

Ocena cyklu istnienia budynków jednorodzinnych na przykładzie wybranych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych

Obok przemysłu energetycznego, hutniczego i chemicznego, znaczący wpływ na środowisko naturalne ma również sektor budownictwa. Według danych Komisji Europejskiej ten sektor odpowiada za zużycie około 42% produkowanej energii i emisję 35% gazów cieplarnianych w całej Unii Europejskiej [1]. W celu poprawy tego stanu powstała koncepcja zrównoważonego budownictwa, które polega na takim projektowaniu i wznoszeniu obiektów budowlanych, aby była zachowana zasada dbałości o środowisko naturalne oraz oszczędne gospodarowanie surowcami w pełnym cyklu istnienia. Zgodnie z tą ideą budynki powinny odznaczać się dużą trwałością, małym zużyciem energii w okresie eksploatacji, a także możliwością ponownego użycia materiałów po rozbiórce obiektu budowlanego. Jedną z metod, która umożliwia określenie wpływu danego wyrobu na środowisko naturalne, jest „Life Cycle Assessment” (LCA), czyli ekologiczna ocena cyklu istnienia. Analiza ta pozwala na ocenę wpływu ekologicznego danego materiału lub całego obiektu budowlanego, przyjmując jako kryterium ubytek zasobów naturalnych i oddziaływanie zanieczyszczeń na środowisko. Uwzględniając tę metodę, projektant, dokonując wyboru odpowiednich materiałów, może decydować o oddziaływaniu obiektu budowlanego na środowisko naturalne.

Wpływ kształtowania obiektu budowlanego na zmniejszenie obciążenia środowiska

Cykl istnienia obiektu budowlanego można podzielić na cztery główne etapy: pozyskanie surowców i produkcję materiałów budowlanych, proces budowy, eksploatację budynku, rozbiórkę i recykling materiałów budowlanych.

Pierwszy etap cyklu wiąże się z pozyskaniem surowców, transportem i ich produkcją. Działalność ta powoduje zmniejszenie się zasobów naturalnych energetycznych i nieenergetycznych, a do środowiska są wprowadzane ścieki technologiczne, odpady stałe i szkodliwe substancje gazowe.

W procesie budowy wpływ na środowisko ma m.in. wykorzystanie naturalnej przestrzeni, zużycie energii oraz emisja zanieczyszczeń spowodowana transportem.

Eksploatację budynku określa się zazwyczaj jako przedział czasu od momentu zakończenia jego wznoszenia do rozpoczęcia realizacji decyzji o likwidacji [2]. Etap ten wiąże się z emisją zanieczyszczeń do środowiska, będących wynikiem spalania paliw na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej oraz energii elektrycznej. W tym czasie są również usuwane ścieki bytowe i odpady stałe.

Ostatni etap cyklu istnienia budynku to rozbiórka i recykling materiałów budowlanych i związane z nim emisje gazów oraz pyłów, powstające w trakcie tych prac, a także wykorzystanie terenu do składowania odpadów.

Negatywny wpływ obiektu budowlanego na środowisko można ograniczyć, stosując wyroby, które charakteryzują się niską energią wbudowaną, dobrą jakością i trwałością, potencjałem do ponownego wykorzystania po rozbiórce obiektu, ale również cechami, które mogą decydować o dalszym oddziaływaniu obiektu na środowisko naturalne [3]. Prace na etapie

wznoszenia budynków powinny być zorganizowane i zrównoważone pod względem wykorzystania terenu, ale także z zachowaniem odpowiedniego stopnia nowoczesności stosowanych technologii, z uwzględnieniem zmniejszenia zużycia energii [4].

Zużycie energii niezbędnej do utrzymania odpowiedniego komfortu cieplnego w pomieszczeniach, jak również zużycie energii elektrycznej stanowią główne przyczyny obciążenia środowiska przez budynek w okresie jego eksploatacji. Działania zmierzające do ograniczenia strat energii i zwiększenia jej zysków będą miały znaczący wpływ na poprawę charakterystyki energetycznej budynku.

