

## **ENERGY-ACTIVE FREE-FORM ARCHITECTURAL ENVELOPES**

**Justyna JUCHIMIUK\***

\* University of Zielona Góra / Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering/ Institute of Architecture and Urban Planning,  
ORCID: 0000-0003-2934-2349, e-mail: j.juchimiuk@aiu.uz.zgora.pl, Ul. Prof. Z. Szafrana 1,  
Zielona Góra 65-517, Polska  
E-mail: j.juchimiuk@aiu.uz.zgora.pl  
URL: <https://orcid.org/0000-0003-2934-2349>

**Keywords:** performative architecture, free form, envelope, construction system, renewable energy

### **ABSTRACT**

The continuous departure from straight-line architecture towards digitally designed curvilinear free-forms is caused by the development of parametric modeling tools, as well as the need to adapt buildings to dynamically changing environmental conditions in the era of counteracting climate change. Reaction and adaptation to the external climate enhance positive relationships with the external environment. The main climatic factors in the context of the built environment include solar radiation, wind, humidity and precipitation.

The variable curvature of the free-form surface is characterized by geometric continuity and cannot be determined by traditional analog methods and Euclidean geometry, which is also associated with a change in the design process towards an integrated one and the use of digital tools to shape and optimize the form and manufacturing process. [1,2,3]. The envelope which acts like external boundary of the building and architectural skin has long been a subject of academic discourse and is becoming a highly topical issue with more recent concepts of parametric design and performative architecture.

The reactive architectural envelopes are a subject of aesthetic discourse, which highlights the need for a broader analysis of the aesthetic aspects of objects constituting the subject scope. Aesthetics are extremely important in the concept of modern architecture, in the concept of sustainable design, which is intended to provide effective solutions but also positive visual impressions, beauty and harmony, because they determine the implementation of forms of architecture considered beautiful [3].

The research method adopted in the research is a comparative analysis. The territorial scope of the analyzes includes facilities located in Europe, the time scope is narrowed to a review of buildings constructed at the turn of the 20th and 21st centuries. The following criteria were adopted to analyze and evaluate the presented examples of contemporary, free-form objects:

- location
- functions
- form (modeling strategies)
- material
- detail (additive, integrated, hybrid solutions)
- colors
- environmental considerations and sustainability levels

