

Analiza wykorzystania kontenerów morskich w budownictwie mieszkaniowym w kontekście gospodarki cyrkulacyjnej. Część II

Analysis of the use of sea containers in housing construction in the context of the circular economy. Part II

mgr inż. Martyna Skorupa, JACOBS, prof. dr hab. inż. Anna Sobotka (ORCID: 0000-0002-4477-8821), AGH Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie

DOI 10.5604/01.3001.0016.3260

Streszczenie: Artykuł przedstawia zagadnienie wykorzystania odpadów w budownictwie na przykładzie kontenerów transportowych. Jest ono sednem logistyki zwrotnej oraz gospodarki cyrkulacyjnej. Analizę i ocenę wykorzystania kontenerów transportowych do budowy budynków wykonano na przykładzie autorskiego projektu domu jednorodzinnego z kontenerów morskich w porównaniu do budynku w technologii tradycyjnej. Zaprezentowano wyniki obliczeń wskaźników Ecopoint, dla obu technologii, wskazując wpływ rozwiązań materiałowych na środowisko. Ocenę technologii wykonano za pomocą analizy wielokryterialnej oraz macierzy SWOT. Według WT2021 technologia kontenerowa może być z powodzeniem stosowana. Natomiast decyzja uzależniona jest od potrzeb inwestora z przewagą celowości stosowania technologii kontenerowej do budynków użyteczności publicznej i komercyjnej.

Słowa kluczowe: zagospodarowanie odpadów, kontenery transportowe, domy z kontenerów, ocena wielokryterialna, SWOT.

Abstract: The paper presents the issue of the use of waste in the construction industry using the example of transportation containers. It is at the heart of reverse logistics and the circular economy. The analysis and evaluation of the use of shipping containers for the construction of buildings was made on the example of the author's design of a single-family house from shipping containers in comparison with a building with traditional technology. The results of Ecopoint index calculations, for both technologies, were presented, indicating the impact of material solutions on the environment. The evaluation of technologies was carried out using multi-criteria analysis, and a SWOT matrix. According to WT2021, container technology can be successfully applied. However, the decision depends on the needs of the investor with the predominance of the desirability of using container technology for public and commercial buildings.

Keywords: waste management, shipping containers, container houses, multi-criteria evaluation, SWOT.

1. Wprowadzenie

Artykuł niniejszy jest powiązany z artykułem przedstawionym w „Przeglądzie Budowlanym” 1-2/2023, który zawiera uzasadnienie podjęcia tematu wykorzystania kontenerów morskich do budowy budynków. Przedstawiono w nim opis konstrukcji kontenera w aspekcie zastosowania go w budownictwie mieszkaniowym, przykładowe realizacje takich budynków na świecie, podano opis technologii budowania z kontenerów, a także porównano technologie budowania: tradycyjną z elementów drobnowymiarowych oraz z wykorzystaniem kontenerów, w kontekście wymagań wskazanych w ustawie Prawo budowlane.

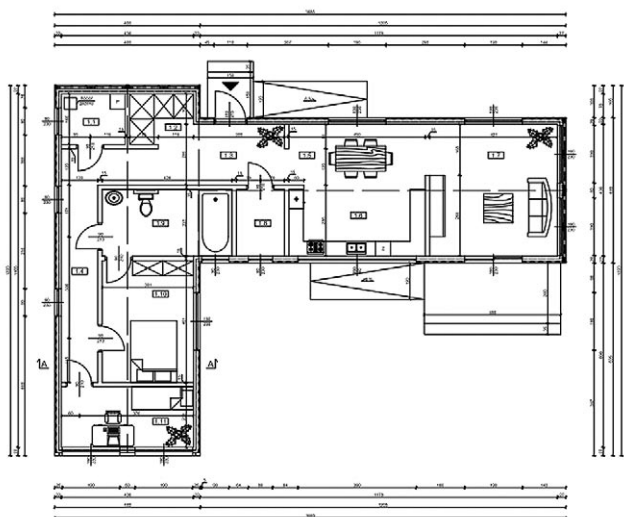
W tej części opracowania przedstawiono autorski projekt domu jednorodzinnego z kontenerów oraz wybrano do analizy porównawczej dom wykonany w technologii tradycyjnej o podobnej powierzchni użytkowej i zbliżo-

nych parametrach, z dostępnych katalogów [4]. Warianty domów oceniono za pomocą dwóch metod analizy wielokryterialnej: wskaźników syntetycznych [5] i AHP (Analytical Hierarchy Processes [6]) oraz macierzy SWOT. Analiza wyników wskazuje wady i zalety obu technologii, zwłaszcza w kontekście gospodarki cyrkulacyjnej i zrównoważonego rozwoju.

2. Charakterystyka badanego budynku kontenerowego

2.1. Opis techniczny

Opis zaprojektowanego budynku wykonano według zapewnienia spełnienia wymagań art. 5. Prawa budowlanego. Dodatkowo obliczono wskaźniki Ekopoint zarówno dla budynku kontenerowego, jak i tradycyjnego w celu dokładnej ich oceny środowiskowej (rozd. 3).



