

dr hab. inż. Agnieszka Leśniak, prof. PK<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-4811-5574

mgr inż. Monika Górka<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-5985-2078

# Wielokryterialna ocena wybranych rozwiązań elewacji wentylowanych

## *Multicriterial assessment of selected ventilated facade solutions*

DOI: 10.15199/33.2022.10.06

**Streszczenie.** Elewacje wentylowane stanowią alternatywę dla standardowych tynków elewacyjnych. Wykonuje się je z wykorzystaniem różnych płyt okładzinowych i konstrukcji rusztu. W artykule podjęto próbę wskazania najkorzystniejszego rozwiązania elewacji wentylowanej na podstawie przyjętych kryteriów oceny. Poddano analizie trzy warianty elewacji: z płyt aluminiowych przykręcanych do podkonstrukcji aluminiowej wkrętami samowiercącymi; z płyt kompozytowych zawieszanych na podkonstrukcji aluminiowej oraz z płyt włókno-cementowych nitowanych do podkonstrukcji. Do analizy wielokryterialnej wykorzystano metodę PROMETHEE II.

**Słowa kluczowe:** elewacje wentylowane; analiza wielokryterialna; PROMETHEE II.

**Abstract.** Ventiladed facades are an alternative to standard facade panels. It is made with the use of various materials for cladding panels and substructures. In the paper, the authors tried to determine the mostadvantageoussolution for the execution of the ventilated facade on the basis of the 7 recognized evaluation criteria. Three variants of the facade were analysed: aluminium panels screwed to the aluminium substructure with self-drilling screws; composite panels suspended from the aluminium substructure; fibre-cement panels riveted for substructuresFor the multi-criteria analysis, the PROMETHEE II method was used.

**Keywords:** ventilated facades; multi-criteria analysis; PROMETHEE II.

Współczesne tendencje w projektowaniu i tworzeniu elewacji bazują już nie tylko na spełnieniu pierwotnej funkcji ścian zewnętrznych, jaką było oddzielenie środowiska zewnętrznego od wnętrza budynku. Jest to interdyscyplinarna dziedzina, która łączy funkcje techniczne, estetyczne, komfort użytkowania, ideę energooszczędności [1], a także aspekty ekologiczne [2]. Elewacja budynku to „wizytówka” każdego obiektu budowlanego i dlatego tak ważna jest jakość i estetyka jej wykonania. Alternatywą dla standardowych tynków elewacyjnych są **elewacje wentylowane** czyli zespół odpowiednio dobranych elementów, które tworzą kompletny system elewacyjny [3], składający się z: **podkonstrukcji/rusztu** – najczęściej wykonanego z aluminium, stali lub drewna; **materiałów termoizolacyjnych** – wełny mineralnej, czasami styropianu ekstrudowanego; **okładzin elewacyjnych**, np. ceramicznych, włókno-cementowych, betonowych, kamiennych,

drewnianych, stalowych, aluminiowych, szklanych, z laminatów HPL; **łącników mechanicznych** [4].

Cechą charakterystyczną elewacji wentylowanych jest pustka wentylacyjna (tzw. szczelina wentylacyjna) pomiędzy termoizolacją a okładziną elewacyjną [4]. Początki wykonywania elewacji wentylowanych sięgają średniowiecza. Takie rozwiązania były stosowane w Skandynawii [5]. Na szeroką skalę elewacje wentylowane zaczęto wykonywać w latach pięćdziesiątych XX w., gdy brytyjskie organizacje budowlane dostrzegły zalety pozostawiania pustki wentylacyjnej pomiędzy termoizolacją a okładziną budynku [6].

**Jednym z pierwszych budynków z elewacją wentylowaną z panelami aluminiowymi był wieżowiec Alcoa w Pittsburghu**, który został wybudowany w 1953 r. [7]. W latach 1960 ÷ 1970 Krajowa Rada ds. Badań w Kanadzie prowadziła wiele badań nad rozwiązaniami systemowymi elewacji wentylowanych. W 1963 r. po raz pierwszy użyto określenia „elewacja wentylowana” [6].

