

## ECOLOGICAL MINIMIZATION AND CONTROL OF ENERGY AND MATTER CONSUMPTION ON THE EXAMPLE OF A SINGLE-FAMILY HOUSE

## EKOLOGICZNA MINIMALIZACJA I KONTROLA KONSUMPCJI ENERGII I MATERII NA PRZYKŁADZIE DOMU JEDNORODZINNEGO

**Piotr Gradziński**

Dr inż. arch.

Author's Orcid number: 0000-0002-5713-2309

West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland

Faculty of Architecture, Department of Housing and Technical and Ecological Basics of Architecture

### ABSTRACT

The article pertains to two elements in the architecture of a single-family house that impact the ecosystem: the use of building materials and energy consumption. The issue is considered within the framework of analyzing material and energy changes affecting the natural environment. In the research, various methods were employed, including the concept of the 'shade mechanism' as a limit for the ecological footprint, as well as the Life Cycle Assessment (LCA) method. Three types of solutions were examined: the materials used in the building structure and their energy demands. The research results presented were analyzed with regard to the relationship between building materials, energy consumption, and their negative emissions (potential greenhouse effect). The objectives of the analyses were determined with regard to the changing climate and the possibilities of controlling pollutant emissions, taking into account the ability to minimize and control the adverse environmental impact as well as its enhancement and regeneration in the architectural design process.

Key words: architecture, LCA, Bubbles, matter, sustainable, control.

### STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy dwóch elementów w architekturze domu jednorodzinnego oddziałujących na ekosystem: wykorzystanych materiałów budowlanych oraz zapotrzebowania energetycznego. Problem rozważany jest w kategorii analizy zmian materiałowych i energetycznych wpływających na przyrodę. W badaniach posłużono się m.in. ideą 'mechanizmu klosza', jako limitu śladu ekologicznego oraz metodą LCA. Zbadano trzy typy rozwiązań: użytych materiałów w strukturze budynku oraz ich zapotrzebowania energetycznego. Przedstawione wyniki badań przeanalizowano względem relacji wpływu materiałów budowlanych, konsumpcji energii i ich negatywnych emisji (potencjalnego tworzenia efektu cieplarnianego). Cel analiz określono ze względu na zmieniający się klimat a możliwości kontroli emisji zanieczyszczeń uwzględniając możliwości minimalizacji i kontroli negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze, ale także jej poprawy i regeneracji w procesie projektowym architektury.

Słowa kluczowe: architektura, LCA, mechanizm klosza, materia, zrównoważony, kontrola.

## 1. INTRODUCTION

Buildings are an existing material form characterized by their relative energy consumption and the materials contained within them (both energy and substance). Weizsäcker (Weizsäcker 1978) points out that if we consider matter in an Aristotelian sense, it is a potentiality of form, and whether a particular form is determined or not represents an alternative that requires resolution among a multitude of alternatives over time. Assuming that a house is constructed from something, from certain materials, the determination of the materiality of matter imposes a spectrum of information, data (about matter) onto it (the house). Knowledge measured as the increase in information constitutes an objective characteristic of the subject. Abstractly: brick, wood, glass as building materials impose a definite totality of matter and form onto a house. Indeed, there is no form without matter. Matter, which is a combination of substance and energy, gives expression to form. Similarly, in the use of a building, which requires a specific amount of consumed energy. It is pointed out that both of these elements, matter and energy, are essential in the design process of, among others, a single-family house.

The topic of Life Cycle Assessment (LCA) methodology is well-known and primarily applied in the production process of construction materials to determine their environmental impacts. It's worth noting that currently, the introduction of parametric models is being developed. Hollberg and Ruth (2016) use parametric programming and modeling in their research, where they applied two cases: a new multi-family building project and a single-family home. They observe that the designer has two options to influence the project: either by manually changing the geometry, building materials, and construction services, or by using an optimization tool. They successfully demonstrate the possibilities of parametric environmental optimization of the project by architects. On the other hand, Arvizu-Piña et al. (Arvizu-Piña et al. 2023) compare the possibilities of minimizing the impact on the natural environment using a parametric BIM-LCA approach, including several LCA tools prepared for Europe, the USA, and Latin America. The results illustrate a 40% difference, showing various categories of environmental impact and allowing for a 30% reduction in the carbon footprint for the case study of a bioclimatic house (a social building in Hermosillo, Sonora, Mexico) at a level of 54.7 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>-year (previously 78.8 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>-year. In the work by Famiglietti and Madioum Motta, approximately 240,000 building units in the Lombardy region, with Milan as the focal point, were studied and compared using the ecoinvent library (EN15804) as the core library and characterization methods (EN 15978). This analysis made use of open databases to gather data and perform the comparisons. The study encompassed residential, commercial, and retail buildings, both old and new. The research results revealed that the carbon dioxide equivalent (CO<sub>2eq</sub>) is at approximately 15 kg CO<sub>2eq</sub>/(m<sup>2</sup> net floor area × year) for both old and new buildings, and it reaches 21 kg CO<sub>2eq</sub>/(m<sup>2</sup> net floor area × year) for new buildings with almost zero energy consumption. The review of the current state of knowledge on LCA regarding energy and greenhouse gases, prepared by Bahramian and Yetilmezsoy (2018), analyzed 230 publications from 1997-2018. They found that low-rise buildings (1-5 floors) were more frequently analyzed compared to high-rise buildings (above 5 floors), with 70 percent of them being residential buildings, while 60 percent of the high-rise buildings were commercial properties. In the life cycle assessment, the lifespan of buildings ranged from 20 to over 100 years. It is worth noting that the Ecoinvent database was used in 65% of the most frequently analyzed papers, and 40% of them utilized the SimaPro software. Additionally, in the study by Roberts, Allen, and Coley (2020), 274 scientific papers from 2019 were analyzed to assess how the LCA method is incorporated at different stages of the building design process and what improvements are needed for designing zero-emission buildings. The literature review has shown that life cycle assessment (LCA) encounters methodological and practical barriers, which hinder decision-making in the early stages of the design process. This limitation translates into a low environmental efficiency impact of the analyzed buildings. It should also be noted that the International Energy Agency (IEA) conducted a report in which, based on an analysis of case studies, it was demonstrated *that various approaches, software, algo-*