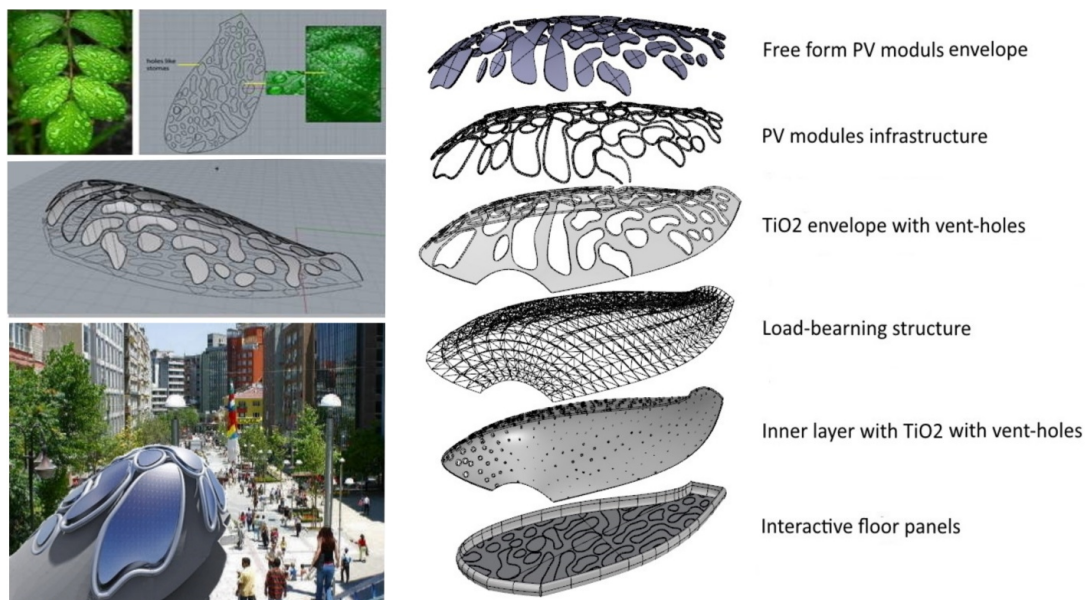


Fig. 1. Sun and Shadow Pavilion in Ankara - multi-layer envelope and its performative possibilities (Meryem Alagöz, results of an academic research programme undertaken at West Pomeranian University of Technology in Szczecin in cooperation with Necmettin Erbakan University in Konya, Turkey (source: courtesy of Meryem Alagöz)

The presented method allows for the analysis of characteristic objects and can constitute a set of design guidelines for new objects.

In order to demonstrate the relationship between free-form objects and responsive solutions, they were tabulated according to the adopted evaluation criteria and the extent to which there were connections between aesthetic considerations, construction and the effectiveness of envelopes was checked [3,5,8]. Architecture is a mirror of the era, it reflects tastes, fashions, user needs and technical possibilities, as well as environmental considerations taking into account the dynamism of climate changes to which objects should adapt - react to them like a constantly changing, living organism [Fig.1-2].

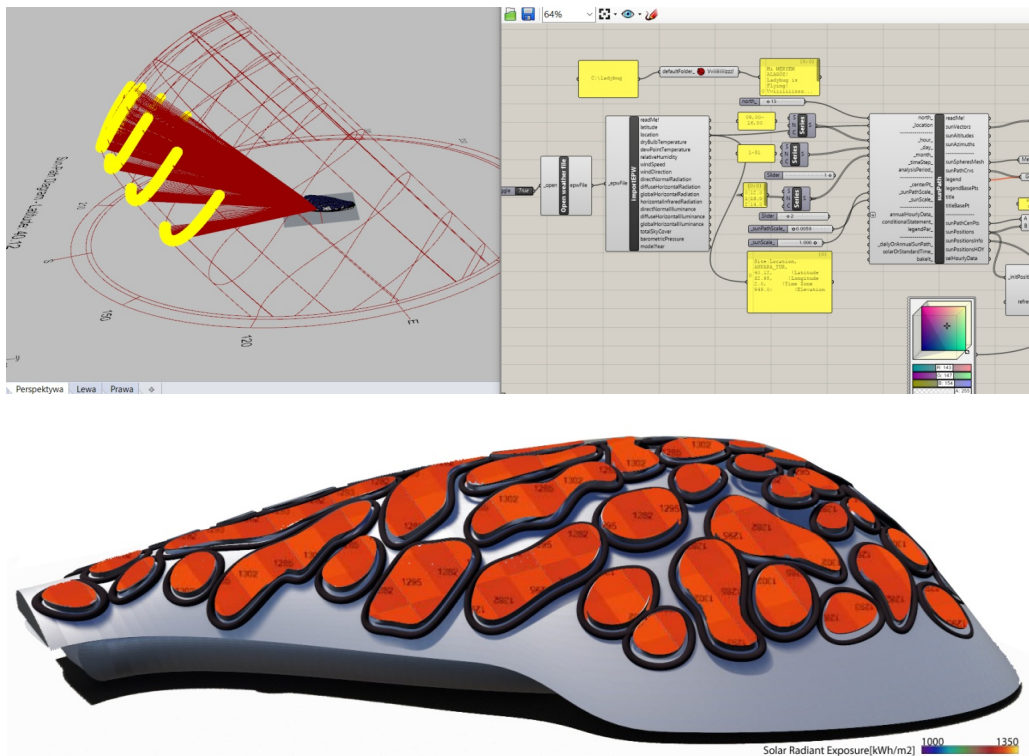


Fig. 2. OPV panel arrangement analysis on the Sun and Shadows Pavilion envelope (source: courtesy of Meryem Alagöz)

## FORM AND ENERGY

Optimizing the form and performance indicators of facades, i.e. external climate, biophilic requirements and energy issues, are becoming increasingly important [2,4,6,9].