Rys. 1. Rzut parteru z układem funkcjonalno-użytkowym

Zaprojektowano dom jednorodzinny parterowy, niepodpiwniczony, z 4 używanych kontenerów transportowych z lokalizacją w Krakowie. Powierzchnia zabudowy wynosi 116,40 m², użytkowa – 97,08 m², kubatura – 242,69 m³. Projektowane rozwiązanie funkcjonalno-użytkowe domu i elewacje przedstawiają rysunki 1 i 2.

Budynek posadowiono na 28 fundamentach podporowych o wymiarach 40x40 cm wykonanych z betonu C16/20, na głębokości 1 m. Punkty podporowe zostaną wypuszczone około 10 cm ponad podłoże oraz odpowiednio wypoziomowane. Budynek jest przymocowany do fundamentu kotwami wklejanymi M12 ze względu na podmuchy wiatru.

Konstrukcja nośna stalowa jest oparta na konstrukcji kontenera 40 stopowego High Cube o wymiarach zewnętrznych 12 192,00/2438,00/2896,00 mm, z kształtowników giętych na zimno, spawana i skręcana, malowana na kolor RAL 7021 półmat (ciemnoszary). Ramy nośne podłogi i stropodachu są wykonane z kształtowników stalowych, połączone ze sobą słupkami narożnymi. Do ramy podłogi przyspawane są elementy nośne. Konstrukcja została wzmocniona przy otworach okiennych i drzwiowych (z PCV). Opierzenie wykonano z ocynkowanej blachy aluminiowej. Elementy są montowane i przykręcane do płaszcza kontenera. Okna wyposażono w manualne nawiewniki ciśnieniowe z płynną regulacją.

Rys. 2. Elewacje: a) północna, b) południowa, c) wschodnia, d) zachodnia



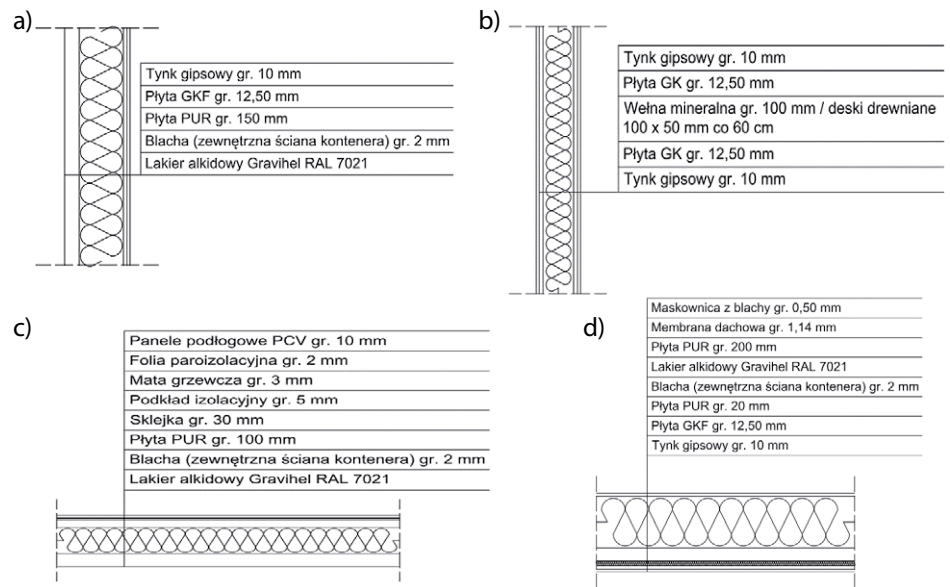
Instalacja elektryczna – instalacja oświetleniowa wraz z instalacją gniazd wtykowych 230 V, poprowadzona podtynkowo. Instalacja grzewcza – w całym domu jest elektryczne ogrzewanie podłogowe w postaci folii grzewczej TF-310TL układanej pod panelami podłogowymi. Regulacja temperatury – za pomocą termostatu. W łazience jest ogrzewanie grzejnikiem elektrycznym.

Instalacja wentylacyjna – powietrze wyciągane za pomocą wentylatorów mechanicznych znajdujących się w kuchni i łazience. Wyprowadzanie powietrza następuje przez kominy znajdujące się na bocznej ścianie kontenera. Nawiew zapewniony jest przez manualne nawiewniki ciśnieniowe w ramach okiennych, z płynną regulacją. Dodatkowo wymianę powietrza można prowadzić poprzez otwieranie okien.

Instalacja wodno-kanalizacyjna jest poprowadzona podtynkowo. Instalacja wodociągowa jest doprowadzona z istniejącego przyłącza na terenie działki. Wykonana z rur PERT-Al-PERT. Instalacja kanalizacyjna jest wykonana z rur PP. Wyjście wodno-kanalizacyjne jest umieszczone w ścianie zewnętrznej. Rury znajdujące się na zewnątrz są zaizolowane pianką i wełną mineralną. Woda ogrzewana jest podgrzewaczem elektrycznym. Ścieki są odprowadzane do miejskiej sieci kanalizacyjnej.

Zabezpieczenie przeciwpożarowe – kategoria zagrożenia ludzi: ZL IV, grupa wysokości: niskie (N), klasa odporności pożarowej: D, ściany konstrukcyjne oraz dach nierozprze-strzeniające ognia.

