować różne kategorie wpływu, jednak

powinny one być zgodne z celem i zakresem badania [7]. Najczęściej stosowane kategorie wpływu przedstawiono w [1]. Istnieją dwa zasadnicze podejścia do ustalania kategorii oddziaływania na środowisko [4]: podejście zorientowane na efekty pośrednie w środowisku oraz podejście zorientowane na efekty końcowe w środowisku.



Rys. 1. Etapy oceny wpływu cyklu życia [7]

Fig. 1. Phases of Life Cycle Impact Assessment [7]

Wskaźniki uzyskiwane na poziomie punktów pośrednich charakteryzują się mniejszą niepewnością. Natomiast wskaźniki uzyskane jako punkty końcowe mogą cechować się znaczną niepewnością związaną ze złożonością przebiegu procesów w środowisku. Do skutków pośrednich w środowisku zalicza się: efekt cieplarniany, zakwaszenie i eutrofizację środowiska, fotochemiczne utlenianie, degradację warstwy ozonowej, ubytek zasobów nieodnawialnych. Podejście oparte na punktach pośrednich uznawane jest za podstawowe podczas wykonywania analiz LCA. Metody oparte na wykorzystaniu efektów pośrednich w środowisku to: CML, EPID, TRACI. Metoda TRACI jest zorientowana na problem, stosuje się ją głównie w USA, bazuje na prostych łańcuchach przyczynowo-skutkowych, aby ukazać miejsce, w którym każda kategoria wpływu jest charakteryzowana. Podejście w metodzie EPID obejmuje skutki związane z emisjami oraz wykorzystywaniem zasobów.

Podejście wykorzystujące efekty końcowe oddziaływania na środowisko, jest nadal analizowane ze względu na swoją złożoność. Jako skutki końcowe rozpatruje się: wzrost

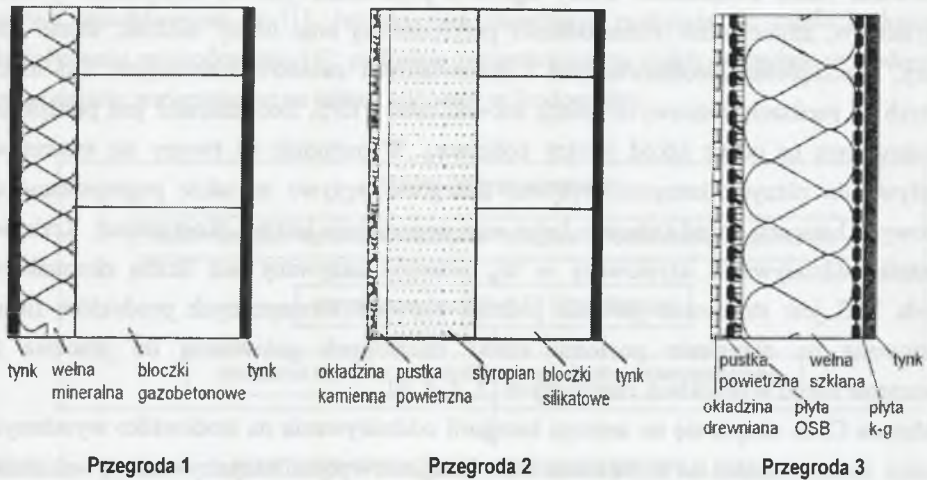
zachorowań ludzi, zwiększenie liczby zgonów, pogorszenie jakości ekosystemów, utratę ekosystemów, zmniejszenie różnorodności przyrodniczej oraz liczby siedlisk, utratę dóbr kultury, uszczuplenie nieodnawialnych i odnawialnych zasobów naturalnych. Do metod opartych na punktach końcowych należą eco-indicator i EPS. Eco-indicator jest podejściem zorientowanym na ocenę szkód (efekty końcowe). W metodzie tej tworzy się systemowe przepływy do różnych kategorii wpływu. Kategorie wpływu są także pogrupowane do końcowych kategorii szkód (zdrowie ludzi oraz pogorszenie jakości ekosystemu). Końcowy wskaźnik oddziaływania uzyskiwany w tej metodzie nazywany jest liczbą ekopunktów. Metoda EPS jest stosowana głównie podczas rozwoju wewnętrznych produktów firmy, nakierowana na określenie poziomu szkód mierzonych gotowością do płacenia za odtworzenie szkód w obiektach chronionych [2, 3, 4, 8].