“The form emerges from the process, towards a broadly understood new organic architecture. Forms obtained through natural processes adapt best to the environment and are the most efficient in terms of materials, functionality and energy (Fig. 3). Drawing from Nature in the design process, the following becomes necessary: instrumentalization of natural

processes combined with their implementation into an integrated CAD/CAM system, treatment of the natural environment and built as a system and subsystem with feedback” [2,9].

## DEVELOPMENT PROSPECTS

Renewable energy technologies are constantly developing and innovations and improvements also apply to aesthetic aspects [3,5,6]. This pursuit may lead to the complete integration of envelopes with renewable energy technologies. The form of the facility is heading towards being more optimized in many respects, and the aesthetics of technical solutions force a transition to more flexible solutions that discreetly display renewable energy solutions. or even full integration with the reactive envelopes material. Improving existing technological solutions can reduce production costs [8,9,10].



Fig. 3. Energy Funnel - experimental multi-layer envelope and its performative possibilities with OPV + algae bioreactors. "Architecture in Sustainable Space" Workshop Scientific Students' Group at the Institute of Architecture and Urban Planning at the University of Zielona Góra. The use of algorithms in design and VR and AR technologies

(source: Justyna Juchimiuk, Michał Golański, results of an academic research undertaken at the University of Zielona Góra)

## RESULTS

The research conducted in the article shows that a more conscious and mature approach to the design of the building envelope in the 21st century has been developed. The architectural form in this respect has reached an unprecedented stage of its development, in which the design of free structural forms and the use of innovative materials enabled the construction of objects taking into account the responsiveness of their envelopes - energy-efficient but also more advanced in terms of construction and materials, which can also use AI to better manage solutions according to the changing needs of users and the climate. There is also a noticeable tendency to adapt the principles of operation and structure of living organisms in the architectural and structural design of material systems on a larger scale.

The article is a continuation of previous studies on contemporary development trends (potential, opportunities, limitations and barriers) in the form-creating process, taking into account the inherent relationship between the building and the dynamically changing environment. Architecture in the era of climate change requires directed the process of architectural design towards performance and responsiveness in terms of energy, while paying attention to aesthetics [2,3,6,11].

The visual aspect of an object with a new generation of energy-active shape-changing envelopes requires a much more advanced use of digital parametric modeling in the form-forming process. In contemporary architecture the form follows energy. Architectural design of responsive, free-form envelopes requires change in the approach to the modeling process: moving away from the analog form making method towards form finding - the modern finding of an adaptive housing with the acceptance of energy and aesthetic dualism [3,4].

Hybrid envelope solutions inspired by biomimicry, controlled by modern technological solutions, combine innovative materials to play the role of a responsive interface.

Techniques for producing advanced materials creating responsive envelopes are also changing, which is noticeable in the increase in the number of energy-active and adaptive building facades, which is also possible thanks to the approach to production characterized by Industry 4.0. The integration of intelligent machines, systems and the introduction of changes in production processes is aimed at increasing production efficiency and introducing the possibility of flexible changes also in terms of structure, materials and, ultimately, the implementation of free-forms in works of architecture. It is likely that the use of renewable energy technology solutions will become a determinant of modernity and modern, pro-environmental architecture that responds to climate change.