Rys. 3. Przekroje przez: a) ścianę zewnętrzną, b) ścianę wewnętrzną, c) podłogę, d) dach (źródło: opracowanie własne)



Układ zaprojektowanych warstw izolacyjno-wykończeniowych przegród pionowych i poziomych przedstawia rysunek 3. Zgodność z wymogami przepisów ochrony cieplnej budynków sprawdzono za pomocą programu ArCADia-TERMOCAD 7.5. Budynek został zlokalizowany w Krakowie, w związku z czym wszelkie dane klimatyczne przyjęto dla stacji Kraków – Balice. Wartości współczynników przenikalności cieplnej budynku są następujące: ściany zewnętrzne – $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (WT 2021 – $U_{max} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$), podłoga – $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ (WT 2021 – $U_{max} = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$), dach – $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ (WT 2021 – $U_{max} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$), okna – $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ (WT 2021 – $U_{max} = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$), drzwi – $U = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ (WT 2021 – $U_{max} = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$).

3. Charakterystyka ekologiczna

Dla budynków w obu technologiach wykonano analizę środowiskową poprzez obliczenie wskaźnika Ecopoint. Daje to możliwość szczegółowego określenia wpływu poszczególnych rozwiązań materiałowych elementów bu-

dynku na środowisko. W tym celu zestawiono materiały dla przegród zewnętrznych, tj. dachu, podłogi na gruncie oraz ściany zewnętrznej. Na podstawie wykazu ilościowego wpływu na środowisko przez cały cykl życia produktu, zawartego w deklaracjach środowiskowych produktów typu III (EPD), określono wskaźnik emisyjności każdego z materiałów tworzących daną przegrodę – Ww . Wskaźniki są wyrażone w różnych jednostkach, dlatego dokonano normalizacji, czyli określenia dla każdej z kategorii skutków powodowanych przez jednego Europejczyka rocznie. W tym celu posłużono się współczynnikami normalizacji – Wn oraz wagami przypisanymi każdej kategorii wpływu przedstawionymi w tabeli 1 przyjętymi na podstawie [21]. Analizując materiały składające się na poszczególne prze-

Tabela 1. Zastosowane współczynniki normalizacji oraz wagi kategorii wpływu [21]

Oznaczenie kategorii $j = 1, 2, \dots, 11$	Kategorie wpływu	Jednostka	Współczynnik normalizacji Wn_j	Waga j
1	GWP – potencjał globalnego ocieplenia (zmiany klimatu)	kg CO ₂ equiv.	12 300,00	0,240
2	FW – zużycie netto świeżej wody (parametr o wykorzystaniu zasobów)	m ³	377,00	0,152
3	ODP – potencjał niszczenia warstwy ozonowej	kg CFC-11 equiv.	0,22	0,135
4	AP – Potencjał zakwaszania	kg SO ₂ equiv.	71,20	0,084
5	EP – Potencjał eutrofizacji	kg PO ₄ equiv.	32,50	0,082
6	RWD – unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych (parametr dotyczący kategorii odpadów)	kg	3,91	0,070
7	ADP-E – potencjał abiotycznego wyczerpywania zasobów niekopalnych (pierwiastki)	kg Sb equiv.	39,1	0,066
8	POCP – potencjał tworzenia ozonu troposferycznego	kg C ₂ H ₄ equiv.	21,50	0,058
9	HWD – unieszkodliwianie odpadów niebezpiecznych (parametr dotyczący odpadów)	kg	187,43	0,050
10	ADP-F – potencjał abiotycznego wyczerpywania zasobów kopalnych (paliwa kopalne)	MJ	273 000,00	0,040
11	NHWD – unieszkodliwianie odpadów innych niż niebezpieczne (parametr dotyczący odpadów)	kg	3 750,00	0,021

grody zewnętrzne budynku, nie obliczano ich ilości użytej do budowy obiektu, skupiono się na oddziaływaniu samego produktu na otoczenie. Z tego względu w pierwszej kolejności dokonano normalizacji wartości wskaźnika dla poszczególnych kategorii ($Wz = Ww/Wn$) (tab. 1), następnie te wartości pomnożono przez ich wagi. Sumując te wartości dla 11 kategorii, otrzymuje się wartość Ecopointu poszczególnego materiału – $E_{pi} = \sum (Wz_{ij} \cdot waga_j)$. Suma wartości E_{pi} wszystkich materiałów stanowi łączną wartość Ecopoint danego rozwiązania materiałowego budynku. Pomimo uproszczonego sposobu obliczenia wskaźników Ecopoint dla obu technologii uzyskane wyniki pozwalają na ocenę ich wpływu na środowisko.

Zestawienie materiałów tworzących poszczególne przegrody wraz z wynikami obliczeń wskaźnika Ecopoint dla budynku w technologii kontenerowej zawiera tabela 2.

Wskaźnik Ecopoint dla wariantu I – kontenerowego jest równy: $Ecopoint_I = 1,26E-02$.

Taką samą analizę przeprowadzono również dla materiałów tworzących poszczególne przegrody w technologii tradycyjnej, aby móc porównać poziom emisyjności obu wariantów. Kolejne wyniki obliczeń prezentują tabele 3 i 4.

Wskaźnik Ecopoint dla wariantu II jest równy: $Ecopoint_{II} = 6,20E-02$.