*rithms, objective functions, variables, constraints, and parameters are suitable and used in optimization processes. This complicates the development of general guidelines for optimizing primary energy use in the life cycle, greenhouse gas emissions, and environmental and economic efficiency of buildings. The report recommends the creation of an appropriate procedure "for identifying optimal design or retrofit solutions for various aspects of the entire life cycle of the building (e.g., materials and thickness of building envelope, the use of renewable energy technologies during operation, the period of use, etc." (IEA 2023, p. 70).*

The research conducted in this study aligns with the scientific inquiry and indicates the possibility of expanding the knowledge base with new elements in the early stages of the design process. To achieve this, the article proposed, among other things, computational estimation of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere using proprietary formulas, characterizing and illustrating the limitations of the negative impact of buildings on the natural environment in a given area. Therefore, the study introduced what appears to be an innovative concept of the "bubble mechanism," which is currently employed in the manufacturing sector for emissions trading. Combining these two elements allows, among other things, for research within a predefined time frame and in a specified area. Additionally, these elements allow for determining the carbon dioxide emissions to the atmosphere from the materials used and from the energy consumption for heating and ventilation in the heated zone of the analyzed building. It is expected that this research will contribute to the development of LCA methods and generative approaches to environmental analysis of buildings.

## **2. METHODS AND MATERIALS**

**Analytical Method** – The study employed the Life Cycle Assessment (LCA) method, for which Environmental Product Declarations (EPD) were utilized, and calculations were performed using a prepared spreadsheet. The selection of examples for calculations was based on the acquired material information.

**Literature Review** - a literature review related to the research area was conducted.

The research was confined to the analysis of a single-family house in three material variants and their energy consumption measured in MJ, generating CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. Additionally, the study aimed to demonstrate the computational capabilities of pollutant emissions, enabling subsequent minimization and control (using the proposed 'bubbles mechanism') (Gradziński 2022) of the adverse environmental impact of solutions in the architectural design process.

## **3. CHARACTERIZATION OF THE ECOLOGICAL ISSUE IN THE DESIGN PROCESS**

Currently, there is a strong emphasis on minimizing environmental impact. From the perspective of the design process, designers face a challenging task of adhering to established standards and meeting client needs. Considering the broader benefit to humanity and taking into account greenhouse gas emissions, waste generation, the depletion of non-renewable material resources, and energy sources, it becomes evident that they leave a negative footprint on the natural environment. Consequently, this realization should lead to the identification of specific remedial measures (Fig. 1).

It should be noted that considerations from various scientific communities indicate 'certain' environmental limitations stemming from the planet's capacity, framed as the exploration of a safe operating space for humanity (Rockström et al. 2009a). Johan Rockström et al. (Rockström et al. 2009b) define barriers using the following categories (Tab. 1).



Fig. 1. Impact and Consequences of Climate Change in the European Union. The report is based on indicators EEA(2012). Source: EEA (SOER 2015), adapted from 'Urban adaptation to climate change in Europe,' EEA Report No 2/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Author's translation.

Ryc. 1. Wpływ i skutki zmian klimatycznych w Unii Europejskiej. Raport oparto na wskaźnikach. EEA (2012). Źródło: EEA (SOER 2015), na podstawie Urban adaptation to climate change in Europe, EEA Report No 2/2012, European Environment Agency, Kopenhaga, Dania. Tłumaczenie autora.

Tab. 1. Categories of Planetary Boundaries. Source: Rockström J., et al. (2009b) 'Planetary Boundaries: Exploring...' Fig. 4, p. 7. Author's translation.

Tab. 1. Kategorie granic planetarnych. Źródło: Rockström J., i.in. (2009b) Planetary Boundaries: Exploring... Fig. 4., s.7. Tłumaczenie autora

Charakter Graniczny Boundary character	Procesy o progach skali globalnej	Powolne procesy bez znanych progów skali globalnej
Skala Procesu Scale of processes	Processes with global scale thresholds	Slow processes without known global scale thresholds
Procesy systemowe w skali planetarnej	Zmiana klimatu Climate change	
		Ozon stratosferyczny Stratospheric ozone
Systemic processes at planetary scale	Zakwaszenie oceanu Ocean acidification	
		Globalne cykle P i N Global P and N cycles
Zagregowane procesy w skali lokalnej / regionalnej		Atmosferyczne ładowanie aerozolu Atmospheric aerosol loading
		Wykorzystanie słodkiej wody Freshwater use
Aggregated processes from local/regional scale		Zmiana użytkowania gruntów Land use change
		Utrata różnorodności biologicznej Biodiversity loss
		Zanieczyszczenie chemiczne Chemical pollution

The European Commission, noting that *buildings are responsible for 40% of energy consumption and 36% of CO<sub>2</sub> emissions in the EU annually. While new buildings generally require three to five liters of heating oil per square meter per year, older buildings consume an average of about 25 liters/m<sup>2</sup>, and some buildings require up to 60 liters/m<sup>2</sup>. Currently, about 35% of buildings in the EU are over 50 years old. By improving the energy efficiency of buildings, it is possible to reduce energy consumption in the EU by 5% to 6% and reduce CO<sub>2</sub> emissions by approximately 5% (EU Commission 2020).*

Furthermore, it should be noted that all products require specific energy inputs, resulting in a particular energy-intensive value (Baładynowicz 1983), material-intensive value, and waste-emitting value. Existing tools and methods for ecological assessments indicate both the negative and positive environmental impacts of activities, processes, as well as products. A series of assessments, analyses, and methods can be characterized based on the analysis of inputs and outputs of elements within the life cycle. Subsequent interpretations cannot be analyzed in a one-dimensional manner but rather in a multi-criteria fashion, providing several variants to formulate accurate conclusions and action plans.