---

**LITERATURE**

- [1] B. Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York and London, 2005.
- [2] K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2010.
- [3] K. Januszkiewicz, *Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym*, Architecturae at Artibus, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, Vol. 8, No. 3, 2016, s. 43–60.
- [4] A. Acharya and T.Gokhale, *A new generation material for architectural applications Intern. Journal Engineering. Res. Applications* 5, 2015, s. 22-29.
- [5] K. Januszkiewicz, P. Saricioglu, *Towards Clean Air in Turkish Cities: Events in the Urban Space*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 603, Issue 3
- [6] K. Januszkiewicz, N. Paszkowska-Kaczmarek, F. Aduna Duguma, K.G. Kowalski, *Living in the "Age of Humans". Envisioning CAD Architecture for the Challenges of the Anthropocene-Energy, Environment, and Well-Being*, MDPI Energies (ISSN 1996-1073), 2021.
- [7] K. Januszkiewicz, *Shaping complex geometry with using ESO evolutionary digital optimization tools. A new approach to architectural design*, 29 June – 5 July 2017 Albena, 17 th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Conference proceedings, Nano, Bio and Green Technologies for a sustainable Future, Vol. 17, No. 62, 2017, s.749–756.
- [8] J. Juchimiuk, K. Januszkiewicz, *Envisioning infrastructure to reduce disaster's impact to cities during the climate change area being elements of smart cities*, 2017, W: International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development - SEED'17, Kraków, Polska, Bristol: IOP Publishing, 2019, IOP Conference Series-Earth and Environmental Science, Vol. 214, s. 1-10, DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012141.
- [9] M. Alagöz, K. Januszkiewicz, *Inspired by Nature: The Sun and Shadow Pavilion*, Social Integration and Energy Saving in the Built Environment. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 2020, 960, 042081 IOP Publishing, Doi:10.1088/1757-899X/960/4/042081 .
- [10] J. Juchimiuk, *Application of IT technology in research on architecture using renewable energy sources (RES)*, 2019, W: Quality of Scientific Research in Architecture and Urban Planning: VIII International Scientific Conference from the Series Phenomena of Borderland, Szczecin, Polska, Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Space & Form, 2019, s.28.
- [11] M. Jaworska- Michałowska, *Inteligentna wrażliwość współczesnych ścian. Struktura, organizacja, funkcjonowanie*, Wyd. PKr, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.

## ENERGO-AKTYWNE, LEKKIE KONSTRUKCJE POWŁOKOWE O FORMIE SWOBODNEJ

Justyna JUCHIMIUK\*

\*Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska  
Uniwersytet Zielonogórski  
Ul. Prof. Z. Szafrana 1,  
Zielona Góra 65-517, Polska  
E-mail: j.juchimiuk@aiu.uz.zgora.pl  
URL: <https://orcid.org/0000-0003-2934-2349>

Słowa kluczowe:

*architektura, system konstrukcyjny, powłoka, forma swobodna, OZE*

### ABSTRAKT

Stopniowe odchodzenie od prostokreślnej architektury w kierunku projektowania form swobodnych projektowanych cyfrowo spowodowany jest rozwojem parametrycznych narzędzi modelowania, a także koniecznością dostosowania obiektów do dynamicznie zmieniających się warunków środowiskowych w dobie przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Reakcja i adaptacja do klimatu zewnętrznego maksymalizują pozytywne relacje ze środowiskiem zewnętrznym. Wśród głównych czynników klimatycznych w kontekście środowiska zabudowanego wskazać można m.in.: promieniowanie słoneczne, wiatr wilgotność i opady.