Metoda CML skupia się na szeregu kategorii oddziaływania na środowisko wyrażonych w emisji zanieczyszczeń do środowiska. Jako kategorie wpływu rozpatrywane są wskaźniki: zubożenia zasobów abiotycznych (ADP), zakwaszania (AP), zmniejszenia zasobów ozonu stratosferycznego (ODP) oraz potencjały: eutrofizacji (EP), toksyczności dla wód słodkich (FAETP), globalnego ocieplenia (GWP), toksyczności dla ludzi (HTP), toksyczności dla wód morskich (MAETP), toksyczności dla gleb (TETP), fotochemicznego tworzenia ozonu (POCP). Współczynnik normalizacji dla danej kategorii wpływu i wybranego regionu otrzymuje się przez pomnożenie współczynników charakterystyki i ich emisji [8].

3. Ocena oddziaływania na środowisko wybranych przegród budowlanych

Scharakteryzowana pokrótce metoda oceny środowiskowej bazująca na analizie LCA może być z powodzeniem wykorzystywana również w budownictwie. Przykładem niech będzie analiza LCA wykonana dla przegrody budowlanej. Celem analizy LCA jest przedstawienie cyklu życia trzech przegród budowlanych. Przegrody te są ścianami zewnętrznymi obiektu budowlanego. Otrzymane wyniki pozwolą na uzyskanie odpowiedzi na pytania: czy i jakie różnice istnieją w oddziaływaniu przegród na środowisko, oraz wskażą korzystne ekologicznie rozwiązanie. Metodyka bazuje na ocenie cyklu życia zgodnie z normami serii PN-EN ISO 14040+14044 [7]. Badanie LCA przeprowadzono za pomocą wersji edukacyjnej programu komputerowego GaBi 4.4., przy użyciu metody CML 2001. Analizowany system obejmuje następujące procesy: produkcję materiałów budowlanych wraz z dostawami i transportem, a także etap wznoszenia przegród. Jako kategorie wpływu przyjęto typowe wskaźniki dla tej metody – por. część 2. Zastosowano wskaźniki normalizacji dostępne w bibliotece programu GaBi jak dla Europy Centralnej (EU25+3). Przy określeniu granic systemu przyjęto opcję „od kołyski do bramy”.

Na rys. 2 przedstawiono schematy przegród poddanych analizie. W tabeli 1 zestawiono dane techniczne elementów składowych 1 m^2 dla przyjętych przegród budowlanych.



Rys. 2. Schematy analizowanych przegród [6]

Fig. 2. Schemes of the analyzed building partitions [6]

W etapie wznoszenia przegród uwzględniono energię elektryczną niezbędną do pracy urządzeń: mieszalnik, maszyny tynkarskie oraz oświetlenie. Jako jednostkę funkcjonalną wybranych modeli zdefiniowano przegrodę zewnętrzną o powierzchni 1 m^2 i wartości współczynnika przenikania ciepła $U = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Zamodelowane przegrody spełniają aktualne wymagania izolacyjności termicznej ($U < U_{\text{max}}$, $U < 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$). Ponadto spełniają także wymagania przegród energooszczędnych ($U < 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$), a zatem wpisują się w trend budownictwa ekologicznego i energooszczędnego. Na rys. 3 przedstawiono wartości znormalizowanych wskaźników kategorii oddziaływania na środowisko (wyrażone w procentach) dla rozpatrywanych przegród.

Przeprowadzono także analizę wpływu na środowisko procesów związanych z produkcją poszczególnych elementów konstrukcji przegród. Wybrano materiały, które mają największy udział masowy w każdej zamodelowanej przegrodzie, a zatem produkcja tych materiałów powoduje największe obciążenia dla środowiska. Rozważano dwie grupy materiałów:

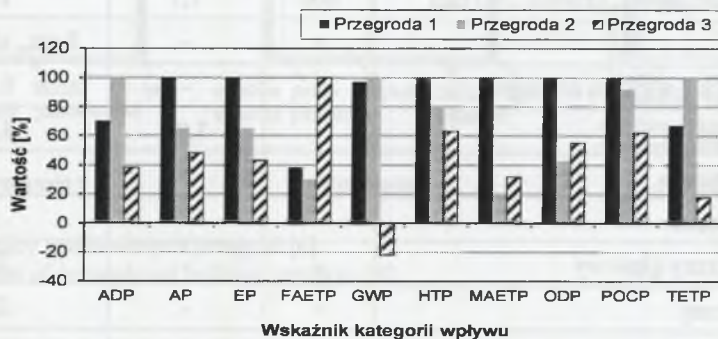
- materiały konstrukcyjne: bloczki gazobetonowe, bloczki silikatowe, ściana szkieletowa (płyty OSB, płyty gipsowo-kartonowe, szkielet drewniany, paroizolacja i wiatroizolacja),
- materiały izolacyjne: wełna mineralna, styropian, wełna szklana.

