

prof. dr hab. inż. Hanna Michalak^{1)*}

ORCID: 0000-0001-5914-4859

mgr inż. arch. Aleksandra Torberntsson²⁾

ORCID: 0000-0003-3689-8978

Koncepcje ograniczania negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne w projektowaniu i realizacji budynków

Concepts of reducing negative environmental impact in designing and implementation in building industry

DOI: 10.15199/33.2023.04.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono współczesne koncepcje projektowania i realizacji obiektów budowlanych uwzględniające w różnym zakresie zasadę 3R Reduce-Reuse-Recycle gospodarowania odpadami. Scharakteryzowano przykłady inwestycji, w których przyjęte rozwiązania projektowe mają wpływ na ograniczenie szkodliwego ich oddziaływania na środowisko naturalne w ciągu całego cyklu życia obiektu budowlanego. Podano wnioski z przeprowadzonych analiz.

Słowa kluczowe: cykl życia budynku; zasada 3R „Zmniejszenie zużycia – ponowne użycie – przetworzenie i ponowne wykorzystanie”; gospodarowanie odpadami budowlanymi.

Abstract. The article presents contemporary concepts for the design and implementation of buildings that take into account, to varying degrees, the 3R principle of Reduce-Reuse-Recycle waste management. Building examples described in the article, contain design solutions with a impact on reducing their harmful impact on the environment throughout the life cycle of the building object. Conclusions from analysis are given.

Keywords: building life cycle; 3R principle „Reduce – Reuse – Recycle”; construction waste management.

W e współczesnym budownictwie coraz powszechniej są wdrażane rozwiązania projektowe mające na celu ograniczenie zużycia energii, emisji szkodliwych substancji zanieczyszczających środowisko, a także negatywnego ich oddziaływania na ekosystem w całym cyklu życia budynku [1]. Widoczny jest ponadto problem zwiększającej się ilości odpadów pochodzących z budownictwa. Z danych Agencji Ochrony Środowiska (EPA) wynika, że w 2018 r. łączna ilość odpadów budowlanych była dwukrotnie większa od ilości odpadów komunalnych z gospodarstw domowych i firm [2]. W agencji statystycznej *Bureau of Transportation Statistics* oszacowano, że w Stanach Zjednoczonych z procesu budowy bądź rozbiórki obiektów budowlanych pochodzi 23% odpadów [3]. Podobne problemy są diagnozowane w krajach Unii Europejskiej [4]. *Transparency Market Research* opracował prognozy wskazujące, że w 2025 r. odpady budowlane na całym świecie będą wynosiły 2,2 mld ton [2].

Jedym z podstawowych rozwiązań mających wpływ na ograniczenie ilości odpadów jest ich recykling, tj. odzysk i ponowne przetworzenie do wykorzystania w nowych produktach. Proces recyklingu obejmuje kilka etapów, tj. zebranie materiałów odpadowych oraz ich przetworzenie i sprzedaż nowego produktu [5, 6]. W Stanach Zjednoczonych aż 76% odpadów z budowy i rozbiórki zostało odzyskanych lub poddanych recyklingowi [2]. Dzięki podjęciu odpowiednich działań w sferze gospodarowania odpadami, sektor budowlany może znacznie ograniczyć emisję szkodliwych substancji oraz przestrzeni przeznaczonych na składowiska odpadów.

Stan wiedzy

Ze względu na wzrost poziomu zanieczyszczeń w ciągu ostatnich dekad zaczęto poszukiwać rozwiązań dotyczących gospodarowania odpadami, które mogłyby ograniczać szkodliwe oddziaływanie na środowisko. W „The Institute for Environmental Studies” w Madison (USA) przyjęto inicjatywę interdyscyplinarnych badań naukowych, dotyczących ochrony środowiska, w wyniku których przyjęto koncepcję gospodarowania odpadami Reduce-Reuse-Recycle, tzw. zasadę 3R [7]. W przypadku budownictwa obejmuje ona następujące działania: „**reduce**” – zmniejszenie zużycia materiałów budowlanych, zasobów naturalnych i energii potrzebnej do wzniesienia obiektu budowlanego; „**reuse**” – ponowne użycie materiałów konstrukcyjnych bądź elementów wyposażenia itp.; „**recycle**” – przetworzenie materiałów odpadowych i ich ponowne wykorzystanie [8].