Ograniczenie zużycia energii powinno być ukierunkowane na aspekty związane z: geometrią budynku i jego sytuowaniem na działce, sposobem użytkowania, sposobem zasilania w energię, zastosowanymi systemami ogrzewania i chłodzenia, przygotowaniem ciepłej wody użytkowej, wbudowanej instalacji oświetlenia, izolacyjnością cieplną przegród budowlanych.

Największe straty ciepła w bilansie energetycznym budynku, szacowane na 60÷70%, są związane z przenikaniem ciepła przez przegrody budowlane, a udział wentylacyjnych strat ciepła wynosi około 30÷40%.

Straty ciepła można ograniczyć, stosując wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła (rekuperacji) i dużą szczelność budynku, energooszczędną stolarkę okienną i drzwiową, odpowiednie ocieplenie ścian i dachu, odpowiednie ocieplenie podłogi na gruncie, wykorzystanie rozwiązań ograniczających występowanie mostków cieplnych.

Instalacja ogrzewania i ciepłej wody użytkowej powinna być tak rozwiązana, aby uzyskiwała możliwie wysoką sprawność ogólną systemu. Można to uzyskać, m.in. stosując kotły kondensacyjne, pompy ciepła o dużym współczynniku efektywności (COP), zwarty układ instalacji i właściwą izolację cieplną, niskotemperaturowy system grzejny, regulację zapewniającą największą efektywność, wysokosprawne pompy pomocnicze o małym poborze mocy.

Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na środowisko naturalne jest zużycie energii elektrycznej, które bezpośrednio wiąże się z emisją zanieczyszczeń od spalania węgla kamiennego i brunatnego. W Polsce 93% energii pochodzi ze spalania węgla, który ma dodatkową wadę, gdyż prowadzi do dużej emisji dwutlenku węgla. Zużycie energii elektrycznej kreuje użytkownik na etapie eksploatacji budynku. Racjonalne oszczędzanie energii oraz stosowanie energooszczędnych urządzeń elektrycznych powoduje korzyści w postaci mniejszych opłat za energię i mniejszej emisji CO₂.

Możliwości ograniczenia wpływu etapu rozbiórki obiektu na środowisko naturalne powinno się uwzględnić na etapie projektowania budynku przez wybór odpowiednich materiałów i systemów, które po rozbiórce będą podlegały wykorzystaniu lub przetworzeniu. Dobrym rozwiązaniem jest recykling materiałów w miejscu rozbiórki i wykorzystanie ich w tym samym miejscu pod nową inwestycję, gdyż nie powoduje dodatkowych strat w odniesieniu do środowiska, związanych np. z transportem. Odmiennymi sposobami ograniczania ilości

odpadów, tym samym obciążenia środowiska, może być adaptacja obiektu do innych celów albo projektowanie pod demontaż, czyli wykorzystanie całych modułów obiektu pod nową inwestycję. Proces rozbiórki powinno się optymalizować w taki sposób, aby w największym stopniu było możliwe pozyskanie materiałów przy jak najmniejszym obciążeniu środowiska.

Analiza cyklu istnienia produktu (LCA)

Analiza LCA umożliwia identyfikację potencjalnego wpływu na środowisko we wszystkich etapach cyklu istnienia produktów oraz procesów obejmujących wydobywanie i przetwarzanie surowców, produkcję, dystrybucję, transport, użytkowanie, recykling i ostateczne unieszkodliwienie odpadów. Wytyczne dotyczące oceny cyklu życia LCA są ujęte w normach serii ISO 14000 (od 14040 do 14049).

Zgodnie z założeniami zawartymi w normie ISO 14040 [5] wyróżnia się cztery fazy prowadzenia oceny cyklu istnienia: określenie celu i zakresu (Goal and Scope definition), analiza zbioru wejść i wyjść (Life Cycle Inventory Analysis – LCI), ocena wpływu cyklu życia (Life Cycle Impact Assessment – LCIA), interpretacja (Life Cycle Interpretation).