### 3.1. Negative aspects of single-family housing impact on the natural environment

Contemporary single-family house construction largely contributes to a specific amount of negative impact (CO<sub>2</sub> emissions) and the consumption of materials, energy, water, and other natural resources. It is worth noting that from an environmental perspective, single-family homes appear to be more energy and material-intensive, and there is also criticism of the uneconomical development of suburbs, partly due to the provision of technical infrastructure. It should be assumed that there is a necessity to make sustainable design decisions aimed at minimizing a building's impact throughout its life cycle on the ecosystem. The design and construction of single-family houses, among others, should lead to the exploration of building solutions that are energy-efficient, low-energy, and environmentally friendly. Such objects are categorized as intelligent, low CO<sub>2</sub> emission, passive, zero or plus-energy buildings, characterized by a holistic approach to the building's life cycle (Przesmycka 2012), (Czarnecki, Rytel 2013, pp. 11-20).

To determine the impact of single-family housing on the environment, it is essential to highlight the energy intensity over the buildings' life cycle to understand their full environmental impact. Sarosiek and Sadowska (2009) characterize the change in estimated values of the heating demand indicator over the years, pointing out that *"if we consider the total energy consumption over the entire life cycle as 100%, the production of materials and the construction of the building account for 10-12%, renovations and demolition about 5%, while the usage phase constitutes a substantial 83-85% of this energy"* (Sarosiek, Sadowska 2009, p. 77).

Węglarz (Węglarz 2014) indicates the average heat demand (usable energy, which includes external partition surface area and standardized energy requirements) for model buildings as follows:

1. Detached single-family residential building: 216 kWh/(m<sup>2</sup>\*year).
2. Semi-detached single-family residential building: 186 kWh/(m<sup>2</sup>\*year).
3. Row single-family residential building: 150 kWh/(m<sup>2</sup>\*year).

However, according to the Association for Sustainable Development, energy consumption for heating should not exceed certain limits, as indicated by the energy classification of buildings (Żurawski 2013) and in accordance with the current standards.

Ecologically friendly construction is evolving rapidly, which necessitates continuous data updates. Analyzing the above sets of classes, assessments, and energy classifications of buildings in terms of seasonal heat demand indicators and construction period, a classification was performed in groups (Tab. 2).

Tab. 2. Division and Energy Classification of Buildings. Author's compilation based on tables: Sarosiek, Sadowska (2009), Żurawski (2013).

DIVISION AND ENERGY CLASSIFICATION OF BUILDINGS			
Energy class	Energy assessment	Indicator E (kWh/m <sup>2</sup> /year)	Construction period
H	High energy-consuming buildings (not subjected to thermal modernization)	$E > 250$	until 1982
G	Energy-consuming buildings (large panel and traditionally constructed)	$150 < E < 250$	1983 - 1998
F	Medium energy-consuming buildings (systematic and traditional)	$100 < E < 150$	
E	Medium energy-efficient buildings (single-family and multi-family houses, as well as those subjected to thermal modernization)	$80 < E < 100$	1999 - 2009
D	Energy-efficient buildings	$45 < E < 80$	
C	Low-energy buildings	$15 < E < 45$	
B	Passive houses	$E \leq 15$	2010 – 2020
A	(Nearly) Zero-energy buildings	$E \pm 0$	(DPEiR 2010)
A+	Zero-energy and energy-positive buildings	0+E	
A++	Sustainable buildings (generating energy, utilizing LCA)	+E + LCA	from 2021

It is pointed out that an important element in the energy certification of buildings is the CO<sub>2</sub> emission factor used for electricity. According to KOBIZE - the National Center for Emission Balancing and Management (KOBIZE), the reference unit emission factor for carbon dioxide in the production of electricity in Poland in 2021 (for final electricity consumers) was 708 kgCO<sub>2</sub>/MWh or 0.708 kgCO<sub>2</sub>/kWh (in 2020, it was 698 kgCO<sub>2</sub>/MWh).

Another aspect is the multifaceted assessment of building materials. It should be noted that the materials used in the creation of an architectural object follow a specific path, which is subjected to analysis from the extraction of raw materials and their processing > the production process of materials required for the final product > distribution and transportation of materials > construction of the object > usage of the object > demolition of the object = recycling of demolition waste or landfill disposal. In traditional processes of material production, natural resources are used. The energy consumption for the production of building materials is closely linked to carbon dioxide emissions (Milne, Reardon 2008). According to research by the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), the embodied energy invested in materials used for constructing an average household is equivalent to the energy used for heating, cooling, ventilation, lighting, and equipment in that household over a period of approximately 15 years (Lancaster 2012). Therefore, it is crucial to make informed choices regarding materials that, during or after the building's use, can be reused, recycled, or, if necessary, disposed of in landfills. Awareness of this sequence of events is important from the perspective of ecological methods, including Life Cycle Assessment (LCA), as it minimizes environmental impact through informed selection and consistent use of building materials in the structure, which plays a significant role in the concept of sustainable development<sup>1</sup>.

The multifaceted nature of building products thus boils down to their energy and ecological characteristics. This characteristic, encapsulated in Life Cycle Assessment (LCA) and a comprehensive Life Cycle Assessment, is contained in published environmental product declaration (EPD) data<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Over the course of 100 years, the amount of raw materials used for material production in the USA increased from 161 million tons in 1900 to 2.8 billion tons in 1995. Building materials account for approximately 75% of these materials, with only 8% of them being considered renewable (Matos, Wagner 1998).

<sup>2</sup> It should be noted that EPDs are specified by independent research organizations such as Eco-Platform. Most often, declarations cover a limited scope that determines the product's environmental impact in modules, such as the mandatory product manufacturing stage (A1-A3).