Do dnia dzisiejszego prowadzone są badania systemów elewacji wentylowanych i ich wpływu na ergonomię, termi-

kę, ekologię czy komfort użytkowania. Analizie poddawane są wszystkie elementy elewacji wentylowanych, a więc ich podkonstrukcja, rodzaj i materiał termoizolacji oraz materiał stosowany jako okładzina elewacyjna. W artykule porównano wybrane rozwiązania elewacji wentylowanych i poddano je analizie wielokryterialnej, której celem był wybór najkorzystniejszego rozwiązania z uwagi na przyjęte kryteria oceny.

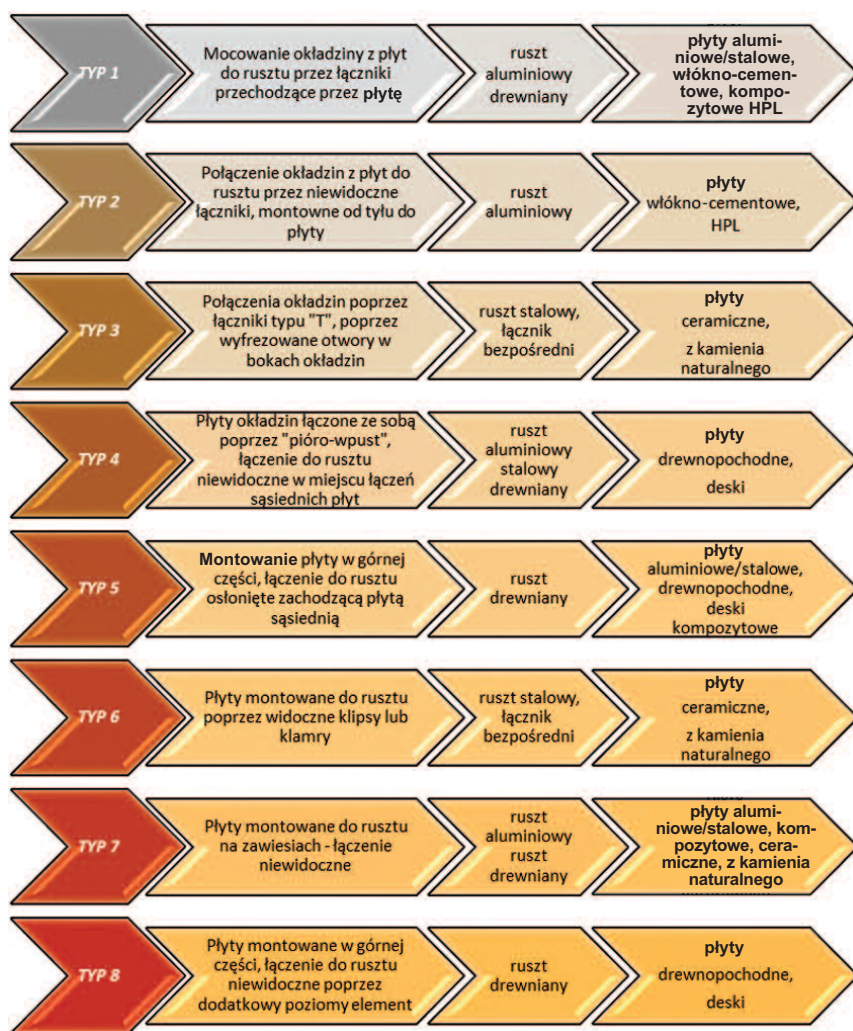
### Rozwiązania elewacji wentylowanych

Wytyczne EOTA do wykonywania okładzin ścian zewnętrznych, tj. ETAG 034 wyróżnia osiem typów elewacji wentylowanych. Klasyfikację tego typu elewacji ze względu na sposób łączenia okładzin elewacyjnych z podkonstrukcją oraz sposób łączenia płyt okładzinowych przedstawiono na rysunku 1 [8 ÷ 9].