Dane zawarte w tabelach 2, 3, 4 wskazują na duże różnice w emisyjności materiałów przegród budowlanych. Po przeanalizowaniu wielkości wskaźników oddziaływania na środowisko dla konkretnych materiałów pozyskanych z deklaracji EPD okazało się, że budynek kontenerowy jest pod tym względem bardziej ekologiczny. W wariantcie I materiałem o największej emisyjności okazały się płyta PUR oraz płyta gipsowo-kartonowa, których wskaźniki E_p wynoszą kolejno $1,23E-04$ i $1,61E-04$. Natomiast w przypadku wariantu II są to belki drewniane $E_p = 1,97E-02$ oraz zaprawa cementowa (podkład pod posadzkę) $E_p = 2,64E-02$.

Sprawdzono również zapotrzebowanie budynków na energię za pomocą programu ArCADia-Termocad. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Wartość graniczna dla zużycia EP (energii pierwotnej) wynosi według WT2021 $70 \text{ kWh/m}^2\text{rok}$ i nie jest w obu przypadkach przekroczona. Natomiast zastosowanie w wersji kontenerowej urządzeń do produkcji energii ze źródeł odnawialnych zmniejszyło koszty zakupu energii dla budynku. Budynki budowane w technologii tradycyjnej też

Tabela 2. Wskaźnik Ecopoint dla materiałów wykorzystanych w wariantcie I

Wskaźniki kategorii oddziaływań na środowisko	Wskaźniki	Materiał								
		Blacha	Płyta PUR	Płyta g-k	Tynk gipsowy	Sklejka	Folia budowlana	Deski podłogowe	Membrana	
1	GWP	Ww	2,69	3,20	3,58	0,10	286,00	1,78	5,48	1,78
	kg CO ₂ equiv.	Wz	2,19E-04	2,60E-04	2,91E-04	8,13E-06	2,33E-02	1,45E-04	4,46E-04	1,45E-04
2	ODP	Ww	2,24E-11	4,06E-06	6,09E-07	9,24E-09	3,91E-05	1,83E-07	-2,20E-10	1,83E-07
	kg CFC11 equiv.	Wz	1,66E-10	3,01E-05	4,51E-06	6,84E-08	2,90E-04	1,36E-06	-1,63E-09	1,36E-06
3	AP	Ww	6,04E-03	8,30E-03	1,11E-02	1,72E-05	2,14E-01	1,13E-02	4,80E-03	1,13E-02
	kg SO ₂ equiv.	Wz	2,33E-12	4,22E-07	6,34E-08	9,61E-10	4,07E-06	1,90E-08	-2,29E-11	1,90E-08
4	EP	Ww	6,50E-04	1,10E-03	1,79E-03	3,37E-04	1,45E+00	2,25E-04	2,78E-04	2,25E-04
	kg (PO ₄) ³⁻ equiv.	Wz	2,00E-05	3,38E-05	5,51E-05	1,04E-05	4,46E-02	6,92E-06	8,55E-06	6,92E-06
5	POCP	Ww	6,22E-04	1,30E-03	5,09E-04	9,17E-05	4,40E-01	6,23E-03	-1,15E-03	6,23E-03
	kg C ₂ H ₄ equiv..	Wz	2,89E-05	6,05E-05	2,37E-05	4,27E-06	2,05E-02	2,90E-04	-5,35E-05	2,90E-04
6	ADP-e	Ww	1,62E-04	7,64E-06	6,23E-06	3,20E-08	7,75E-04	2,04E-04	7,86E-06	2,04E-04
	kg Sb equiv.	Wz	4,14E-06	1,95E-07	1,59E-07	8,18E-10	1,98E-05	5,22E-06	2,01E-07	5,22E-06
7	ADP-f	Ww	31,70	68,10	54,30	1,50	3970,00	24,20	4,69	24,20
	MJ	Wz	1,16E-04	2,50E-04	1,99E-04	5,50E-06	1,45E-02	8,86E-05	1,72E-05	8,87E-05
8	FW	Ww	2,07E-03	1,70E-02	2,36E-02	3,86E-04	1,59E-01	3,34E-02	2,79E-02	3,34E-02
	m ³	Wz	5,49E-06	4,51E-05	6,26E-05	1,02E-06	4,22E-04	8,86E-05	7,40E-05	8,86E-05
9	HWD	Ww	6,15E-02	1,30E-03	1,67E-04	6,88E-06	1,09E-02	0,00	1,31E-03	0,00
	kg	Wz	3,28E-04	6,94E-06	8,91E-07	3,67E-08	5,82E-05	0,00	6,99E-06	0,00
10	NHWD	Ww	8,11E-02	5,37E-02	11,90	1,00	1,17E+02	0,00	0,08	0,00
	kg	Wz	2,16E-05	1,43E-05	3,17E-03	2,67E-04	3,12E-02	0,00	2,13E-05	0,00
11	RWD	Ww	0,00	1,80E-03	0,00	0,00	2,26E-02	0,00	-0,01	0,00
	kg	Wz	0,00	4,60E-04	0,00	0,00	5,78E-03	0,00	-2,56E-03	0,00
Ecopoint _i dla danego (i-tego) materiału			1,22E-02	6,98E-05	-6,13E-05	6,98E-05	9,13E-06	5,15E-03	2,91E-03	9,06E-06

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3. Wskaźnik Ecopoint dla materiałów wykorzystanych w wariantie II – tradycyjnym