Tabela 1

Dane techniczne elementów składowych 1 m² analizowanych przegród. Źródło: [6]

Przegroda / element	Gęstość [kg/m ³]	Mnożnik strat materiału	Ilość materiału [kg/m ²]
Przegroda 1			
Wełna mineralna, grubość 100 mm	120	1,05	12,6
Błoczek gazobetonowy, grubość 300 mm	400	1,1	132
Łączniki	-	-	8 szt., ok. 1,0 kg
Siatka zbrojąca z włókien szklanych	-	-	0,15
Zaprawa murarska	-	1,05	4,72
Zaprawa klejąca	-	-	5
Zaprawa zbrojąca	-	-	6
Tynk wewnętrzny gipsowy	-	-	2,5
Tynk zewnętrzny	-	-	2,5
Waga przegrody			166,47
Przegroda 2			
Okładzina kamienna, grubość 20 mm	2600	1,1	57,2
Styropian, grubość 180 mm	34	1,05	6,43
Błoczek silikatowy, grubość 240 mm	1500	1,1	396
Kotwa stalowa do murów szczelinowych	-	-	5 szt., ok. 3,0 kg
Zaprawa murarska	-	1,05	9,44
Zaprawa klejąca	-	-	5
Tynk wewnętrzny	-	-	2,5
Waga przegrody			479,57
Przegroda 3			
Okładzina drewniana, grubość 14 mm	470	1,05	6,91
Wiatroizolacja	-	-	0,17
Płyta OSB, grubość 18 mm	630	1,05	11,91
Wełna szklana, grubość 200 mm	24	1,05	5,54
Folia – paroizolacja	-	-	0,17
Płyta k-g, grubość 12,5 mm	1000	1,05	13,13
Ruszt drewniany	550	1,05	6,24
Tynk wewnętrzny	-	-	2,5
Waga przegrody			46,4

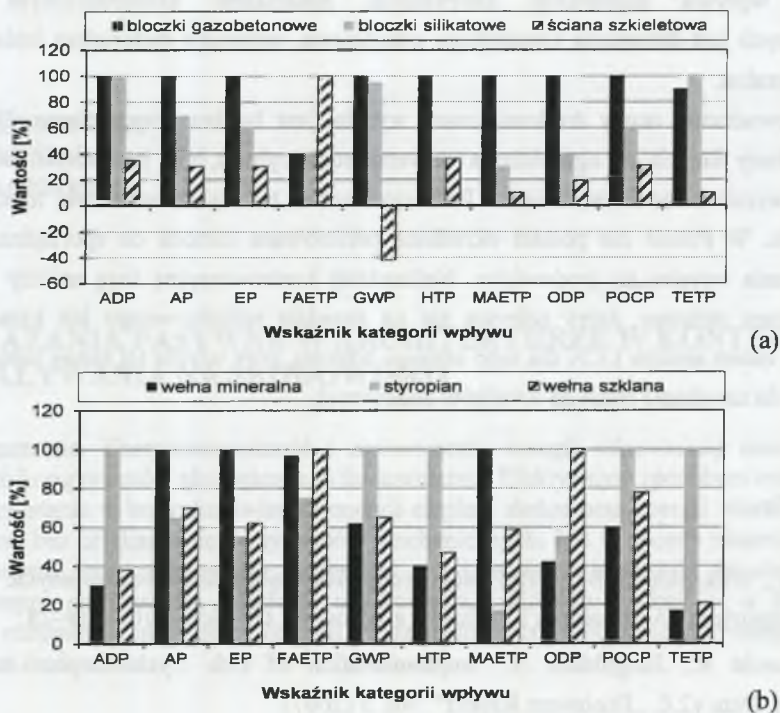
Najniższym oddziaływaniem na środowisko charakteryzuje się przegroda 3. Uzyskała najniższe wartości wskaźników w 7 na 10 kategoriach wpływu (ADP, AP, EP, HTP, POCP, TETP, GWP). Najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem okazała się przegroda 1, przyjmuje ona najwyższe wartości wskaźników w 6 kategoriach wpływu (AP, EP, HTP, MAETP, ODP, POCP). Przegroda 2 uzyskała najwyższe wartości w 3 kategoriach wpływu (ADP, GWP, TETP). Rys. 4 przedstawia porównanie wskaźników oddziaływania na środowisko uzyskanych dla materiałów: (a) – konstrukcyjnych, (b) – izolacyjnych.