W pierwszym etapie LCA należy określić cel i zakres analizy, a także wybrać jednostkę funkcjonalną, którą może być np. 1 m³ produktu lub 1 MJ energii. W odniesieniu do wybranego składnika w fazie analizy zbioru wejść i wyjść są zbierane informacje dotyczące zużycia materiałów, energii, emisji oraz generowanych odpadów. Następnie wyniki przypisuje się do kategorii wpływu oraz ostatecznie dokonuje się interpretacji, w której prezentuje się wyniki badań, poddaje analizie i formuluje wnioski [6].

Ocena cyklu istnienia jest narzędziem wspomagającym podjęcie decyzji co do wyboru optymalnej metody projektowania nowych wyrobów czy technologii, jak również rozwoju już istniejących. LCA odnosi się do modelowego systemu, który stanowią połączone ze sobą procesy jednostkowe spełniające jedną lub kilka określonych funkcji. Procesy te stanowią zbiór, w którym następują przepływy materiałowo-energetyczne między procesami jednostkowymi. Niezbędne jest gromadzenie danych o zużyciu energii bądź surowca w każdym etapie cyklu życia danego wyrobu [7].

Metoda oceny cyklu istnienia budynków

Do oszacowania potencjalnego wpływu oddziaływań budynków jednorodzinnych na środowisko naturalne wykorzystano oprogramowanie SimaPro [8] służące do przeprowadzania analiz LCA. Narzędzie to wykorzystuje kilkanaście metod do określania wpływu wyrobów na środowisko. Do najpopularniejszych metod stosowanych w Europie należą: CML 2., Eco-indicator 99 (Ekowskażnik 99), IMPACT 2002, Baseline 2000 i 2001 r., ReCiPe.

Wykorzystana w oprogramowaniu SimaPro metoda ekowskażnika jest oparta na ocenie szkód generowanych do środowiska przez oddziaływanie konkretnego procesu bądź wyrobu. Na podstawie obciążeń przypisanych do wybranych kategorii oddziaływań jest dokonywana ocena szkód. W analizie przeprowadzonej metodą IMPACT 2002 oszacowano wpływ obiektu na trzy grupy oddziaływań, tj. zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu oraz wyczerpywanie się zasobów. Następnie wyniki poddaje się tzw. normalizacji, która polega na przekształceniu wartości wskaźnika kategorii oddziaływania na środowisko wskutek przemnożenia go przez wartość odniesienia (roczną wartość wpływu przypadającą na jednego mieszkańca Europy). Znormalizowane wskaźniki oddziaływania są wartościami bezwymiarowymi. W metodyce IMPACT 2002 przelicznikami w poszczególnych kategoriach są w przypadku szkód:

– na zdrowiu ludzkim, wyrażonych w jednostkach DALY (czynniki rakotwórcze, czynniki nierakotwórcze, wpływ zwią-

ków nieorganicznych na układ oddechowy, promieniowanie jonizujące, wpływ związków organicznych na układ oddechowy, zubożenie warstwy ozonowej) – przelicznik 141;

– pogarszających jakość ekosystemu, wyrażonych w jednostkach PDF·m²·rok (ekotoksyczność wód i lądowa, eutrofizacja, zakwaszenie, zajęcie gruntu) – przelicznik 7,3·10⁻⁵;

– odniesionych do zmiany klimatu, wyrażonych w jednostkach kgCO₂ (globalne ocieplenie) – przelicznik 0,000101;

– odniesionych do zużycia zasobów surowcowych, wyrażonych w jednostkach MJ energii pierwotnej (surowce mineralne, energia nieodnawialna) – przelicznik 6,58·10⁶.

Następnie dokonuje się ważenia wyników, jednak w metodzie IMPACT 2002 wagą jest wartość 1, w związku z tym można zsumować wyniki po normalizacji w celu uzyskania pojedynczego wskaźnika oddziaływania. Jednostką tego wskaźnika jest punkt (Pt).