The description of likely events before, during, and after the material's life cycle indicates an estimated environmental impact. Consequently, this allows for the imposition of certain restrictions on the intensity of the ecological footprint.

The presented framework analyses should be regarded as a guide for expressing primarily the negative environmental impact of buildings in the future, but it is also worthwhile to consider the potential positive impact on the environment of the studied development. In the study, an energy assessment was adopted at the level of minimum energy-efficient houses (Class D). Due to the detailed requirements for compliance with the provisions of Article 5 of the Building Law - the regulation on the technical conditions that buildings and their location should meet (Technical Conditions), partial maximum values of the EPH+W indicator [kWh/(m<sup>2</sup>·year)] for heating, ventilation, and domestic hot water preparation for a single-family house are indicated<sup>3</sup>. These values are evolving as follows: from 2014 - 120 kWh/(m<sup>2</sup>·year), from 2017 - 95 kWh/(m<sup>2</sup>·year), from 2021 - 70 kWh/(m<sup>2</sup>·year).

#### 4. CHARACTERISTICS OF LIMITING THE NEGATIVE IMPACT OF A BUILDING ON THE NATURAL ENVIRONMENT IN A GIVEN AREA

Studying the environmental impact characteristics of single-family buildings in a designated area can be accomplished through:

- (1) Determining their construction timeline, which subsequently influences the estimation of energy demand [kWh/(m<sup>2</sup>·year)] and identifying materials present in the building's structure during the construction period that meet the thermal transmittance coefficient "U" value [W/(m<sup>2</sup>K)];
- (2) Determining the equivalent environmental impacts of the designed and constructed building (Building energy equivalent:  $E_{sbe}$  expressed in kWh, and Building environmental equivalent:  $E_{sb}$  expressed in kgCO<sub>2</sub>) based on the materials used (using the Life Cycle Analysis method, LCA) and the energy demand for heating and ventilation in the heated zone (utilizing the energy characteristics, digital tools analysis,  $Q_u$ ) of the analyzed building. This analysis can be described according to the formula proposed by the author as follows:

$$E_{sbe} \text{ kWh} = \sum U_{me} + \sum Q_{ue}$$

$$E_{sb} \text{ kgCO}_2 = \sum U_m + \sum Q_u$$

where:

$\sum U_m$  – is the sum of the thermal transmittance coefficients of the building's external partitions [W/(m<sup>2</sup>\*K)], determining the materials used and their environmental impact equivalent (resulting from Life Cycle Analysis of the materials contained in EPD), [kWh/year] = the sum of structures (in EPD calculations) expressed in MJ and then converted to kWh (divided by the number of years of planned existence (life cycle) of the building).

$$U_{1m+2m+\dots+m} = (\text{MJ} / x \text{ years}) * 0.2777777778 \text{ (kWh)}$$

$$1 \text{ MJ} = 0,2777777778 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

as well as the sum of all structures (quantities resulting from the sum in the Life Cycle Assessment - LCA - of material) GWP = Global Warming Potential [kgCO<sub>2</sub>-Eq].

$\sum Q_{ue}$  - is the sum of the annual energy demand for heating and ventilation in the building's heated zone - [kWh/year] multiplied by the current emission coefficient (kgCO<sub>2</sub>/kWh).

<sup>3</sup> Resolution No. 91 of the Council of Ministers dated June 22, 2015, regarding the adoption of the *National Plan aimed at increasing the number of low-energy buildings*.

$\Sigma Q_u = Q_u 0,708 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$  (this value is given only for the calculations below; for the KOBIZE indicator, change it to the applied heat unit).

In this way, the described elements define the computational nature of the quantity of substances in the material bank. At the same time, they provide a complete spectrum of information about buildings and the possibility of estimating the limit of ecological footprint emissions for the area in the context of both existing and planned embedded materials. The "bubble mechanism" is pointed out as the limit of the ecological footprint for single-family building architecture in a given area (Gradziński 2022) (Fig. 2).