Rys. 3. Wartości wskaźników kategorii oddziaływania na środowisko dla analizowanych przegród uzyskane metodą CML 2001 [6]

Fig. 3. The values of the environmental impacts categories on environment for analyzed building partitions, obtained by CML 2001 method [6]

Najbardziej niekorzystny wpływ na środowisko ma produkcja bloczków gazobetonowych. Charakteryzuje się one najwyższą wartością wskaźników w 7 kategoriach wpływu na 10 rozpatrywanych. Najniższe współczynniki kategorii wpływu uzyskała konstrukcja ściany szkieletowej (w 9 kategoriach). Ujemny wskaźnik potencjału globalnego ocieplenia GWP wynika z zastosowanego w konstrukcji drewna. W procesie produkcji wykorzystanych elementów drewnianych emisja CO₂ jest niższa niż absorpcja w procesie uprawy. Uzyskane dla bloczków silikatowych wskaźniki kategorii wpływu przyjmują wartości pośrednie. Bloczki silikatowe w największym stopniu negatywnie oddziałują na gleby (TETP) oraz zubożenie zasobów abiotycznych (ADP).



Rys. 4. Wartości wskaźników kategorii oddziaływania na środowisko dla materiałów (a) warstwy konstrukcyjnej; (b) warstwy izolacyjnej, uzyskane metodą CML 2001 [6]

Fig. 4. The values of the environmental impacts categories on environment for analyzed (a) construction; (b) insulation materials, obtained by CML 2001 method [6]

Analizując wyniki uzyskane dla materiałów izolacyjnych, nie jest możliwe jednoznaczne określenie, który z materiałów ma najmniejszy wpływ na środowisko. Styropian charakteryzuje się najwyższymi wartościami w 5 kategoriach wpływu: HTP, POCP, GWP, TETP, ADP. Wyniki uzyskane w pozostałych pięciu kategoriach charakteryzują styropian jako materiał najmniej szkodliwy dla środowiska. Wełna mineralna oddziałuje w najmniejszym stopniu na środowisko w 5 kategoriach: HTP, POCP, GWP, TETP, ADP. W trzech kategoriach wełna mineralna charakteryzuje się wartościami najwyższymi – AP, EP, MAETP. Wełna szklana w 2 kategoriach wpływu (ODP, FAETP) charakteryzuje się najwyższymi wartościami.

4. Podsumowanie

Rozpatrując potencjalne oddziaływania na środowisko przegród poddanych analizie LCA metodą CML 2001, najbardziej niekorzystnymi wartościami wskaźników wśród kategorii wpływu (uwzględniono 10 kategorii) charakteryzuje się przegroda 1. W najmniejszym stopniu negatywnie oddziałuje na środowisko przegroda 3. Pod względem rozpatrywanych

kategorii wpływu najbardziej korzystnym materiałem konstrukcyjnym spośród analizowanych jest drewniana konstrukcja szkieletowa, natomiast materiałem izolacyjnym – wełna mineralna.

Przeprowadzenie oceny środowiskowej wyrobu jest bardzo czasochłonne. Dodatkowo zawartość bazy danych jest ograniczona (w wersji edukacyjnej), brak jest danych dotyczących produkcji wyrobów na terenie Polski. Problem stanowi też wybór właściwej metody oceny cyklu życia. W Polsce nie została określona preferowana metoda do sporządzania oceny oddziaływania wyrobu na środowisko. Najbardziej kontrowersyjną fazą analizy LCA jest dobór obszaru ochrony, który odbywa się na zasadzie subiektywnego ich kształtowania. Wykonana zatem analiza LCA dla tego samego wyrobu, przy użyciu tej samej metody, może prowadzić do uzyskania różnych wyników końcowych.

Bibliografia

1. Belok J., Wilk-Słomka B.: Certyfikacja środowiskowa obiektów budowlanych. Materiały VII Sympozjum „Architektura i Technika a Zdrowie”, Gliwice 2010, s. 19–28.
2. Frischknecht R., Junghbluth N.: Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Data v2.0, „Ecoinvent Report”, No. 3 (2007).
3. Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M.: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA). Wydawnictwo PWN, Warszawa 2007.
4. Górzyński J.: Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
5. Grzesik K.: Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) – nowej techniki w ochronie środowiska. „Inżynieria Środowiska”, tom 11, zeszyt 1 (2006).
6. Żak L.: Ocena środowiskowa wyrobów i konstrukcji budowlanych (rozprawa magisterska). Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
7. PN-EN ISO 14040: 2009: Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura.
8. <http://www.gabi-software.com> [dostęp: 15.05.2012].