**Elewacje wentylowane z płyt kompozytowych zawieszanych na podkonstrukcji** składają się z izolacji termicznej, marek stalowych, rusztu aluminiowego uzbrojonego w śruby poprzeczne do mocowania paneli oraz zewnętrznych frezowanych paneli kompozytowych. Przykładowy przekrój elewacji przedstawiono na rysunku 2. Go-

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wdział Inżynierii Łądowej

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: agnieszka.lesniak@pk.edu.pl

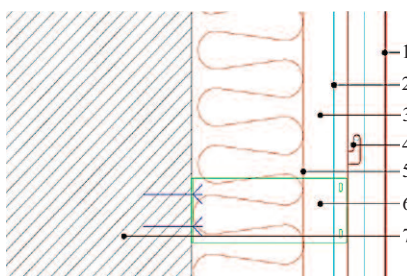


Rys. 1. Typy elewacji wentylowanych w zależności od rodzaju okładziny elewacyjnej oraz zastosowanej podkonstrukcji [9]

Fig. 1. Types of ventilated facades, depending on the type of cladding panels and the substructure used [9]

towe arkusze płyt kompozytowych należy frezować w miejscach zagięcia na maszynach CNC. Górna i dolna połącz arkusza powinna mieć „skrzydełka” o odpowiednim kształcie stanowiące usztywnienie konstrukcji. Wszystkie zagięcia paneli nie są przypadkowej szerokości. W celu dobrania odpowiednich zagięć na etapie projektowym należy stosować specjalne tabele opracowane przez producenta. O szerokości zagięć decydują m.in. parcie i ssanie wiatru, grubość płyty, szerokość oraz wysokość panelu [10 ÷ 11].

Kolejnym rozwiązaniem jest system z płytami aluminiowymi przykręcanymi do podkonstrukcji wkrętami samowierzącymi. Panele muszą mieć odpowiednie zagięcie w miejscu łączenia i odpowiednio do siebie przylegać, po czym można je mocować do podkon-



Oznaczenia: 1 – panel aluminiowy; 2 – ruszt aluminiowy; 3 – pustka powietrzna; 4 – zawieszka; 5 – izolacja termiczna; 6 – marka stalowa; 7 – ściana żelbetowa

Rys. 2. Przekrój pionowy elewacji z płytą aluminiową zawieszoną na podkonstrukcji

Opracowanie własne na podstawie [10 ÷ 11]  
Fig. 2. Vertical cross-section of an aluminium plate suspended from the substructure

Own study based on [10 ÷ 11]

strukcji. Płyta powinna być przykręcana minimum co 500 mm [12]. W drugiej płaszczyźnie panele wystarczy zagiąć raz

do wewnątrz na odpowiednią głębokość – szczelina pomiędzy panelami może mieć ok. 4 mm [12].

W przypadku elewacji wentylowanej z płytami włókno-cementowymi klejonymi do podkonstrukcji zaleca się utrzymanie fugi wentylacyjnej, horyzontalnej i wertykalnej, równej 2 mm. Płyty przycina się na konkretny wymiar. Nie mają żadnych zagięć. Zalecanym sposobem ich mocowania do podkonstrukcji aluminiowej jest klejenie odpowiednim klejem. Podczas montażu paneli należy przestrzegać restrykcyjnych wymagań klimatycznych ich producenta – temperatura montażu  $5 \pm 35^\circ$ , a wilgotność poniżej 75%. Dodatkowo trzeba uwzględnić wszystkie wytyczne klimatyczne producenta kleju [13].

### Analiza wielokryterialna

Celem analizy wielokryterialnej był wybór optymalnego rozwiązania z zaproponowanych. Wykorzystano metodę PROMETHEE II, stosowaną z powodzeniem w procesach decyzyjnych w budownictwie [14], która służy do wyznaczenia syntetycznego rankingu alternatyw. Uwzględniono w niej pozytywne i negatywne przepływy preferencji, określające stopień przewyższania jednego wariantu nad drugim [15].

### Analizowano trzy warianty elewacji wentylowanych:

- z płyt aluminiowych przykręcanych do podkonstrukcji aluminiowej wkrętami samowierzącymi (W-1);
- z płyt kompozytowych zawieszanych na podkonstrukcji aluminiowej (W-2);
- z płyt włókno-cementowych nitowanych do podkonstrukcji (W-3).