Wskaźniki kategorii oddziaływań na środowisko z jednostką	Materiał		Tynk cementowy	Beton komórkowy	Styropian	Tynk gipsowy	Beton C20/25	Folia budowlana
	Wskaźnik							
1	GWP	Ww	0,25	163,80	59,24	0,10	250,00	1,78
	kg CO ₂ equiv.	Wz	2,03E-05	1,30E-02	4,82E-03	8,13E-06	2,03E-02	1,45E-04
2	ODP	Ww	1,93E-08	9,54E-06	-2,02E-06	9,24E-09	9,89E-10	1,83E-07
	kg CFC 11 equiv.	Wz	8,77E-08	4,34E-05	-9,18E-06	4,20E-08	4,50E-09	8,32E-07
3	AP	Ww	9,04E-04	4,35E-01	1,77E-01	1,72E-05	9,89E-10	1,83E-07
	kg SO ₂ equiv.	Wz	1,27E-05	6,11E-03	2,49E-03	2,42E-07	4,50E-09	8,32E-07
4	EP	Ww	8,26E-05	1,33E-01	9,45E-02	3,37E-04	5,18E-01	1,13E-02
	kg (PO ₄) ³⁻ equiv.	Wz	2,54E-06	4,09E-03	2,91E-03	1,04E-05	7,28E-03	1,59E-04
5	POCP	Ww	7,20E-04	3,00E-02	5,65E-02	9,17E-05	6,80E-02	2,25E-04
	kg C ₂ H ₄ equiv.	Wz	3,35E-05	1,40E-03	2,63E-03	4,27E-06	2,09E-03	6,92E-06
6	ADP-e	Ww	2,17E-07	2,59E-04	4,24E-01	3,20E-08	1,09E-05	2,04E-04
	kg Sb equiv.	Wz	5,55E-09	6,62E-06	1,08E-02	8,18E-10	2,79E-07	5,22E-06
7	ADP-f	Ww	1,95	1211,00	863,01	1,50	1959,00	24,20
	MJ	Wz	7,14E-06	4,40E-03	3,16E-03	5,50E-06	7,18E-03	8,87E-05
8	FW	Ww	1,78E-03	2,05E+00	1,29E-01	3,86E-04	2,29E-01	3,34E-02
	m ³	Wz	4,72E-06	5,44E-03	3,42E-04	1,02E-06	6,07E-04	8,86E-05
9	HWD	Ww	0,00	2,00E-03	3,00E-01	6,88E-06	1,02E-02	0,00
	kg	Wz	0,00	1,07E-05	1,60E-03	3,67E-08	5,44E-05	0,00
10	NHWD	Ww	0,00	3,30E-01	31,49	1,00	158,20	0,00
	kg	Wz	0,00	8,8E-05	8,40E-03	2,67E-04	4,22E-02	0,00
11	RWD	Ww	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00E-02	0,00
	kg	Wz	0,00	0,00	0,00	0,00	7,67E-03	0,00
Ecopoint _i dla danego (i-tego) materiału			9,13E-06	5,15E-03	2,91E-03	9,06E-06	7,50E-03	8,31E-05

Źródło: opracowanie własne

mogą być wyposażone w urządzenia ograniczające zużycie energii ze źródeł nieodnawialnych.

4. Ocena porównawcza budynku w technologii kontenerowej i tradycyjnej

Ocenę budynku kontenerowego wykonano, porównując go do podobnego domu realizowanego w powszechnie stosowanej w Polsce technologii tradycyjnej (patrz część I artykułu, 1–2/2023 PB). Do oceny wielokryterialnej wybrano kryteria, których wartości przedstawiono w tabeli 6. Inne bardzo istotne parametry budynków ważne w ocenie spełnienia zasad bezpiecznego użytkowania i ochrony środowiskowej zostały określone podczas projektowania budynków [22] i spełniają wymagane przepisami prawnymi wartości brzegowe. Dlatego też nie były w analizie wielokryterialnej uwzględnione jako kryteria wyboru.

Porównawcza analiza wielokryterialna została wykonana za pomocą dwóch znanych metod, tj. wskaźników synte-

tycznych oraz AHP Saaty'ego opisanych np. w [6]. Pośrednie wyniki obliczeń wykonane przez autorkę M. Skorupę znajdują się w pracy [22]. Ostateczne wyniki obliczeń – wartości wskaźników globalnych zawiera tabela 7.

Obliczenia w metodzie wskaźników syntetycznych (pięciu) wykonano, stosując 2 metody sprowadzenia wartości kryteriów do jednej jednostki miarowej (normowanie i Pattern). Uzyskano różne wartości wskaźników globalnych dla przyjętych metod kodowania, z przewagą dla wariantu kontenerowego W2 (na 10 wskaźników tylko 2 nieznacznie mniejsze dla rozwiązania kontenerowego).

Natomiast w metodzie AHP lepsza ocena jest wariantu tradycyjnego. Ale także pośrednie (etapowe) wyniki obliczeń nie były jednoznaczne, wykazywały niekonsekwencje w ocenach ekspertów. Mimo tego globalny wskaźnik wyróżnia technologię tradycyjną. Otrzymane wyniki w tym przypadku nie są jednoznaczne.

Wyniki analizy wielokryterialnej w dużym stopniu uzależnione są też od przyjętych wag. W analizowanym przypadku na wyniki wpłynęły dwa bardzo istotne kryteria w oce-

Tabela 4. Wskaźnik Ecopoint dla materiałów wykorzystanych w wariantcie II cd.