Z czasem koncepcja 3R została rozbudowana o dwie kolejne sekwencje działań prośrodowiskowych, tzn. „**refuse**” – odmowę przyjęcia towaru zapakowanego w opakowanie jednorazowego użytku, promując opakowania wielokrotnego wykorzystania oraz „**repurpose**” – zmianę przeznaczenia materiałów odpadowych, czyli upcykling.

Schemat działań wg zasady 5R odzwierciedla odwrócona piramida, w której największy udział mają czynności najprostsze i najbardziej istotne z uwagi na ograniczenie ilości odpadów, tj. **refuse**, a następnie kolejne – **reduce**, **reuse**, **repurpose** i **recycle** [9, 10]. Współcześnie w budownictwie coraz częściej jest stosowany tzw. zamknięty

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

²⁾ Politechnika Warszawska, Szkoła Doktorska nr 5

^{*}) Adres do korespondencji:

hanna.michalak@pw.edu.pl

model biznesowy (*Circular Business Models*). Polega on m.in. na określeniu, w jaki sposób dane przedsiębiorstwo tworzy, oferuje i dostarcza produkty szerszemu gronu interesariuszy, minimalizując przy tym koszty ekologiczne i społeczne. Wdrożenie działań wg tego modelu skutkuje zmniejszeniem zapotrzebowania na surowce naturalne, a także opracowaniem nowych materiałów stanowiących przetworzone materiały pochodzące z rozbiórki. W gospodarce o obiegu zamkniętym podczas procesów produkcyjnych są wykorzystywane materiały odnawialne, poddane recyklingowi lub w dużym stopniu możliwe do poddania recyklingowi. Do skutecznego wdrożenia tego modelu do światowej bądź krajowej gospodarki jest wymagana wielobranżowa współpraca projektantów, dostawców, wykonawców z usługodawcami, klientów i przedstawicieli władz, w tym rządu [11].

Kolejnym istotnym elementem w globalnym procesie ograniczania odpadów jest ocena wpływu danego produktu na środowisko z uwzględnieniem analizy cyklu życia budynku, czyli LCA (*Life Cycle Assessment*), tj. od pozyskania surowców przez produkcję elementów i realizację budynku, jego użytkowanie i utylizację, w tym z uwzględnieniem energii potrzebnej do transportu (rysunek 1). Kluczowe działania obejmują: identyfikację i określenie ilości zużytej

energii, surowców, odpadów, emisji CO₂, ocenę potencjalnego wpływu wszystkich czynników na środowisko oraz zdefiniowanie dostępnych możliwości ograniczenia tego niekorzystnego wpływu [12].

W przypadku obiektów architektonicznych cykl życia materiałów budowlanych obejmuje trzy fazy. **Fazę pierwszą** stanowi pozyskanie/wydobycie surowców potrzebnych do ich produkcji, transport do zakładu produkcyjnego, a następnie wytworzenie materiału budowlanego i wbudowanie w obiekt. Podczas tej fazy występuje wiele czynników negatywnie wpływających na środowisko, tj.: zmniejszenie zasobów naturalnych; zajęcie przestrzeni w związku z budową nowego obiektu i wykorzystanie infrastruktury przemysłowej potrzebnej do produkcji materiałów budowlanych itp.; powstanie odpadów; emisja zanieczyszczeń związanych z transportem, pracą maszyn, urządzeń produkcyjnych i wydobywczych, zużycie energii tzw. wbudowanej obejmującej pracę maszyn wydobywczych, urządzeń i sprzętu w zakładzie produkcyjnym, transport, pracę maszyn budowlanych.

Faza druga dotyczy eksploatacji, podczas której mogą wystąpić różnego rodzaju prace budowlane (tożsame z fazą pierwszą) związane z bieżącą konserwacją, remontami, ewentualną przebudową, rozbudową, nadbudową itp. oraz zużyciem energii tzw. eksploatacyjnej na ogrzewanie, wentylację, klimatyzację, oświetlenie, energii elektrycznej do zasilania innych urządzeń i sprzętu itp. [13].