Zakres analizy energetyczno-ekologicznej budynków

Do analizy LCA przyjęto cztery modele budynków jednorodzinnych o różnych rozwiązaniach materiałowo-konstrukcyjnych. Cykl istnienia obiektów podzielono na trzy fazy:

– budowy, która uwzględnia pozyskanie surowców i transport, produkcję materiałów budowlanych, transport na miejsce budowy, wznoszenie budynku;

– eksploatacji, przy czym założono eksploatację budynku przez czteroosobową rodzinę przez 50 lat; w tym czasie przewiduje się trzykrotne wykonanie prac konserwacyjnych, uwzględnia się również zużycie energii elektrycznej, gazowej, wody i odprowadzenie ścieków;

– likwidacji, obejmującą rozbiórkę, recykling niektórych materiałów i utylizację.

Charakterystyka wybranych obiektów

Przeprowadzono analizy porównawcze budynku jednorodzinne dwukondygnacyjnego o powierzchni użytkowej 83,63 m² wykonanego w sposób tradycyjny z trzema rozwiązaniami, tj. budynku o konstrukcji systemu kanadyjskiego, pasywnego oraz ekologicznego. W każdym rozwiązaniu budynki mają dach drewniany dwuspadowy o nachyleniu 45°. Budynki charakteryzującej niższe rozwiązania materiałowe:

– tradycyjny B-T „wzorzec”: ściany zewnętrzne z bloczków gazobetonowych o grubości 36,5 cm, dach izolowany wełną mineralną grubości 20 cm, podłoga na gruncie izolowana styropianem grubości 8 cm;

– drewniany B-D systemu kanadyjskiego: szkieletowa konstrukcja ścian zewnętrznych i wewnętrznych w postaci elementów drewnianych; grubość izolacji między słupkami ścian zewnętrznych wynosi 16 cm, dach izolowany wełną mineralną grubości 20 cm, podłoga na gruncie izolowana styropianem grubości 8 cm;

– pasywny B-P: ściany zewnętrzne z bloczków gazobetonowych, grubości 36,5 cm, izolowane styropianem grubości 25 cm, dach izolowany wełną mineralną i styropianem o łącznej grubości 40 cm, podłoga na gruncie izolowana styropianem grubości 25 cm;

– ekologiczny B-E: szkieletowa konstrukcja ścian zewnętrznych i wewnętrznych, którą stanowią elementy drewniane; izolację cieplną ścian zewnętrznych stanowią bloczki ze słomy o gęstości 100 kg/m³ tynkowane gliną, dach budynku kryty strzechą grubości 35 cm, ocieplenie stanowi wełna mineralna grubości 20 cm, podłoga na gruncie izolowana styropianem grubości 8 cm.

Analizowane budynki są zlokalizowane w II strefie klimatycznej. System grzewczy budynków B-T, B-D, B-E wykorzystuje kocioł dwufunkcyjny z automatyką pogodową oraz grzejniki stalowe płytowe z zaworami termostatycznymi. W budynkach tych znajduje się również wentylacja naturalna, ręcznie regulowana przez rozszczelnienie okien ściennych oraz przez nawiew-

niki ręcznie regulowane montowane w stolarce okiennej połaciowej. Odprowadzenie powietrza odbywa się przez piony kominowe. Budynek B-P ma instalację wentylacyjną mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła. Ogrzewanie budynku odbywa się przez system wentylacji. Ciepła woda użytkowa jest przygotowywana w systemie obejmującym pojemnościowy podgrzewacz połączony z instalacją cieczowych kolektorów słonecznych. Rezerwowe źródło ciepła stanowi grzałka elektryczna wbudowana w pojemnościowym podgrzewaczu. Pozostałe parametry budynku zostały podane w tabl. 1.