### Kryteria uwzględnione w analizie:

- 1) całkowity koszt materiału (PLN) obejmujący koszt płyt elewacyjnych, izolacji termicznej, rusztu, łączników i obróbek lakierowanych;
- 2) całkowity koszt robocizny (PLN) obejmujący koszt montażu rusztu, izolacji termicznej, płyt elewacyjnych;
- 3) estetyka (w skali  $1 \div 5$ ) oceniana jako wizualny efekt końcowy wykonania;
- 4) czas prefabrykacji płyt elewacyjnych (robocizogodzina r-g wyspecjalizowanego pracownika);

5) czas montażu elewacji (roboczo-godzina wyspecjalizowanego pracownika);

6) kruchość materiału płyt elewacyjnych (w skali 1 ÷ 5);

7) ekologia (w skali 1 ÷ 5), określająca wpływ danej płyty elewacyjnej na środowisko.

W tabeli 1 przedstawiono podział kryteriów na stymulanty i destymulanty, a następnie na podstawie wzorów (1) i (2) dokonano normalizacji ich wartości. Wagi istotności poszczególnych kryteriów przyjęto na podstawie wywiadu eksperckiego.

$$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad (1)$$

$$R_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad (2)$$

gdzie:

$R_{ij}$  – znormalizowana wartość j-tego kryterium dla i-tego wariantu;  $x_{ij}$  – miara cząstkowa i-tego wariantu względem j-tego kryterium;

$\max(x_{ij})$  – maksymalna wartość miary cząstkowej dla j-tego kryterium;

$\min(x_{ij})$  – minimalna wartość miary cząstkowej dla j-tego kryterium.

W kolejnym kroku wyznaczono ważoną różnicę poszczególnych funkcji preferencji na podstawie wzoru (3) i jego zagregowaną wartość wg wzoru (4). Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

$$W_j \cdot P_j(a, b) \quad (3)$$

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j(a, b)}{\sum_{i=1}^n w_j} \quad (4)$$

gdzie:

$w_j$  – wartość wagi j-tego kryterium;

$P_j(a, b)$  – funkcja preferencji dla j-tego kryterium;

$\pi(a, b)$  – zagregowana funkcja preferencji określająca, w jakim stopniu wariant a jest preferowany w stosunku do wariantu b jednocześnie ze względu na wszystkie kryteria;

$\sum_{i=1}^n w_j$  – suma wag w przypadku wszystkich kryteriów (równa 100%).

Tabela 1. Znormalizowane wartości kryteriów  
Table 1. Standardized criteria values

Kryterium	Waga [%]	Opis	Znormalizowane wartości kryteriów		
			W 1	W 2	W 3
K1 [PLN]	23	destymulanta	1,0	0,599	0,0
K2 [PLN]	23	destymulanta	1,0	0,0	0,333
K3 [skala 1 ÷ 5]	21	stymulanta	0,0	0,667	1,0
K4 [czas (r-g)]	15	destymulanta	0,6	0,0	1,0
K5 [czas (r-g)]	10	destymulanta	1,0	0,5	0,0
K6 [skala 1 ÷ 5]	3	destymulanta	1,0	0,667	0,0
K7 [skala 1 ÷ 5]	5	stymulanta	0,333	0,0	1,0

Tabela 2. Wartości ważonej funkcji preferencji kryteriów  
Table 2. The weighted values of the criteria preference function

Kryterium	W1-W2	W1-W3	W2-W1	W2-W3	W3-W1	W3-W2
K1 [PLN]	0,092	0,23	0,0	0,138	0,0	0,0
K2 [PLN]	0,23	0,153	0,0	0,0	0,0	0,077
K3 [skala 1 ÷ 5]	0,0	0,0	0,14	0,0	0,21	0,07
K4 [czas (r-g)]	0,09	0,0	0,0	0,0	0,06	0,15
K5 [czas (r-g)]	0,05	0,1	0,0	0,05	0,0	0,0
K6 [skala 1 ÷ 5]	0,01	0,03	0,0	0,02	0,0	0,0
K7 [skala 1 ÷ 5]	0,017	0,0	0,0	0,0	0,033	0,05
Suma	0,489	0,513	0,140	0,208	0,303	0,347

Finalnym etapem analizy jest określenie przepływów netto rozpatrywanych wariantów:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (5)$$

gdzie:

$\Phi^+(a)$  – dodatni przepływ wg wzoru

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a \in A} \Pi(a, b) \quad (6)$$

$\Phi^-(a)$  – ujemny przepływ wg wzoru

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a \in A} \Pi(b, a) \quad (7)$$