Trzecią fazę stanowi końcowe zagospodarowanie, czyli rozbiórka, recykling, utylizacja. Podczas tej fazy występują czynniki negatywnie wpływające na środowisko wynikające z emisji pyłów i gazów. Podobnie jak w poprzednich fazach występuje również zużycie energii tzw. przetworzeniowej związanej z transportem, pracą maszyn i urządzeń budowlanych, przetworzeniem i zagospodarowaniem odpadów. Podczas tej fazy jest istotna próba odzyskania materiałów zastosowanych w danym budynku i poddanie ich recyklingowi, ponownemu użyciu bądź zmianie funkcji i ponownemu wykorzystaniu [1, 14].

Metoda badań

Analizie poddano wybrane koncepcje budynków zaprojektowanych i wzniesionych z uwzględnieniem ograniczenia oddziaływania negatywnego na środowisko naturalne, w ciągu całego cyklu życia, z uwzględnieniem przede wszystkim zasady 3R.

Pierwsza kategoria Reduce polega na zaprojektowaniu budynku w taki sposób, aby podczas budowy, całego okresu użytkowania i rozbiórki została ograniczona jego emisyjność i zapotrzebowanie energetyczne.

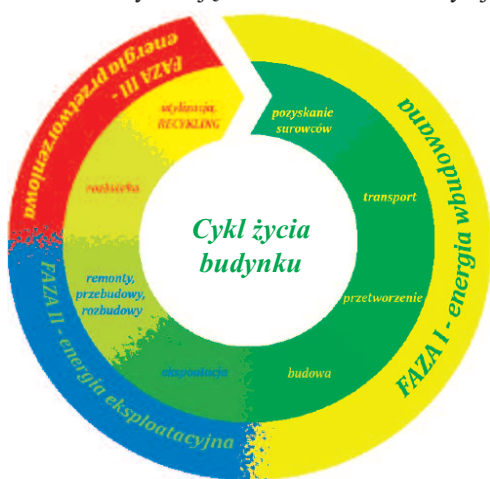
Budynek „Instytutu Aimerigues” (2018 r.) w Terrassa w Hiszpanii został zaprojektowany w sposób umożliwiający zminimalizowanie strat energii, w tym m.in. dzięki zastosowaniu technologii BIM. Zbudowano go z materiałów umożliwiających ograniczenie śladu węglowego, trwałych, nieszkodzących środowisku i łatwych do późniejszego recyklingu. Dodatkowo w budynku jest wykorzystywana energia odnawialna oraz wdrożony system gospodarowania odpadami [15].

Kompleks mieszkaniowy „Humanscapes Habitat” (2018 r.) w mieście Auroville w Indiach (rysunek 2) zaprojektowano z wykorzystaniem lokalnych materiałów (ograniczenie transportu) i wyposażono w system wytwarzania własnej energii pochodzącej z odnawialnych źródeł, zerowego odprowadzenia wody oraz recyklingu odpadów stałych [16].



Rys. 2. Budynek „Humanscapes Habitat”, w Auroville, Indie Rys. A. Torberntsson
Fig. 2. The „Humanscapes Habitat” building, in Auroville, India Fig. A. Torberntsson

Budynek „The Unisphere” (2018 r., rysunek 3) w Silver Spring (USA) został wyposażony w system elektroniczny monitorujący całkowite zużycie energii oraz koordynujący działanie instalacji



Rys. 1. Schemat ilustrujący ocenę wpływu danego produktu na środowisko z uwzględnieniem cyklu życia budynku, czyli Life Cycle Assessment Rys. A. Torberntsson
Fig. 1. Diagram illustrating the assessment of the environmental impact of a product, considering the life cycle of a building called Life Cycle Assessment Fig. A. Torberntsson



Rys. 3. Budynek „The Unisphere” w Silver Spring, USA

Rys. A. Torberntsson
Fig. 3. „The Unisphere” building in Silver Spring, USA

Fig. A. Torberntsson

ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji itp. Pasywne ogrzewanie i chłodzenie zapewniono dzięki instalacji i systemowi 52 studni (działających na zasadzie pomp ciepła) zagłębionych w podłoże grunto- we do głębokości 150 m p.p.t. W tej instalacji jest retencjonowana woda, która pobiera ciepło z gruntu do ogrzania budynku w okresie zimowym i oddaje – w okresie letnim. Budynek jest wyposażony w 3000 paneli fotowoltaicznych do produkcji energii do bieżącego użytkowania. Ewentualne nadwyżki są odprowadzane do sieci energetycznej [17].