Nr	Wskaźniki kategorii oddziaływań na środowisko	Wskaźniki	Materiał		Zaprawa cementowa	Deski podłogowe	Dachówka ceramiczna	Wetna mineralna	Belki drewniane	Płyta g-k
1	GWP	Ww			1040,00	5,48	2,07	1,00	599,00	3,58
	kg CO ₂ equiv.	Wz			8,46E-02	4,46E-04	1,68E-04	8,13E-05	4,87E-02	2,91E-04
2	ODP	Ww			2,61E-05	-2,20E-10	2,64E-07	2,02E-07	7,53E-11	6,09E-07
	kg CFC 11 equiv.	Wz			1,19E-04	-1,00E-09	1,20E-06	9,18E-07	3,42E-10	2,77E-06
3	AP	Ww			2,45	4,80E-03	1,95E-02	4,20E-03	1,34E+00	1,11E-02
	kg SO ₂ equiv.	Wz			3,44E-02	6,74E-05	2,74E-04	5,90E-05	1,88E-02	1,56E-04
4	EP	Ww			1,22	2,78E-04	5,15E-04	9,88E-04	3,12E-01	1,79E-03
	kg (PO ₄) ₃ equiv.	Wz			3,75E-02	8,55E-06	1,58E-05	3,04E-05	9,60E-03	5,51E-05
5	POCP	Ww			7,90E-04	-1,15E-03	1,03E-03	1,49E-04	7,59E-01	5,09E-04
	kg C ₂ H ₄ equiv.	Wz			3,67E-05	-5,35E-05	4,79E-05	6,93E-06	3,53E-02	2,37E-05
6	ADP-e	Ww			2,90E-03	7,86E-06	1,54E-07	4,90E-05	9,03E-05	6,23E-06
	kg Sb equiv.	Wz			7,42E-05	2,01E-07	3,94E-09	1,25E-06	2,31E-06	1,59E-07
7	ADP-f	Ww			3,58	4,69	37,40	16,42	913,15	54,30
	MJ	Wz			1,31E-05	1,72E-05	1,37E-04	6,02E-05	3,34E-03	1,99E-04
8	FW	Ww			8,60E-03	2,79E-02	4,92E-03	8,59E-03	1,40E+00	2,36E-02
	m ³	Wz			2,28E-05	7,40E-05	1,31E-05	2,28E-05	3,71E-03	6,26E-05
9	HWD	Ww			5,18E-02	1,31E-03	3,65E-05	1,89E-04	3,89E-06	1,67E-04
	kg	Wz			2,76E-04	6,99E-06	1,95E-07	1,01E-06	2,08E-08	8,91E-07
10	NHWD	Ww			8,99	0,08	1,13E-02	1,09	473,70	11,90
	kg	Wz			2,40E-03	2,13E-05	3,01E-06	2,91E-04	0,13	3,17E-03
11	RWD	Ww			0,00	-0,01	6,62E-05	0,00	0,01	0,00
	kg	Wz			0,00	-2,56E-03	1,69E-05	0,00	2,56E-03	0,00
Ecopoint _i dla danego (i-tego) materiału					2,64E-02	-5,56E-02	7,65E-05	3,97E-05	1,97E-02	1,74E-04

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5. Parametry energetyczno-środowiskowe

Wskaźniki	Jednostka	Wartości kryteriów	
		Budynek kontenerowy W ₁	Budynek tradycyjny W ₂
EP – roczne zapotrzebowania na energię pierwotną	kWh/m ² rok	60,70	68,43
EU – energii użytkowej	kWh/m ² rok	28,90	27,98
EK – energii końcowej	kWh/m ² rok.	50,70	-
GWP – potencjał globalnego ocieplenia	kg CO ₂ equiv.	2,481E-2	4,927 E-2
Ecopoint	pkt.	1,26E-02	6,20E-02

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6. Kryteria oceny i ich wartości dla obu wersji technologii budowania

K _i - Kryterium	Waga	Jednostka	Wartości kryteriów	
			Budynek kontenerowy W ₁	Budynek tradycyjny W ₂
K ₁ – koszt wykonania	0,20	zł/m ²	3 000,00	3200,00
K ₂ – trwałość konstrukcji	0,25	lata	30	100
K ₃ – czas budowy	0,13	lata	0,25	2
K ₄ – łatwość recyklingu	0,35	pkt.	1	2
K ₅ – funkcjonalność (organizacja przestrzeni, wygoda i komfort użytkowania)	0,07	nr w rankingu	2	1

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7. Podsumowanie wyników obliczeń metodą wskaźników syntetycznych i metodą AHP

Metoda wskaźników syntetycznych						
Metoda kodowania	Wariant	Wskaźnik sumacyjny skorygowany	Wskaźnik addytywny skorygowany	Średnia arytmetyczna ważona	Średnia harmoniczna ważona	Średnia geometryczna ważona
Normowanie	W1	0,700	0,14	0,700	0,45000	0,5900
Pattern	W1	0,040	0,01	0,040	0,00044	0,0022
Normowanie	W2	0,790	0,16	0,790	0,60000	0,7000
Pattern	W2	0,097	0,02	0,097	0,00036	0,0021
Metoda AHP						
Warianty	W1	0,77				
	W2	0,48				

nie technologii kryterium K4 – łatwość recyklingu, która uwzględnia bardziej uwarunkowania koncepcji zrównoważonego rozwoju i gospodarki cyrkulacyjnej (recykling – K4 z wagą 0,35), ale i trwałość budynku K2 = 0,25 należy do ważnej właściwości obiektu w kontekście wymienionej koncepcji. Tę drugą cechę preferowałby zapewne inwestor – użytkownik, myślący np. o domu długowiecznym dla wielu pokoleń.