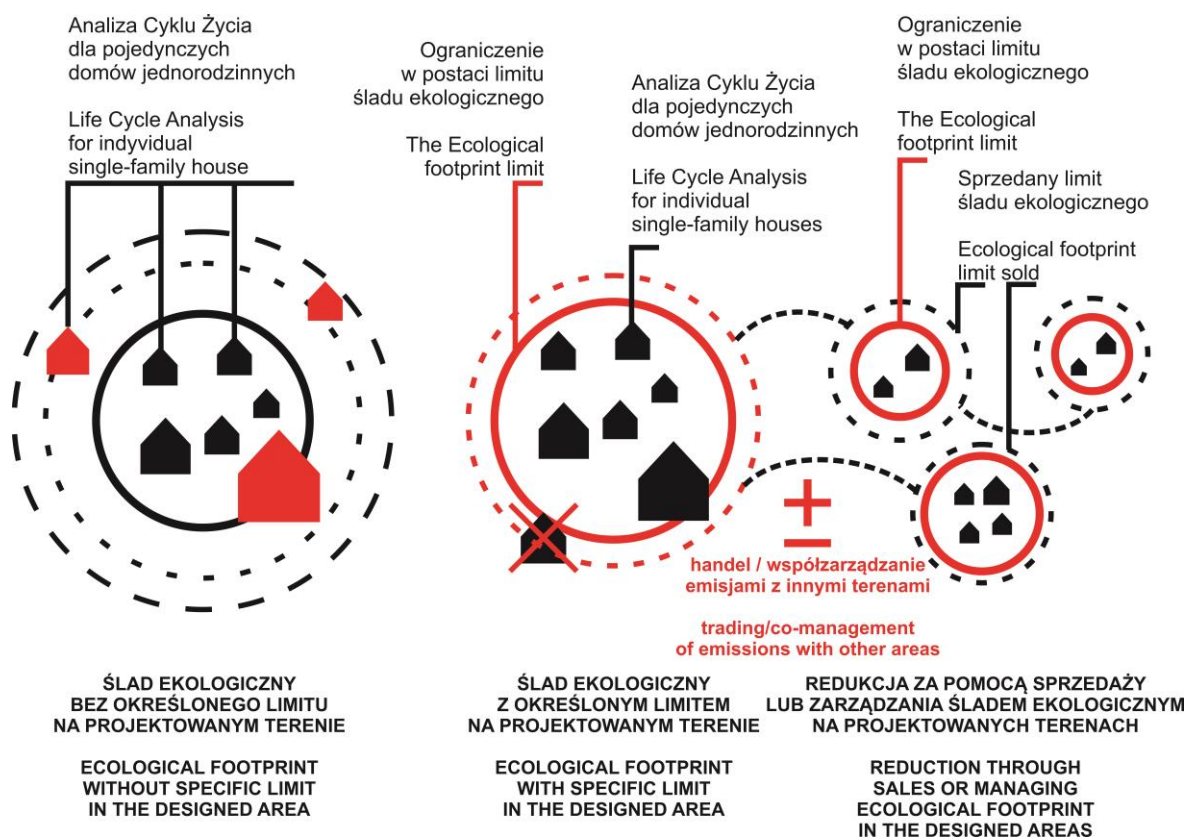


Fig. 2. Diagram of the "bubble mechanism" as an appropriate measure of the impact of single-family housing on the environment. Developed by the author.

Ryc. 2. Schemat mechanizmu klosza jako właściwego miernika wpływu budownictwa jednorodzinnego na środowisko. Opracowanie własne autora.

It should be noted that the "bubble mechanism" is currently implemented in the business and manufacturing sectors, which involves determining the maximum level of pollutant emissions and their potential trading of surpluses in three systems. Trade in a given sector is achieved by establishing a total emissions limit (cap) and operates in two dimensions: *upstream* (at the producer level) and *downstream* (at the emission source) (Gradziński 2022, p. 97). The direction of consideration regarding the integration of the cap and trade mechanism into the architectural design process should enable control and the determination of the minimum and maximum impacts (both negative and positive) of buildings within a given area. This should lead to targeted reduction and coordination in emissions trading between areas, similar to the current corporate sector systems.

The study adopted a computational method that takes into account the division of buildings according to:



- 1) the number of objects built in a specific time frame,
- 2) determination of their energy demand (kWh/m<sup>2</sup>/year),
- 3) identification of the construction time and materials used in the building structure (kgCO<sub>2</sub>).

As a result, it is possible to estimate the environmental impact (kgCO<sub>2</sub>/kWh) of the total material structure of buildings constructed in a given area, determining their environmental footprint limit within a closed area.

Below, the impact of single-family housing on the environment has been calculated in terms of the number of constructed buildings (from the Central Statistical Office - GUS), in specific time intervals corresponding to the period of their construction, and the resulting heat demand, characterizing the equivalent emission of carbon dioxide (KOBIZE, 2014-2022):

2014-2016 - number of constructed buildings (individual buildings)  $E = 213\,966 \times$  average usable area  $137\text{ m}^2 = 29,285,948\text{ m}^2$  (total usable area).

Heat demand  $120 > E > 95$  (kWh/m<sup>2</sup>/r)

$$3\,514\,313\,760,0 < E_{\text{sb}} \text{ kWh} < 2\,782\,165\,060,0$$

The reference unit emission factor of carbon dioxide for electricity production in Poland 0,781 kgCO<sub>2</sub>/kWh (KOBIZE, 2016)

$$2\,744\,679\,046,6 \text{ kgCO}_2/\text{r} < E_{\text{sb}} \text{ kgCO}_2 < 2\,172\,870\,911,9$$

2017-2022 - The number of constructed buildings (individual buildings).  $E = 560\,501 \times$  the average usable area.  $142,7\text{m}^2 = 79\,983\,492,7\text{m}^2$  (the total usable area)..

Heat demand  $95 > E > 70$  (kWh/m<sup>2</sup>/r)

$$7\,598\,431\,806,5 < E_{\text{sb}} \text{ kWh} < 5\,598\,844\,489,0$$

Reference indicator of carbon dioxide emissions per unit of electricity production in Poland 0,708 kgCO<sub>2</sub>/kWh (KOBIZE, 2022)

$$5\,379\,689\,718,6 < E_{\text{sb}} \text{ kgCO}_2 < 3\,963\,981\,898,2$$

One can assume that in the time frame from 2014 to 2022, the heat demand of constructed buildings (individual buildings) amounted to:  $11\,112\,745\,566,5 < E_{\text{sb}} \text{ kWh} < 8\,381\,009\,549,0$ , and they emitted a certain amount of carbon dioxide into the atmosphere during the production of electricity, namely:  $8\,124\,368\,765,2 < E_{\text{ek}} \text{ kgCO}_2 < 6\,136\,852\,810,1$ .

#### 4.1. Analysis using the LCA method and energy demand based on three material solutions

The building with three different material solutions underwent an analysis and Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate its environmental impact<sup>4</sup>. Using Environmental Product Declarations (EPD), the environmental impact of the building materials over the entire assumed 100-year life cycle (Reference Service Life - RSL) was calculated. This analysis considered factors such as the potential number of cycles of changes or repairs based on the selected building materials. To achieve this, the following indicators were used: Global Warming Potential (GWP), Total use of non-renewable primary energy resources (PENRT), and Total use of renewable primary energy resources (PERT).