Druga kategoria Reuse polega na umiejętności kreatywnego wykorzystania materiałów budowlanych z rozbiórek, pustostanów itp. dostępnych w najbliższej okolicy, aby ograniczyć transport i w konsekwencji zużycie energii. Budynek „Muzeum Historycznego w Ningbo” (2007 r.) ma fasadę wykonaną z ponad dwudziestu różnych rodzajów materiałów, w tym stolarki okiennej, odzyskanych z demontażu innych budowli z okolic Ningbo (rysunek 4). Dolną część elewacji murowano ze starych cegieł i dachówek, a górną wykonano jako monolityczną betonową w szalunku z bambusa [18].



Rys. 4. Muzeum Historyczne w Ningbo, Chiny

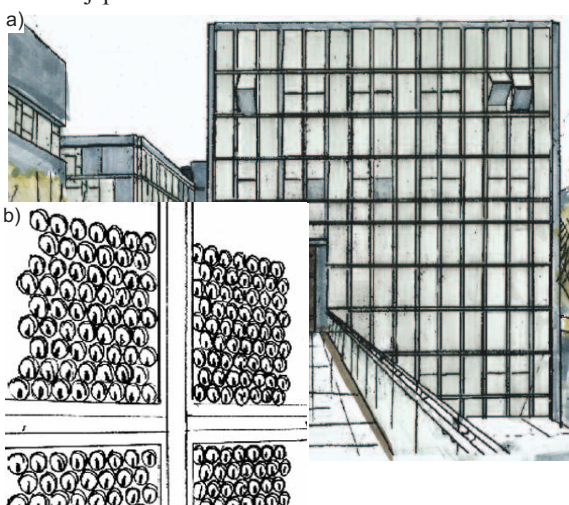
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:South_Gate_of_Ningbo_Museum.jpg, Licencja: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Generic license, autor Siyuwj, 2019]

Fig. 4. Ningbo Historic Museum in Ningbo, China

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:South_Gate_of_Ningbo_Museum.jpg, License: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Generic license, by Siyuwj, 2019]

Budynek mieszkalno-biurowy „Can Cube” (2010 r.) w Szanghaju w Chinach stanowi przykład wykorzystania odpadów gospodarczych, tj. niebudowlanych. Fasada budynku została ukształtowana z puszek aluminiowych po napojach gazowanych ułożonych w aluminiowych ramach (rysunek 5). Dzięki ponownemu użyciu puszek została zaoszczędzona energia potrzebna do ich przetworzenia [19].

„The Circular Pavilion” (2015 r.) został wzniesiony w Paryżu (rysunek 6). Elewację budynku wykonano ze 180 sztuk dębowych drzwi ułożonych w jodełkę, pozyskanych z remontów okolicznych domów. Drewniany szkielet konstrukcji nośnej budynku składa się z elementów stanowiących naddatek z innej budowy, a izolacja z wełny mineralnej pochodzi z demontażu dachu



Rys. 5. Budynek „Can Cube” w Szanghaju, Chiny: a) widok ogólny; b) detal elewacji

Rys. A. Torberntsson
Fig. 5. The „Can Cube” building in Shanghai, China: a) general view; b) facade detail

Fig. A. Torberntsson

supermarketu. Do aranżacji wnętrza wykorzystano materiały błędnie wcześniej zamówione do innych inwestycji oraz meble po uprzedniej naprawie i odświeżeniu pochodzące z odzysku [20 – 21].