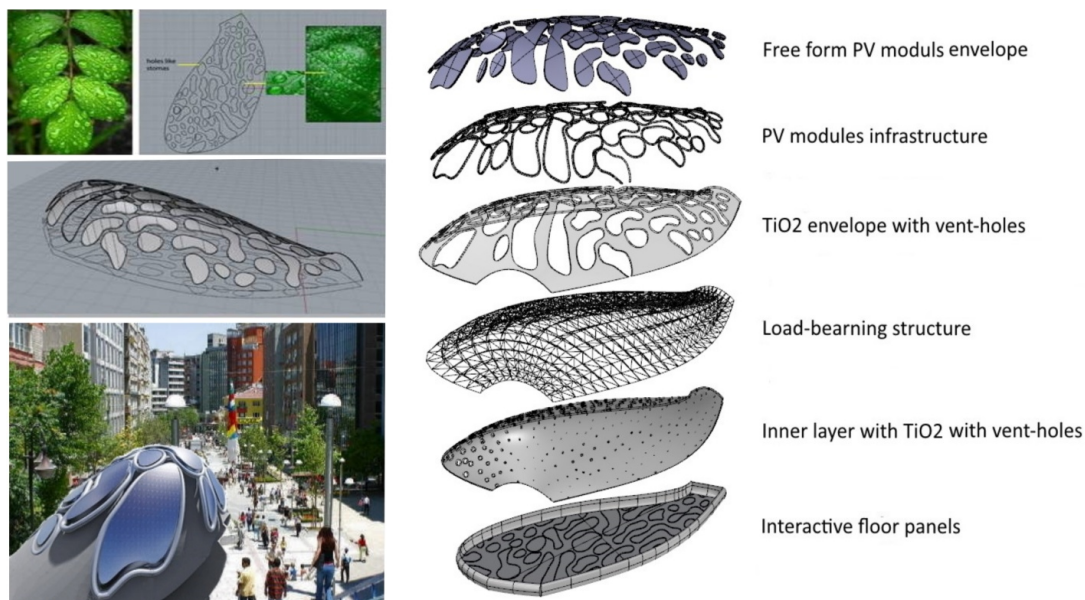
Zmienna krzywizna powierzchni swobodnej cechuje się ciągłością geometryczną i nie sposób określić ją przez tradycyjne metody analogowe i geometrię euklidesową, co wiąże się także ze zmianą procesu projektowego w stronę zintegrowanego i wykorzystania narzędzi cyfrowych do kształtowania oraz optymalizowania formy i procesu wytwarzania [1,2,3]. Powłoka będąca swoistą granicą staje się nie tylko reaktywną skórą dzieła architektonicznego ale także przedmiotem dyskursu estetycznego. Co z punktu widzenia artykułu przekłada się na konieczność szerszego analizowania względów estetycznych obiektów

stanowiących zakres przedmiotowy. Estetyka staje się niezwykle istotna w pojęciu nowoczesnej architektury, w pojęciu zrównoważonego i zintegrowanego projektowania, które mają za zadanie dostarczyć efektywnych rozwiązań ale również pozytywnych doznań wizualnych, piękna i synergii, bo to właśnie one warunkują realizację form architektury, także tej kształtowanej cyfrowo uznawanej za piękną [3].

Metoda badawcza przyjęta w badaniach stanowi analizę porównowczą. Zakresem terytorialnym analiz są obiekty zbudowane i projekty koncepcyjne zlokalizowane w Europie, zakres czasowy zawęża się do przeglądu obiektów powstałych na przełomie XX i XXI wieku.

Do analizy i oceny przedstawionych współczesnych przykładów o formie swobodnej przyjęto następujące kryteria:

- lokalizację
- funkcję
- formę (metody modelowania formy)
- materiał
- detal ((rozwiązania addytywne, zintegrowane, hybrydowe)
- kolorystykę
- względy środowiskowe / poziomy zrównoważenia.