In addition, the sum of the equivalent energy demand (kWh/m<sup>2</sup>/year) for the analyzed buildings over the assumed 100-year time frame was calculated. The analysis of the negative environmental impact of single-family buildings in the given area is possible by considering the materials used in the building's structure during its construction, meeting the thermal transmittance coefficient "U" [W/(m<sup>2</sup>\*K)]. This information is then used to estimate the energy demand for heating and ventila-

<sup>4</sup> The author prepared their own spreadsheet to ensure the credibility of the calculations because free LCA software provides calculations based on estimated or standardized values. Therefore, to have real product values, they used specific Environmental Product Declarations (EPD) from online platforms. Source: EPD Portal, knaufinsulation, EPD - Online, IBU

tion in the heated zone of the analyzed building, expressed in kWh/year, as well as the environmental equivalent of the building, expressed in kgCO<sub>2</sub>/year. By obtaining the results, the environmental impact (kgCO<sub>2</sub>/kWh) of the total material structure of the buildings was estimated. The research utilized a baseline example, i.e., a building from 1933 (Fig. 3).

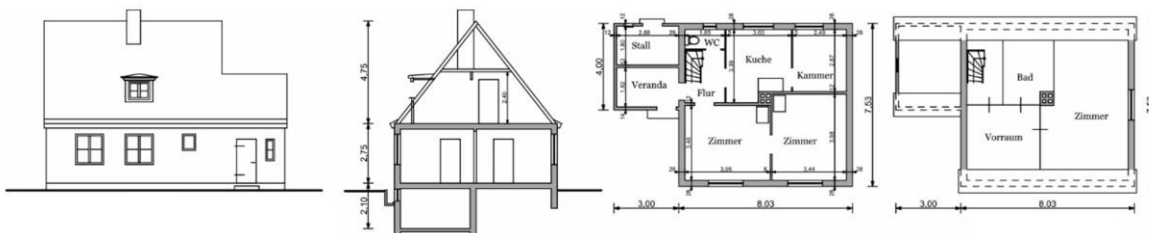


Fig. 3. The analyzed single-family house in the Gumieńce district, Szczecin. Author's work.  
 Ryc. 3. Analizowany dom jednorodzinny w dzielnicy Szczecin – Gumieńce, Szczecin. Opracowanie autora

In the first study, original material data was used. In the second study, the building materials were changed to meet the parameters of the thermal transmittance coefficient "U" specified in the Technical Conditions. In the third case, a building constructed with a wooden frame technology was analyzed. In all the studies, the environmental impact of the materials used and the energy demand were calculated using LCA (the thermal transmittance coefficient "U" was calculated based on the building materials used). The studies were conducted over an assumed 100-year cycle (Tab. 3) The Life Cycle Assessment (LCA) evaluated the environmental impact of the materials used and the energy demand (the thermal transmittance coefficient "U" was calculated based on the building materials used). The studies were conducted over a assumed 100-year cycle (Tab. 3).

Tab. 2. The impact of building materials on the environment throughout their life cycle and the energy demand of the building (area 160m<sup>2</sup>, 294.1 kWh/m<sup>2</sup>/year) on the environment throughout its life cycle. Author's work..

The impact of building materials on the environment throughout the entire life cycle (100 years)			The energy demand of the building (area 160m <sup>2</sup> , 294.1 kWh/m <sup>2</sup> /year) on the environment over the full life cycle (100 years).					
	PENRT + PERT MJ	GWP kgCO <sub>2</sub> -eQ.	Annual energy demand kWh/m <sup>2</sup> /year	Area. m <sup>2</sup>	Time (years)	kWh	PENRT MJ	GWP kgCO <sub>2</sub> -eQ.
1	605 009,7 + 86 731,7 TOTAL 691 741,5	41 885,6	294,1	160	100	4 706 416	16 943 097,6	3 755 720,0
2	728 790,0 + 535 88,1 TOTAL 782 378,1	776 79,3	57,7	160	100	922 784	3 322 022,4	736 381,6
3	252 697,0 + 518 288,0 TOTAL 770 979,0	-6 241,9	63,5	160	100	1 016 096	3 657 945,6	810 844,6

Below, we have compared the environmental impact of materials and the associated CO<sub>2</sub> emissions - Global Warming Potential (GWP) and consumption: the total use of non-renewable primary energy resources (PENRT), as well as the total use of renewable primary energy resources (PERT), i.e., PENRT+PERT between the materials used in the structure and the use of the building (over a 100-year period) (Fig. 4), (Fig. 5), (Fig. 6).

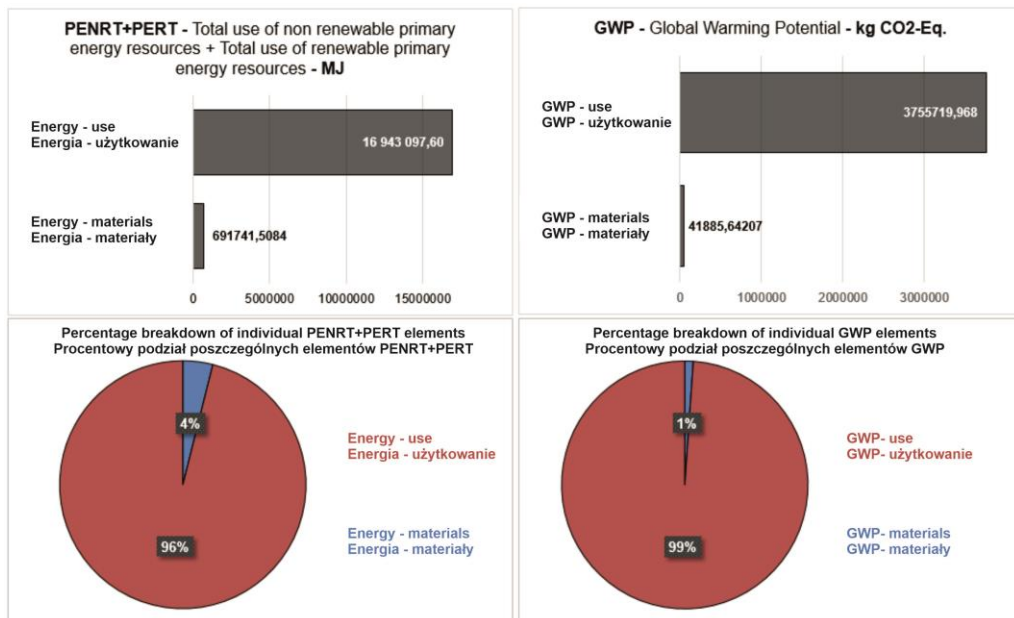


Fig. 4. . Example 1. Charts (Life Cycle Analysis calculations of a single-family house from 1933) the ratio between PENRT+PERT and GWP predicates: usage vs. materials, and the percentage share of PENRT+PERT and GWP of building materials used in the building's structure vs. building use (100-year period). Author's work; calculations made using EPD analysis and a prepared calculator in Microsoft Excelsoftware.