„Dom z recyklingu” (2018 r.) jest zlokalizowany w Warszawie (rysunek 7). Nowa część stanowiąca rozbudowę domu jednorodzinne ma formę prostopadłościanu z tarasem. Do wykonania



Rys. 6. Pawilon „The Circular Pavilion” w Paryżu, Francja

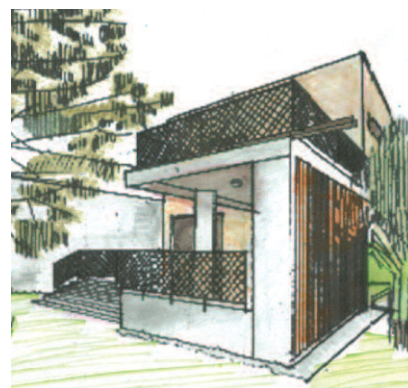
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Building_made_of_doors_(27189919919).jpg, Licencja: Creative Commons Attribution 2.0 Generic license, Zdjęcie niezmienione, autor Bobo Boom, 2018]

Fig. 6. The „Circular Pavilion” in Paris, France

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Building_made_of_doors_(27189919919).jpg, License: Creative Commons Attribution 2.0 Generic license, Unaltered photo, by Bobo Boom, 2018]

elewacji wykorzystano beton i cegły pochodzące z rozbiórki domu z zachodniej Polski [22].

Zespół zabudowy mieszkalnej „Resource Rows” (2019 r.) został zrealizowany w Kopenhadze (rysunek 8). Zespół budynków ukształtowany na planie prostokąta z wewnętrznym dziedzińcem. Dwa dłuższe boki stanowią budynki w zabudowie szeregowej o trzech kondygnacjach nadziemnych, natomiast wzdłuż krótszych boków znajdują się budynki o pięciu kondygnacjach nadziemnych.



Rys. 7. „Dom z recyklingu” w Warszawie

Rys. A. Torberntsson
Fig. 7. „Recycling House” in Warsaw

Fig. A. Torberntsson



Rys. 8. Zespół zabudowy mieszkaniowej „Resource Rows” w Kopenhadze, Dania

Rys. A. Torberntsson

Fig. 8. „Resource Rows” residential development complex in Copenhagen, Denmark

Fig. A. Torberntsson

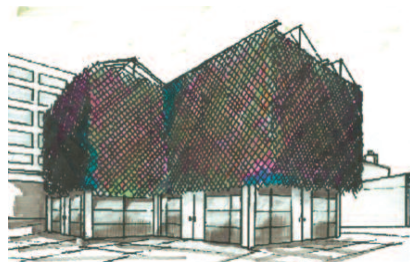
Elewacje zostały wykonane z fragmentów murów ścian o powierzchni 3 m² wyciętych ze zdemontowanych budowli. Te fragmenty murów wzmocniono stalową konstrukcją ramową zamontowaną w ścianie zewnętrznej [23]. Wykorzystano także pochodzące z odzysku: drewniane ramy okien; skrzynie do transportu elementów prefabrykowanych, a posadzki wewnętrzne wykonano z odpadów poprodukcyjnych [24].

Trzecia kategoria Recycle polega na wykorzystaniu, w sposób estetyczny i zrównoważony, materiałów budowlanych bądź wykończeniowych wykonanych z przetworzonych wcześniej odpadów zarówno gospodarczych, jak i budowlanych. „Biblioteka okręgowa” (2008 r.) w Ann Arbor w USA ma elementy konstrukcji (słupy) oraz posadzki, ściany, sufity zaprojektowane z kwalifikowanego do utylizacji drewna jesionowego zaatakowanego przez chrząszcza.

Budynek „Hanil Visitors Center & Guest House” (2009 r.) o funkcji edukacyjnej, dotyczącej recyklingu elementów z betonu, został wzniesiony w Danyang-Gun w Korei Południowej. Do wyposażenia i wykończenia wnętrza oraz elewacji budynku zastosowano beton pozyskany z demontażu. Odpady betonowe powstałe przy wznoszeniu fasady wschodniej pokruszono na kawałki o długości 10 – 20 cm, a następnie umieszczono w siatce gabionowej tworzącej elewację południową budynku [25].