Wyliczone przepływy netto w przypadku wariantów W1, W2 i W3 zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości pozytywnych i negatywnych preferencji

Table 3. Values for positive and negative preferences

Wariant	$\Phi^-$	$\Phi$	$\Phi^+$	Ranking
W 1	0,222	0,279	0,501	I
W 2	0,418	-0,244	0,174	III
W 3	0,361	-0,036	0,325	II

### Podsumowanie

W artykule podjęto próbę wybrania najkorzystniejszego z trzech zaproponowanych wariantów wykonania elewacji wentylowanej z uwagi na przyjęte kryteria oceny. Wśród siedmiu kryteriów znalazły się kryteria kosztowe, techniczne, a także np. estetyka. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że **najkorzystniejszym rozwiązaniem**, wśród rozważanych przykładów elewacji, **jest elewacja wentylowana wykonana z płyt aluminiowych przykręcanych do podkonstrukcji aluminiowej wkrętami samowiercącymi**. W dalszej kolejności jest elewacja wentylowana z płyt włókno-cementowych nitowanych do

podkonstrukcji i elewacja wentylowana z płyty kompozytowej zamieszanej na podkonstrukcji aluminiowej. Należy podkreślić, że zastosowanie innych kryteriów oceny i większej liczby wariantów może prowadzić do innych wniosków.

### Literatura

[1] Gagliano A, Nocera S, Aneli S. Thermodynamic analysis of ventilated facades under different wind conditions in summer period. Energy and Buildings. 2016; 122: 131 – 139.

[2] Mahdavejad M, Mohammadi S. Ecological analysis of natural ventilated facade system and its performance in Teheran’s climate. Ukrainian Journal of Ecology. 2018; 8: 273 – 281.

[3] Schabowicz K, Gorzelańczyk T, Szymków M. Współczesne systemy elewacji wentylowanych – rodzaje i wymagania. Izolacje. 2017; 22: 7 – 8.

[4] Runkiewicz L, Sieczkowski J, Kopyłow O. Okresowe oceny stanu technicznego elewacji budynków. Cz. 6 Elewacje wentylowane. Builder. 2020; <https://doi/10.5604/01.3001.0014.5123>.

[5] Kopyłow O. Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych. Część B: Roboty wykończeniowe, zeszyt 14: Elewacje wentylowane. Wydawnictwo ITB, 2018.

[6] <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=b4993455-fbfb-471f-8471-e4128edb7320>. (26.07.2022).

[7] Leslie SW. The Strategy of Structure: Architectural and Managerial Style at Alcoa and Owens – Corning. Enterprise & Society. 2011; 12: 863 – 902.

[8] EAD 090062-00-0404. 2018. Kits for external wall claddings mechanically fixed.

[9] Wytyczne EOTA ETAG 034. 2018. Zestawy do wykonywania okładzin zewnętrznych.

[10] <https://www.bspsystem.com/wp-content/uploads/2020/01/Katalog-BSP-2020-Digital.pdf>. (27.07.2022).

[11] [https://alucobond.com/cms/deliver/ALUCOBOND\\_processing\\_EN.pdf](https://alucobond.com/cms/deliver/ALUCOBOND_processing_EN.pdf). (27.07.2022).

[12] [https://www.arconic.com/aap/europe/catalog/pdf/Reynolux\\_General\\_BR72EN\\_112019.pdf](https://www.arconic.com/aap/europe/catalog/pdf/Reynolux_General_BR72EN_112019.pdf). (27.07.2022).

[13] [https://www.equitone.com/-/dam/katalog-equitone.pdf/pd17229/originalaequitone\\_katalog\\_ogolny\\_v092021.pdf?v=-1882826550](https://www.equitone.com/-/dam/katalog-equitone.pdf/pd17229/originalaequitone_katalog_ogolny_v092021.pdf?v=-1882826550). (27.07.2022).

[14] Leśniak A, Radziejowska A. Supporting bidding decision using multi-criteria analysis methods. Procedia Engineering. 2017; 208: 76 – 81.

[15] Piwowarski M, Ziemia P. Metoda Promethee II w wielokryterialnej ocenie produktów. Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, Studia i Materiały. 2009; 18: 135 – 144.

Przyjęto do druku: 24.09.2022 r.