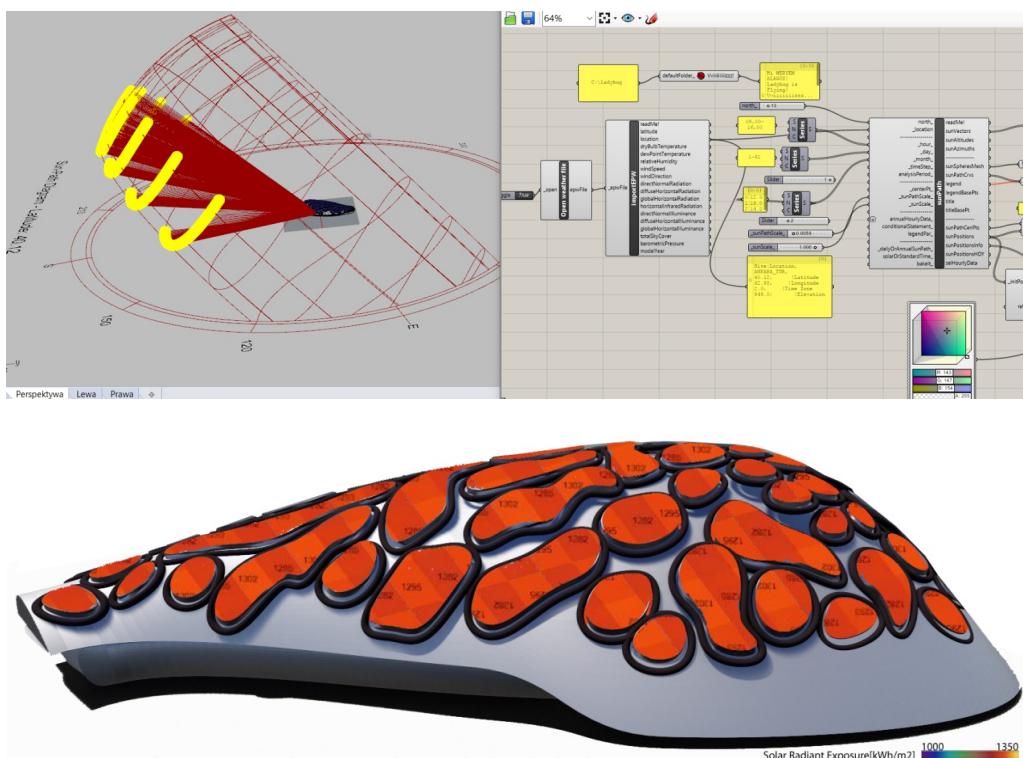


Il 1. Pawilon Słońca i Cienia w Ankarze – wielowarstwowa powłoka i jej możliwości performatywne - analizy (Meryem Alagöz, wyniki akademickiego programu badawczego podjętego w WPUT (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny) w Szczecinie, we współpracy z Necmettin Erbakan University w Konya, Turcja).  
(źródło: Meryem Alagöz)



Przedstawiona metoda pozwala na analizę charakterystycznych rozwiązań i może stanowić pewien zbiór wytycznych projektowych dla nowych obiektów.

W celu wykazania związku obiektów o swobodnej formie z rozwiązaniami responsywnymi zestawiono je tabelarycznie wg przyjętych kryteriów oceny i sprawdzono w jakim stopniu zachodzą związki między względami estetycznymi, konstrukcją a efektywnością powłok [3,5,8] Architektura uznaje się za zwierciadło epoki, odzwierciedlenie gustów, mody, trendów, potrzeby użytkowników i możliwości technicznych, a także względów środowiskowych uwzględniających dynamizm zmian klimatycznych, do który obiekty powinny się dostosowywać - reagować na nie jak żywy organism, stale zmieniając się [ il.1-2].



Il 2. Analizy oraz rozmieszczenie paneli OPV na powłoce Pawilonu Słońca i Cienia w Ankarze, Turcja (Meryem Alagöz)  
(źródło: Meryem Alagöz).

## FORMA I ENERGIA

Coraz istotniejsze stają się optymalizowanie formy oraz wskaźniki wydajności elewacji tj: klimat zewnętrzny, wymagania biofilne i kwestie energetyczne [ 2,4,6,9 ].