Pawilon „People’s Pavilion” (2017 r.) w Eindhoven w Holandii zaprojektowano jako tymczasowy, o okresie użytkowania wynoszącym 2 tygodnie (rysunek 9), w którym w 100% wykorzystu-

je się ideę obiegu zamkniętego materiałów. Zostało to osiągnięte dzięki wykorzystaniu wszystkich materiałów budowlanych i elementów konstrukcji nośnej, m.in. belek betonowych i drewnianych, okładzin, oświetlenia itp. Elementy konstrukcji pawilonu były scalane taśmami stalowymi i 350 pasami napinającymi, bez użycia łączników śrubowych itp. Okładzina elewacyjna została wykonana z kolorowych płytek z tworzywa sztucznego z zebranych przez mieszkańców Eindhoven i przetworzonych odpadów. Po zakończeniu użytkowania pawilon został zdemontowany, a jego elementy w stanie nieuszkodzonym zwrócone [26].



Rys. 9. Tymczasowy obiekt „People’s Pavilion” w Eindhoven, Holandia

Rys. A. Torberntsson

Fig. 9. Temporary facility „People’s Pavilion” in Eindhoven, Netherlands Fig. A. Torberntsson

Budynek „Naju Art Museum” (2017 r.) znajdujący się w Naju w Korei Południowej zostanie zdemontowany po zakończeniu przewidywanego na 2 lata użytkowania, a jego elementy wykorzystane do montażu nowego budynku w innym miejscu. Elewację wykonano z 1500 półprzezroczystych, lekkich, ko-

szy z tworzywa sztucznego, możliwych do recyklingu bądź ponownego łatwego montażu w innym miejscu i dowolnej konfiguracji. Obiekt został wykonany z materiałów łatwych do demontażu i wykorzystania w kolejnym obiekcie bądź recyklingu [27].

Omówienie wyników

Przedstawione budynki poddano analizie dotyczącej wpływu przyjętych rozwiązań na środowisko naturalne w ciągu całego cyklu ich życia, w tym w fazie I – obejmującej energię wbudowaną, fazie II – energię eksploatacyjną i fazie III – energię przetworzeniową (rysunek 1).

Na podstawie wyników analiz zestawionych w tabeli stwierdzono, że najczęściej projektanci skupiają się na czynnikach „prośrodowiskowych”, dotyczących pierwszej fazy cyklu życia materiałów i obiektów budowlanych, np. przez ponowne wykorzystanie materiałów bądź pochodzących z recyklingu (Muzeum Historyczne w Ningbo), ograniczenie zasięgu transportu dzięki zastosowaniu materiałów lokalnych (Resource Rows). Należy nadmienić, że stosowanie materiałów z recyklingu skutkuje również oszczędnością energii potrzebnej do wykonania nowego materiału czy utylizacji elementów porzbiórkowych (People’s Pavilion), bądź wymaganą do przetworzenia danego materiału (Can Cube).

Zużycie energii w czasie budowy można ograniczyć dzięki optymalizacji procesu inwestycyjnego, wykorzy-

Czynniki mające wpływ na zmniejszenie emisyjności budynku

Factors influencing the reduction of buildings emission

Przykładowe obiekty	Faza I				Faza II		Faza III	
	pozyskanie surowców	transport	przetworzenie	budowa	eksploatacja	re-monty itp.	rozbiórka	utyli-zacja, przetworzenie
Reduce	Instytut Aimerigues	-	-	-	+	+	-	+
	Humanscapes Habitat	+	+	-	-	+	-	-
	The Unisphere	-	-	-	-	+	+	-
Reuse	Muzeum Historyczne w Ningbo	+	+	+	-	-	-	-
	Can Cube	+	+	+	-	+	-	-
	The Circular Pavilion	+	+	+	-	-	-	-
	Dom z Recyklingu	+	-	+	-	-	-	-
	Resource Rows	+	+	+	-	+	-	-
Recycle	Biblioteka w Ann Arbor	+	+	+	-	-	-	-
	Hanil Visitors Center & Guest House	+	+	+	+	-	-	-
	People's Pavilion	+	-	+	+	-	-	+

stując np. technologię BIM (Instytut Aimerigues), a nawet racjonalizując użycie sprzętu czy narzędzi (People's Pavilion). W celu ograniczenia zużycia energii eksploatacyjnej coraz powszechniej są wykorzystywane odnawialne źródła energii (OZE) oraz wdrażane systemy monitorowania i sterowania urządzeniami wewnątrz budynku (Instytut Aimerigues, Humanscapes Habitat, The Unisphere, Can Cube, Resource Rows).