Tablica 1
Charakterystyka energetyczna analizowanych budynków

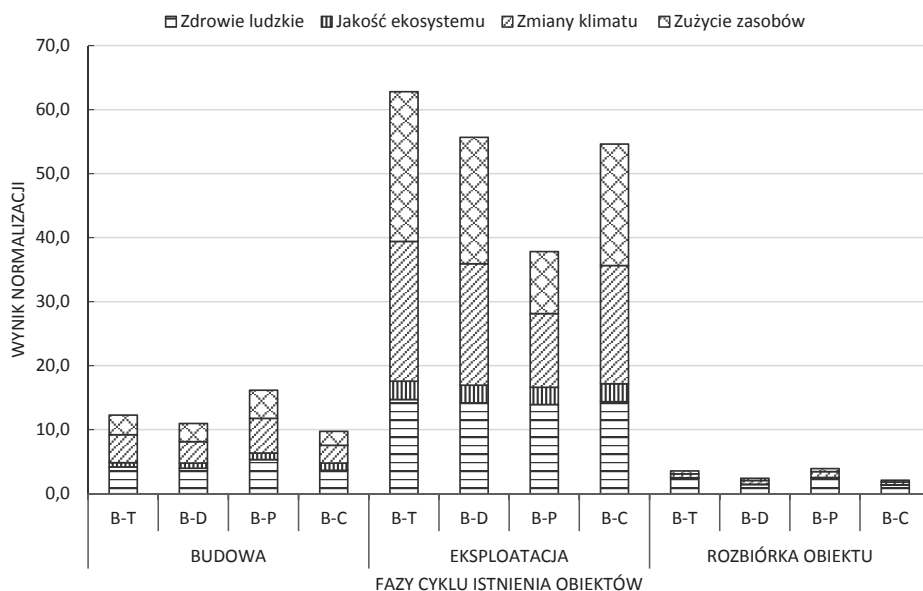
Nazwa budynku	B-T	B-D	B-P	B-C
Powierzchnia całkowita, m ²	99,92	99,92	99,92	99,92
Powierzchnia użytkowa, m ²	83,63	83,63	83,63	83,63
Liczba kondygnacji	2	2	2	2
Współczynniki przenikania ciepła przegród budowlanych U , W/(m ² ·K)	ściany zewnętrzne			
	0,248	0,119	0,083	0,087
	dach			
	0,168	0,106	0,082	0,098
	podłoga na gruncie			
	0,136	0,202	0,106	0,198
	stolarka okienna			
	1	1	0,7	1
Zapotrzebowanie na ciepło na ogrzewanie i wentylację QH,nd , kW·h/rok	stolarka połaciowa			
	1	1	0,7	1
Projektowe obciążenie cieplne, kW	4,69	4,27	2,39	4,34
Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji $EUco$, kW·h/(m ² ·rok)	55,0	53,6	13,0	43,1
Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP , kW·h/(m ² ·rok)	118,8	117,2	46,6	102,2

Wyniki analiz

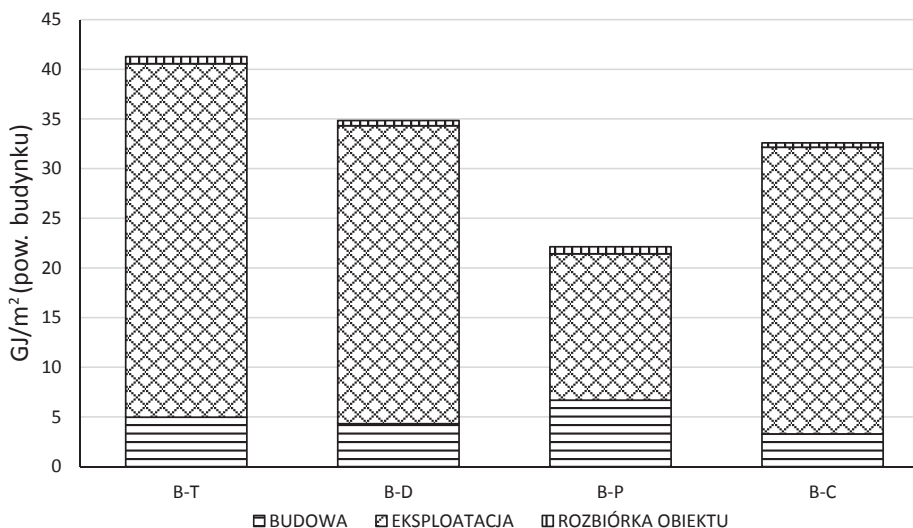
Wyniki analizy cyklu istnienia obiektów budowlanych w poszczególnych kategoriach szkód po normalizacji przedstawiono na rys. 1. Różnice w wartości obciążenia środowiskowego wynikają przede wszystkim z ilości i rodzaju użytych materiałów. W kategorii szkód wpływających na zdrowie ludzkie w fazie budowy największą wartość (5,33) wykazuje budynek pasywny. Wynika to z wpływu promieniowania jonizującego, jaki wywołuje produkcja materiałów użytych do budowy instalacji wentylacyjnej, przede wszystkim stali, a także większej w stosunku do pozostałych budynków ilości użytego styropianu do izolacji cieplnej. Budynek tradycyjny wykazuje najmniejszą wartość w kategorii jakości ekosystemu (0,67), co ma związek z wykorzystaniem mniejszej ilości drewna w porównaniu z budynkami B-D i B-C. Szkody wywołane emisją CO₂, na etapie produkcji materiałów mają związek ze spalaniem paliw kopalnych. Największe emisje są spowodowane produkcją materiałów do budynku pasywnego (5,42), a najmniejsze wykazuje budynek ekologiczny (2,78). W kategorii zużycia zasobów można dokonać pewnych porównań. Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej do wykonania materiału izolacyjnego (styropianu) w przypadku budynku B-P jest o 1 GJ/m² (powierzchni budynku) większe w stosunku do budynku tradycyjnego B-T. Całkowite zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej budynku B-T wynosi 4,98 GJ/m², a budynku B-P – 6,68 GJ/m² (rys. 2).