Ostateczną decyzję co do wyboru podejmuje decydent, uwzględniając dodatkowo inne względy i wspomagając się dodatkowymi analizami/metodami. Taką ocenę można przeprowadzić za pomocą analizy macierzy SWOT [23]. Macierze SWOT dla obu analizowanych technologii przedstawiają tabele 8, 9.

Należy też zauważyć, że w ocenie tych technologii i wyborze dużą rolę odgrywa także dla jakiego rodzaju funkcji użytkowej budynku dobieramy tę technologię. Przy budynku dla potrzeb komercyjnych, np. usługowych lub produkcyjnych, wybór technologii kontenerowej byłby bardziej preferowany. W tym przypadku długa trwałość obiektu nie jest jego kluczową cechą.

Na podstawie analizy macierzy SWOT można zauważyć możliwość rozwoju strategii stosowania technologii kontenerowej budowania obiektów (wykorzystywania mocnych stron i szans) a w przypadku tradycyjnej pomimo wielu mocnych stron są też słabe strony i zagrożenia dla rozwoju zastosowań tej technologii.

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza adaptacji kontenerów transportowych na obiekty budownictwa mieszkalnego z tradycyjną technologią budowy domów jednorodzinnych wykazała ogromny potencjał technologii stawiającej na ekologię oraz jej duże możliwości dla rozwoju budownictwa zrównoważonego i wspieraniu działań mających na celu ochronę środowiska. Przede wszystkim stanowi ona wielką nadzieję dla sektora budownictwa będącego jednym z największych producen-

tów odpadów oraz zużycia surowców. Technologia kontenerowa jest dobrym przykładem zastosowania zasad gospodarki cyrkulacyjnej. Ogromna ilość odpadów, jaką stanowią kontenery transportowe, zostaje w ten sposób zagospodarowana i może dalej służyć ludziom. Należy zwrócić uwagę na to, że budowa domów z kontenerów morskich nie tylko dorównuje technologii tradycyjnej pod względem komfortu i zapewnienia bezpieczeństwa, ale przede wszystkim ma nad nią znaczącą przewagę w zakresie kosztów i czasu budowy oraz możliwości recyklingu, zgodnie z obecną koncepcją zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Przedstawione w pracy przykłady realizacji obiektów wykonanych wyłącznie z kontenerów transportowych pokazują, że w niektórych częściach świata już dawno zauważono ich potencjał. W Polsce jest to jeszcze mało znana alternatywa, jednak coraz więcej ludzi czy inwestorów zaczyna rozważać i stosować to rozwiązanie.

Wykonane analizy i obliczenia wskazały na złożoną problematykę dokonania wyboru w tym przypadku pomiędzy technologiami budowy domu jednorodzinnego. Warto podkreślić, że wyniki mogą się różnić w zależności od oceny decydenta jego potrzeb, wymagań i celów. A ostateczny wybór powinien opierać się na podejściu holistycznym zarówno pod kątem przyjmowanych kryteriów, jak i zastosowanych metod wspomagania podejmowania decyzji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bukowski H., Fabrycka W., Budownictwo w obiegu zamkniętym w praktyce, Raport Instytutu Innowacji i Odpowiedzialnego Rozwoju, Warszawa, 2019
- [2] Sobotka A., Sagan J., Sikora A., Logistyka odzysku w remontach obiektów budowlanych, Materiały Budowlane 6/2016
- [3] Góralczyk S., Baic I., Odpady z górnictwa węgla kamiennego i możliwości ich gospodarczego wykorzystania, Polityka Energetyczna, tom 12, zeszyt 2/2, 2009
- [4] Gotowe projekty domów. <https://www.archon.pl/>, dostęp: 04.12.2022
- [5] Szwabowski J., Deszcz J., Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001
- [6] Fabisiak L., Ziemia P., Wybrane metody analizy wielokryterialnej w ocenie użyteczności serwisów internetowych, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, 2011

Tabela 8. Analiza SWOT – budynek wznoszony w technologii kontenerowej

Mocne strony	Słabe strony
Krótki czas budowy Mniejszy koszt całkowity budowy Rozwiązanie ekologiczne (kontenery z recyklingu, mniejszy wskaźnik Ecopoint) Prosty fundament Duża wytrzymałość konstrukcji Wysoka stabilność w warunkach sejsmicznych Wytrzymałe w różnych warunkach klimatycznych Łatwość budowy na zboczach	Trwałość maksymalnie 30 lat Konieczność konserwacji ze względu na rdzę Mała wytrzymałość konstrukcji dachu Konieczność wzmocnienia ścian w miejscu wyciętych otworów Bez odpowiedniej termoizolacji brak akumulacji ciepła Bez odpowiedniej izolacji akustycznej budynek narażony na duży hałas
Szanse	Zagrożenia
Możliwość preferencji finansowych. Rozwój gospodarki zrównoważonej i cyrkulacyjnej Wsparcie systemowe zainteresowanych zagospodarowaniem odpadów gałęzi gospodarki (np. transport)	Technologia mało znana w Polsce Brak specjalistów i wykonawców Toksyczność farb antykorozyjnych