Ryc. 4. Przykład 1. Wykresy (obliczeń Analizy Cyklu Życia domu jednorodzinego z 1933 roku) stosunek pomiędzy PENRT+PERT oraz GWP predykatów: użytkowania a materiałami oraz procentowego udziału PENRT+PERT oraz GWP zastosowanych materiałów budowlanych w strukturze budynku a użytkowaniem budynku (czas 100lat). Opracowanie autora; obliczenia wykonane przy użyciu analizy EPD i przygotowanego kalkulatora w programie Microsoft Excel .

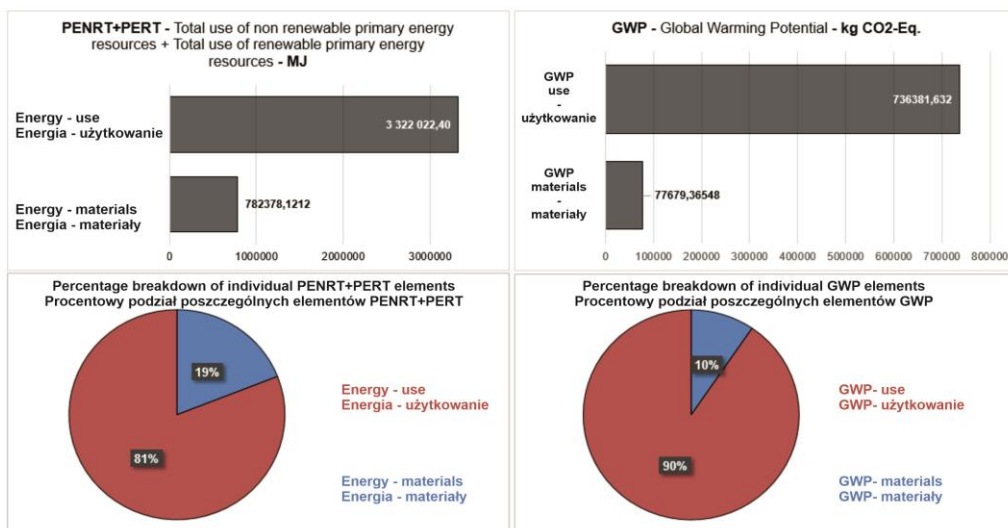


Fig. 5. Example 2. Charts illustrating (according to Life Cycle Analysis calculations of a single-family home meeting the Technical Conditions from 2017) the relationship between PENRT+PERT and GWP predicates: usage vs. materials, and the percentage share of PENRT+PERT and GWP of construction materials used in the building's structure vs. building usage (100 years). Author's work; calculations performed using EPD analysis and a prepared calculator in Microsoft Excel software

Ryc. 5. Przykład 2. Wykresy ilustrujące (wg obliczeń Analizy Cyklu Życia domu jednorodzinego spełniającego Warunki Techniczne z 2017 roku) stosunek pomiędzy PENRT+PERT oraz GWP predykatów: użytkowania a materiałami oraz procentowego udziału PENRT+PERT oraz GWP zastosowanych materiałów budowlanych w strukturze budynku a użytkowaniem budynku (czas 100lat). Opracowanie autora; obliczenia wykonane przy użyciu analizy EPD i przygotowanego kalkulatora w programie Microsoft Excel

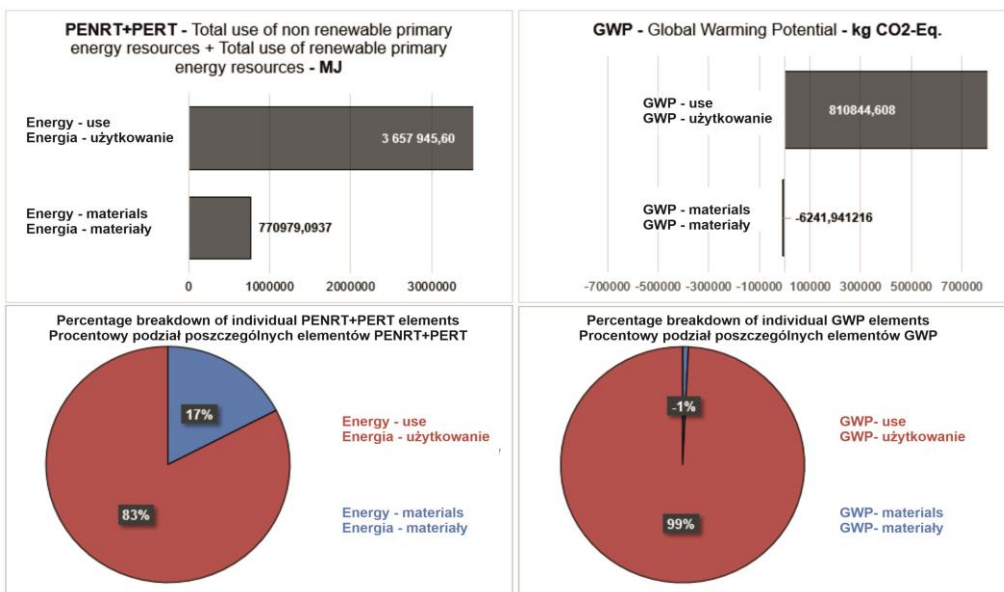


Fig. 6. Example 3. Charts illustrating (according to the calculations of the Life Cycle Analysis of a single-family house built using wooden construction technology meeting the Technical Conditions from 2017) the relationship between PENRT+PERT and GWP predicates: usage vs. materials, and the percentage share of PENRT+PERT and GWP of building materials used in the structure of the building vs. building use (100-year period) Author's work; calculations made using EPD analysis and a calculator prepared in Microsoft Excel software.