Z tych względów jest wskazane dokonanie analiz z uwzględnieniem energochłonności innych materiałów, które mogłyby spowodować zmniejszenie tego wskaźnika.

Najmniejszym oddziaływaniem na środowisko w fazie budowy odznaczają się budynki o konstrukcji drewnianej, czyli B-D i B-C. Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej wykonania 1 m² ściany budynku pasywnego o współczynniku przenikania ciepła 0,083 W/(m²·K) wynosi 1105 MJ/m², co w porównaniu ze ścianą budynku ekologicznego izolowanego słomą o współczynniku przenikania ciepła 0,087 W/(m²·K) powoduje zużycie około 41 MJ/m². Eksploatacja budynków nie wykazuje większych szkód w kategoriach zdrowia ludzkiego i jakości ekosystemu. Znaczne różnice można natomiast zauważyć w szkodach związanych ze zmianą klimatu i zużyciem zasobów. Emisja CO₂ jest związana przede wszystkim ze zużyciem nośników energetycznych na cele centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i energii elektrycznej. Wartość wskaźnika emisji CO₂ w okresie eksploatacji, w przypadku spalania gazu, wynosi w przypadku par budynków: B-T – 55%, B-D – 48%, B-C – 44%, a produkcji energii elektrycznej odpowiednio: B-T – 39%, B-D – 45%, B-C – 48% i B-P – 88%. Pozostała niewymieniona wartość emisji jest związana z produkcją materiałów niezbędnych do wykonania remontów, a także z procesem oczyszczania ścieków i dostarczania wody pitnej do użytkowników budynków. Najmniejsze oddziaływanie w tym etapie wykazuje budynek pasywny B-P (9,7). Wynika to z tego, że zapotrzebowanie tego budynku na energię użytkową na ogrzewanie i wentylację wynosi 13 kW·h/(m²·rok). Zwiększenie izolacyjności cieplnej budynku oraz zastosowanie systemu wentylacji z rekuperacją spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło w fazie eksploatacji budynku pasywnego, jednak większa wpływ na środowisko w fazie budowy. Cykl istnienia budynku kończy jego rozbiórka i ewentualne pozyskanie oraz utylizacja materiałów. W tej fazie budynki B-T i B-P odznaczają się największymi wartościami w zakresie szkód wpływających na zdrowie ludzkie wywołanych emisją związków nieorganicznych. Jest to spowodowane przede wszystkim sortowaniem materiałów betonowych i gipsowych.