Rzadko w rozwiązaniach projektowych obiektów uwzględniana jest faza III obejmująca analizy możliwości wykorzystania wyeksploatowanych materiałów do recyklingu bądź ponownego użycia. Wyjątek stanowi projekt Instytutu Aimerigues uwzględniający zastosowanie materiałów pasywnych możliwych do recyklingu, People's Pavilion – wykonany z elementów pożyczonych z myślą o jego rozbiórce, czy Naju Art Museum zaprojektowany z myślą o ponownym użyciu jego elementów, tj. koszy elewacyjnych, do budowy kolejnych obiektów.

Wnioski

Ze względu na negatywny wpływ budownictwa na środowisko naturalne, w tym emisję szkodliwych substancji i gazów, zanieczyszczenie wód gruntowych, generowanie odpadów itp. konieczne jest holistyczne podejście do projektowania obiektów budowlanych uwzględniające aspekty próśrodowskowe we wszystkich fazach cyklu ich życia.

Na podstawie analizy wybranych przykładów procesów projektowania i realizacji budynków można wnioskować, że najczęściej wdrażaną metodą gospodarowania odpadami jest Reuse, czyli **ponowne wykorzystanie**. Metoda ta, ze względu na brak bądź ograniczoną konieczność przetwarzania, wykorzystuje w niewielkim stopniu zasoby energetyczne, co w konsekwencji ma przełożenie na mniejszy koszt materiału wynikający zazwyczaj tylko z kosztów transportu i ewentualnej obróbki. Ze względu na energochłonność transportu i emisję spalin istotne jest ograniczenie jego zasięgu oraz pozyskiwanie materiałów z bliskiego sąsiedztwa danej inwestycji. Dodatkowym atutem po-

nownego wykorzystania materiałów, w odmienny sposób niż w przypadku pierwotnej funkcji, jest zaskakujący i nieoczywisty efekt wizualny (np. okładzina elewacyjna ukształtowana ze stolarki drzwiowej).

Należy mieć nadzieję, że powszechność działań próśrodowskowych oraz zwiększenie wiedzy inwestorów, projektantów, wykonawców oraz użytkowników obiektów budowlanych w tej dziedzinie przyczyni się do powszechnego wykorzystania również metod Recycle i Reduce, a także popularyzacji Refuse i Repurpose.

Literatura

- [1] Borkowski M. Ocena cyklu istnienia obiektów na przykładzie budownictwa jednorodzinnego. *Przegląd Budowlany*. 2015; 3: 15 – 21.
- [2] 23 Construction Waste Statistics & Tips to Reduce Landfill Debris, BigRentz, 2021, <https://www.bigrentz.com/blog/construction-waste-statistics>.
- [3] Municipal Solid Waste and Construction & Demolition Debris, 2016, https://www.bts.gov/archive/subject_areas/freight_transportation/faf/faf4/debris.
- [4] Construction & demolition waste generation in the EU, Smart Waste. 2021, <https://projects2014-2020.interregeurope.eu/smartwaste/news/news-article/11804/construction-demolition-waste-generation-in-the-eu/>.
- [5] Recycling, Britannica. <https://www.britannica.com/science/recycling>.
- [6] Bednarek W, Pawłowski M. Recykling staroużytecznej podsypki tłuczniowej na warstwy ochronne zapewniające trwałość podtorza podczas postępującej degradacji nawierzchni kolejowej. *Materiały Budowlane*. 2022, DOI: 10.15199/33.2022.10.25.
- [7] Weisz N. The Story Behind Three R's: Reuse, Reduce, Recycle. <https://enviroinc.com/reduce-reuse-recycle/>.
- [8] Kabirifar K, Mojtahedi M, Wang C, Tam VWY. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121265.
- [9] Ping Tsemg H, Chou Ch-M, Chang Y-T. The Key Strategies to Implement Circular Economy in Building Projects – A Case Study of Taiwan. *Sustainability*. 2021, <https://doi.org/10.3390/su13020754>.
- [10] What are the 5R's of the Waste Hierarchy? 2021, <https://galleryclimatecoalition.org/news/60-what-are-the-5-rs-of-the-waste/>.
- [11] Magdani N, Carra G. ARUP & BAM. Circular business models for the built environment. 2016, <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-business-models-for-the-built-environment>.
- [12] Klöpffer W., Grahl B. Life Cycle Assessment (LCA) – A Guide to Best Practice. Wiley-VCH, 2014.