„Forma wyłania się z procesu, w kierunku szeroko rozumianej nowej architektury organicznej. Formy uzyskane w procesach naturalnych

najlepiej dostosowują się do środowiska i są najbardziej wydajne pod względem materiałowym, funkcjonalnym i energetycznym [ il.3]. Czerpiąc od Natury w procesie projektowym niezbędne stają się przede wszystkim: instrumentalizacja procesów naturalnych połączona z ich implementacją w zintegrowany system CAD/CAM traktowanie środowiska naturalnego i zbudowanego jako systemu i subsystemu o sprzężeniu zwrotnym” [ 2,9].

## PERSPEKTYWY ROZWOJU

Stale rozwijające się technologie wykorzystujące OZE oraz prace mające na celu ich udoskonalenie prowadzą do powstawania coraz to nowszych, wydajniejszych i bardziej estetycznych rozwiązań [3,5]. Dążenie to może doprowadzić w architekturze do całkowitego zintegrowania powłok z technologiami opartymi o OZE. Forma obiektu zmierza w kierunku bardziej zoptymalizowanej pod wieloma względami a estetyka rozwiązań technicznych wymusza przejście na rozwiązania bardziej elastyczne, dyskretnie eksponujące rozwiązania OZE lub wręcz pełną integrację z materiałem powłoki reaktywnej. Udoskonalenie istniejących rozwiązań technologicznych może stopniowo doprowadzić do obniżenia kosztów produkcji [8,9,10].



- II. 3. Energy Funnel- Lej Enegii- eksperymentalna wielowarstwowa powłoka i jej możliwości performatywne ( OPV oraz bioreaktory z mikroalgami).  
Wykorzystanie algorytmów w projektowaniu oraz technologii VR, AR.  
(projekt: Justyna Juchimiuk, Michał Golański, wyniki akademickiego zadania badawczego podjętego na WBAiŚ Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, warsztaty z Kołem Naukowym "Architektura w Przestrzenia Zrównoważonej" działającym przy Instytucie Architektury I Urbanistyki WBAiŚ UZ).  
(źródło: Justyna Juchimiuk, Michał Golański / IAIU WBAiŚ UZ)

## WYNIKI

Przeprowadzone w artykule badania wykazały, że rozwinęło się bardziej świadome - dojrzałe podejście do projektowania powłoki budynku w XXI wieku. Forma architektoniczna w tym względzie osiągnęła niespotykany wcześniej etap swojego rozwoju, w którym projektowanie swobodnych form konstrukcyjnych i wykorzystanie innowacyjnych materiałów umożliwiło realizację obiektów uwzględniającą responsywność ich obudów (powłok) - energoefektywnych ale także bardziej zaawansowanych pod względem konstrukcyjnym i materiałowym, które mogą wykorzystać także AI do lepszego zarządzania rozwiązaniami wg zmieniających się potrzeb użytkowników a także klimatu.

Dostrzegalna jest także tendencja do adaptacji zasad działania i budowy żywych organizmów w projektowaniu architektonicznym i strukturalnym systemów materiałowych w pełniejszej skali, a także zmian w procesie kształtowania zespołów obiektów, osiedli i miast.

Artykuł ten można traktować również jako jedną z części zbioru badań na temat współczesnych trendów rozwojowych (potencjału, możliwości, ograniczeń i barier) w procesie formotwórczym biorąc pod uwagę szeroko rozumianą relację pomiędzy budynkiem a dynamicznie zmieniającym się środowiskiem, w dobie zmian klimatycznych, które wymagają ukierunkowania procesu kształtowania jego obudowy w kierunku responsywności, także pod względem energetycznym przy dbałości o wzgląd estetyczny.