Źródło: opracowanie własne

Tabela 9. Analiza SWOT – budynek wznoszony w technologii tradycyjnej

Mocne strony	Słabe strony
Duża trwałość konstrukcji Wysoka odporność ogniowa materiałów konstrukcyjnych Bardzo dobra paroprzepuszczalność Bardzo dobra akustyka pomieszczeń bez dodatkowej izolacji Bardzo dobra akumulacja ciepła	Długi czas budowy Duże koszt całkowity budowy Małe możliwości recyklingu komplikowana budowa na zboczach Niska stabilność sejsmiczna Transportochłonność (duży ślad węglowy)
Szanse	Zagrożenia
Bardzo dobrze znana technologia, dużo specjalistów na polskim rynku	Niespełnienie wymogów wskaźników zrównoważonego rozwoju narzuconych przepisami. Trudności w pozyskaniu wykonawców

Źródło: opracowanie własne

- [7] Koźmińska U., Nowe materiały w architekturze mieszkaniowej, Reutilizacja, recykling, upcykling, cradle-to-cradle – przyszłość czy utopia? Katedra Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego, Instytut Projektowania Urbanistycznego, Wydział Architektury, Politechniki Krakowskiej, czasopismo Środowisko Mieszkaniowe, tom 11, 2013, str. 256–263
- [8] Wiśnicki B., Vademecum konteneryzacji – Formowanie kontenerowej jednostki ładunkowej, Szczecin, 2006
- [9] Hotel Quadrum Ski. <http://quadrum-gudauri.com/>, dostęp: 04.12.2022
- [10] Sebastian Irrarazaval Arquitectos Chile, Projekt pracowni architektonicznej. <https://www.sebastianirrazaval.net/>, dostęp: 04.12.2022
- [11] Wang L., LOT-EK upcycles 140 shipping containers into an apartment complex in South Africa, inhabit, 27/2018. <https://inhabitat.com/lot-e-k-upcycles-140-shipping-containers-into-an-apartment-complex-in-south-africa/>, dostęp: 04.12.2022.
- [12] Forrest A., Living in a steel box: are shipping containers really the future of housing? The Guardian, 30/2007. <https://www.theguardian.com/cities/2015/oct/09/living-steel-box-shipping-containers-future-housing>, dostęp: 04.12.2022
- [13] Hotel Scandinavia Resort, <https://scandinaviamarine.pl/pl>, dostęp: 04.12.2022
- [14] Dominiak P., Dom z kontenerów. Ile kosztują kontenery morskie i jak zbudować z nich dom, MuratorDom, 10/2020. <https://murator-dom.pl/przed-budowa/prezentacje-domow/dom-z-kontenerow-ile-kosztuja-kontenery-morskie-i-jak-zbudowac-z-nich-dom-aa-mgnd-9G35-Kgct.html>,dostęp: 04.12.2022
- [15] Projekty domów z kontenerów morskich, nadające się do mieszkania, własnymi rękami i na zamówienie, zdjęcia, recenzje. Dom kontenerów morskich: projekt, konstrukcja, izolacja, cena. Makemone 03/2019: <https://makemone.ru/pl/remont-i-dizajn-kuhni-v-kvartire/proekty-domov-iz-morskih-konteinerov-prigodnye-dlya-zhilya-svoimi.html>,dostęp: 04.12.2022
- [16] Stropodach wentylowany, MuratorDom, 09/2009. <https://murator-dom.pl/budowa/dach/-stropo-dach-wentylowany-aa-gZnn-6iqD-rY3Y.html>,dostęp: 04.12.2022
- [17] STWiORB Budynek użyteczności publicznej Dom spotkań w Opawicy, gmina Głubczyce, glubczyce:<https://glubczyce.pl/download/attachment/13424/-specyfikacja-wykonania-i-odbioru-robot.pdf>,dostęp: 04.12.2022
- [18] Leśniewicz M., Domy z kontenerów. Ile kosztują? Czy wymagają pozwolenia? Wady i zalety budownictwa kontenerowego, Regiodom, 03/2019. <https://regiodom.pl/domy-z-kontenerow-ile-kosztuja-czy-wymagaja- pozwolenia-wady-i-zalety-budownictwa-kontenerowego/ar/c9-15520225>,dostęp: 04.12.2022
- [19] Prawo budowlane, Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r.
- [20] Dom w Kruszczykach 5. <https://www.archon.pl/>,dostęp: 04.12.2022
- [21] Abbe O., Hamilton L., BRE Global Environmental Weighting for Construction Products using Selected Parameters from EN 15804, 2017
- [22] Skorupa M., Analiza porównawcza adaptacji kontenerów transportowych na obiekty budownictwa mieszkalnego z tradycyjną technologią budowy domów jednorodzinnych, praca magisterska, AGH, 2022
- [23] Szalata Ł., Zwoździak J., Analiza SWOT jako podstawowe narzędzie w zarządzaniu środowiskiem, Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska 13/2011
- [24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 7 czerwca 2019, poz. 1065)