[13] Marchwiński J, Starzyk A, Kopyłow O. Kontekst energetyczny wykorzystania materiałów budowlanych w projektowaniu energoefektywnych budynków przedszkolnych – spojrzenie architektoniczne. *Materiały Budowlane*. 2022, DOI: 10.15199/33.2022.06.04.

[14] Geryło R. Wskaźniki energetyczne w ocenie środowiskowej budynków i wyrobów budowlanych. *Przegląd Budowlany*. 2017; 10: 13 – 14.

[15] Ott C. Aimerigues Institute/Barceló Balanzó Arquitectes + Xavier Gracia. *Archdaily*, 2021, <https://www.archdaily.com/930144/les-aimerigues-institutei-barcelo-balanzo-arquitectes-plus-xavier-gracia>.

[16] Pintos P. Humanscapes Habitat Urban Living/Auroville Design Consultan. 2021, *Archdaily*, <https://www.archdaily.com/928779/humanscapes-habitat-urban-living-auroville-design-consultant>.

[17] Cimons M. A Peak Inside The Unisphere, One Of The World's Largest Net-Zero Buildings. 2019, <https://cleantechnica.com/2019/12/31/a-peak-inside-the-unisphere-one-of-the-worlds-largest-net-zero-buildings/>.

[18] Yang J. An Analysis of the Design Concept of Modern Urban History Museums from the Controversy Related to the Architectural Appearance of Ningbo Museum. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 2022, <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220502.057>.

[19] Can Cube/Archi-Union Architects. *Archdaily*, 2010, <https://www.archdaily.com/85278/can-cube-archi-union-architects-inc>.

[20] Huygen J-M. The Circular Pavilion/Encore Heureux Architects. *Archdaily*, 2015, <https://www.archdaily.com/778972/the-circular-pavilion-encore-heureux-architects>.

[21] Frearson A. Encore Heureux uses recycled materials to build Circular Pavilion in Paris. *Dezeen*, 2015, <https://www.dezeen.com/2015/12/18/circular-pavilion-encore-heureux-paris-france-recycled-materials-doors/>.

[22] MAZM. Dom z Recyklingu. <https://mazm.pl/dom-z-recyklingu>.

[23] Kazminska U. Circular design: reused materials and the future reuse of building elements in architecture. Process, challenges and case studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 225 (2019) 012033 *IOP Publishing* DOI: 10.1088/1755-1315/225/1/012033.

[24] Wilson R. Old into new: Recycled bricks form facade of Copenhagen housing project. 2019, <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/old-into-new-recycled-bricks-form-facade-of-copenhagen-housing-project>.

[25] Etherington R. Hanil Visitors Center and Guest House by BCHO. *Dezeen*, 2010, <https://www.dezeen.com/2010/08/02/hanil-visitors-center-and-guest-house-by-bcho/>.

[26] Pintos P. People's Pavilion/bureau SLA + Overtreders W. *Archdaily*. 2019, <https://www.archdaily.com/915977/peoples-pavilion-bureau-sla-plus-overtreders-w>.

[27] 1,500 Semi-Transparent Plastic Baskets Form a Lightweight Facade. *Archdaily*, 2017, <https://www.archdaily.com/881513/1500-semi-transparent-baskets-to-build-a-lightweight-facade>.

Przyjęto do druku: 27.02.2023 r.