Aspekt wizualny obiektu z nową generacją energoaktywnych powłok zmieniających kształt wymaga znacznie bardziej zaawansowanego wykorzystania cyfrowego modelowania parametrycznego w procesie formotwórczym. Obecnie nie tylko forma podąża za energią ale staje się rezultatem zmiany podejścia do procesu modelowania: z odejściem od analogowej metody *form making* w stronę *form finding* - współczesnego odnajdywania adaptatywnej obudowy z akceptacją dualizmu energetyczno-estetycznego [ 2,3,6,11 ].

Zintegrowane i hybrydowe rozwiązania powłok inspirowanych biomimikrą, kontrolowanych przez nowoczesne rozwiązania technologiczne łączą ze sobą innowacyjne materiały odgrywając coraz częściej rolę responsywnej inteligentnej skóry, zmiennego interfejsu [ 3,4].

Zmianie ulegają też techniki wytwarzania zaawansowanych materiałów tworzących powłoki responsywne co zauważalne jest we wzroście liczby energo-aktywnych i adaptacyjnych fasad budynków, które możliwe jest także dzięki podejściu do wytwarzania jakim charakteryzuje się Przemysł 4.0 z jego integracją inteligentnych maszyn, systemów oraz wprowadzaniem zmian w procesach produkcyjnych mających na celu zwiększanie wydajności wytwarzania oraz wprowadzeniem możliwości elastycznych zmian także w zakresie konstrukcji, materiałów i finalnie realizacji dzieł architektonicznych o formie swobodnej.

Prawdopodobne, że zastosowanie rozwiązań technologii wykorzystującej OZE stanie się wyznacznikiem współczesności oraz nowoczesności, prośrodowiskowej architektury reagującej jeszcze efektywniej na zmiany klimatyczne.

## LITERATURA

- [1] B. Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York and London, 2005.
- [2] K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2010.
- [3] K. Januszkiewicz, *Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym*, Architecturae at Artibus, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, Vol. 8, No. 3, 2016, s. 43–60.
- [4] A. Acharya and T.Gokhale, *A new generation material for architectural applications Intern. Journal Engineering. Res. Applications* 5, 2015, s. 22-29.
- [5] K. Januszkiewicz, P. Saricioglu, *Towards Clean Air in Turkish Cities: Events in the Urban Space*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 603, Issue 3
- [6] K. Januszkiewicz, N. Paszkowska-Kaczmarek, F. Aduna Duguma, K.G. Kowalski, *Living in the "Age of Humans". Envisioning CAD Architecture for the Challenges of the Anthropocene-Energy, Environment, and Well-Being*, MDPI Energies (ISSN 1996-1073), 2021.
- [7] K. Januszkiewicz, *Shaping complex geometry with using ESO evolutionary digital optimization tools. A new approach to architectural design*, 29 June – 5 July 2017 Albena, 17 th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Conference proceedings, Nano, Bio and Green Technologies for a sustainable Future, Vol. 17, No. 62, 2017, s.749–756.
- [8] J. Juchimiuk, K. Januszkiewicz, *Envisioning infrastructure to reduce disaster's impact to cities during the climate change area being elements of smart cities*, 2017, W: International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development - SEED'17, Kraków, Polska, Bristol: IOP Publishing, 2019, IOP Conference Series-Earth and Environmental Science, Vol. 214, s. 1-10, DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012141.
- [9] M. Alagöz, K. Januszkiewicz, *Inspired by Nature: The Sun and Shadow Pavilion*, Social Integration and Energy Saving in the Built Environment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020, 960, 042081 IOP Publishing, Doi:10.1088/1757-899X/960/4/0420811 .
- [10] J. Juchimiuk, *Application of IT technology in research on architecture using renewable energy sources (RES)*, 2019, W: Quality of Scientific Research in Architecture and Urban Planning: VIII International Scientific Conference from the Series Phenomena of Borderland, Szczecin, Polska, Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Space & Form, 2019, s.28.
- [11] M. Jaworska- Michałowska, *Inteligentna wrażliwość współczesnych ścian. Struktura, organizacja, funkcjonowanie*, Wyd. PKr, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.