Rys. 1. Wyniki analizy cyklu istnienia budynków po normalizacji



Rys. 2. Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej, GJ/m²

Po zsumowaniu wyników normalizacji uzyskano pojedynczy wskaźnik oddziaływania budynku w pełnym cyklu istnienia (tabl. 2). Można zatem stwierdzić, że najmniejszy wpływ na środowisko zewnętrzne ma budynek pasywny – prawie 47% mniejszy w stosunku do budynku tradycyjnego. Ponadto największe obciążenie środowiska powoduje 50-letnia eksploatacja budynków. Racjonalny dobór materiałów i systemów technicznych powinien zatem obejmować pełen cykl istnienia, gdyż dzięki temu można znacząco ograniczyć całkowity wpływ obiektu na środowisko naturalne.

Tablica 2
Pojedynczy wskaźnik oddziaływania

Budynki	B-T	B-D	B-P	B-C
Wskaźnik oddziaływania, Pt	78,66	69,06	41,76	66,48

Podsumowanie

Na podstawie analiz czterech wybranych budynków jednorodzinnych, o jednakowym kształcie, ale różnych materiałach, przedstawiono możliwość oceny oddziaływania tych budynków na środowisko naturalne w pełnym cyklu ich istnienia. Dokonując analizy z wykorzystaniem metody LCA, można ocenić oddziaływanie na środowisko konkretnego wyrobu lub procesu technologicznego w całym cyklu jego istnienia bądź w jego poszczególnych etapach. Odniesienie wartości wskaźnika kategorii wpływu do wspólnej jednostki umożliwia łatwe porównanie obiektów. Wyniki analiz można uwzględnić w przypadku modernizacji lub optymalizacji istniejących przedsięwzięć i projektowaniu nowych, bardziej przyjaznych środowisku inwestycji.

Analiza pełnego cyklu istnienia budynków wykazała, że najmniejszym negatywnym oddziaływaniem na środowisko naturalne odznacza się budynek pasywny. Etap eksploatacji budynków wpływa szczególnie na środowisko w kategorii zmian klimatu i zużycia zasobów naturalnych. Czynnikiem ten jest ściśle związany ze spalaniem paliw na cele centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej oraz produkcji energii elektrycznej. Możliwością poprawy tego stanu jest wykorzystywanie materiałów o mniejszym współczynniku przewodzenia ciepła, jak również zastosowaniu bardziej energooszczędnych technologii. Ważne jest też, aby wykorzystane materiały były jak najmniej przetworzone, czyli jak najbliższe swojej naturalnej postaci. Można dokonać porównania ściany izolowanej styropianem, w której

przypadku zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej jest 27 razy większe niż ściany o konstrukcji drewnianej, której izolacja jest stoma otynkowana gliną. Recykling materiałów powinien w możliwie najmniejszym stopniu wpływać na środowisko naturalne. Materiały z recyklingu powinny być wykorzystywane lokalnie, a energia dostarczona do ich przetworzenia nie przekraczać ilości energii włożonej do wyprodukowania nowego materiału. Racjonalne wykorzystanie w całości lub części elementów i materiałów z rozbiórki umożliwia znaczne zmniejszenie wpływu na środowisko związanego z budową nowego obiektu.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Golański M.: Audyty energetyczne i materiały budowlane informacjami o zużyciu energii i kosztach eksploatacyjnych. Międzynarodowa konferencja „Rozwój miast i regionów w kierunku budownictwa zeroenergetycznego”, Warszawa 2011.
- [2] Górzyński J.: Podstawy metodyczne analizy energetyczno-ekologicznej obiektu budowlanego w pełnym cyklu istnienia. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2000.
- [3] Golański M.: Wybór materiałów budowlanych w kontekście efektywności energetycznej i wpływu środowiskowego. „Przegląd Budowlany”, nr 3/2011.
- [4] Adamczyk J.: Optymalizacja ekonomiczno-środowiskowa budynku na przykładzie zewnętrznej przegrody budowlanej. „Przegląd Budowlany”, nr 1/2009.
- [5] PN-EN ISO 14040: Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- [6] Borkowski M.: Ocena cyklu istnienia obiektów na przykładzie budownictwa jednorodzinne. „Przegląd Budowlany”, nr 3/2015.
- [7] Lewandowska A.: Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Poznań 2006.
- [8] SimaPro 7.1: Pre Consultants. Amsterdam 2010.