Ryc. 6. Przykład 3. Wykresy ilustrujące (wg obliczeń Analizy Cyklu Życia domu jednorodzinnego w drewnianej technologii wznoszenia spełniającego Warunki Techniczne z 2017 roku) stosunek pomiędzy PENRT+PERT oraz GWP predykatów: użytkowania a materiałami oraz procentowego udziału PENRT+PERT oraz GWP zastosowanych materiałów budowlanych w strukturze budynku a użytkowaniem budynku (czas 100lat). Opracowanie autora; obliczenia wykonane przy użyciu analizy EPD i przygotowanego kalkulatora w programie Microsoft Excel.

The results of the analysis illustrate the amount of electricity needed and the carbon dioxide emissions generated during the production of building materials, as well as the amount of electricity needed and the carbon dioxide emissions generated during the operation of the building over its entire 100-year life cycle. Below are summarized environmental impacts, including the energy equivalent of the building:  $E_{sb}$  (in kWh), the environmental equivalent of the building:  $E_{sb}$  (in  $kgCO_2$ ), and their percentage share:

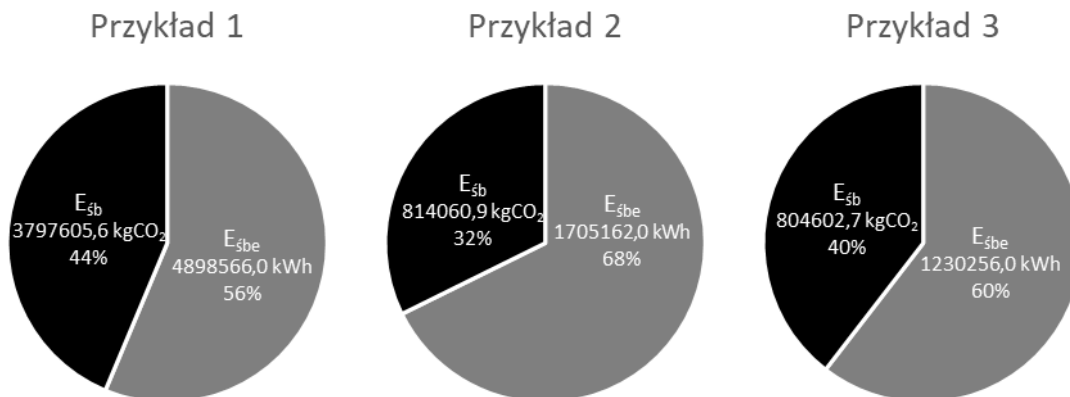


Fig. 7. Comparative summary of energy (kWh) and environmental (kgCO<sub>2</sub>) equivalent for the three analyzed building at 100-year life cycle. Source author

Ryc. 7. Zestawienie porównawcze udziału ekwiwalentu energetycznego (kWh) i środowiskowego (kgCO<sub>2</sub>) dla trzech analizowanych rozwiązań budynku w cyklu życia 100 lat. Opracowywanie autora

The results of the analyses presented showed that the best in terms of CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption is example 3 - a single-family house built using wooden construction technology. On the other hand, example 2 - a single-family house built using traditional construction technology – is only slightly worse, while example 1 - a single-family house from 1933 - is significantly worse in terms of environmental impact. This allows for a conscious choice of the best solution and environmentally-friendly control and optimization of, for example, materials in the structure of the designed building at an early stage of the design process.

## 5. DISCUSSION

### Architectural control in the Anthropocene era

The noticeable issue of the environmental "footprint" left by a building in its environment currently affects both the subject (architecture) and the agent (architect, user) responsible for the process and formal solutions. Undoubtedly, this is an area for continuous discourse on the shaping of a pro-environmental building in the context of sustainable development principles. It's worth noting that the terms "nature environment" and "natural environment" are often used interchangeably, considering them synonyms. It should be noted that the natural environment in the literature of the field is an environment that has been to some extent altered by humans, while the natural environment is an ecosystem without human interference – including, for example, national parks.

Concerns about negative environmental impact have directed research efforts towards reducing consumption, emissions, and waste, including materials and energy. In the early 1960s, this sparked interest in finding ways to determine the path a given product follows during its existence, i.e., its full life cycle. During that time, the life cycle inventory method emerged, as presented by Harold Smith at the World Energy Conference in 1963. In later years, waste and environmental pollution became significant issues, leading to the development of the Life Cycle Assessment (LCA) method, which became a marketing method as opposed to a practical computational method in the late 1980s and early 1990s. It was noticeable that over the centuries, the relationship between humans and nature was shaped under the clear influence of an anthropocentric pattern (Goldsmith 1972). The increasing urbanization worldwide (Meadows et al. 1972) has left its mark on the environment, resulting in global warming and climate change, as reported in annual reports by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) and the EEA (European Environment Agency) nowadays. The scientific approach to climate change has encountered various forms of societal denial or scepticism. The general phenomenon of climate change denial shapes denialism regarding global warming, also referred to as climate denial or climate change denial (keyword: Denying global warming). It should be noted that numerous scientific publications have emerged in the field of research on the environmental impact of architecture in the context of sustainable development. The term "Anthropocene" was proposed in the year 2000 by Eugene Stoermer and Paul Crutzen as a new geological epoch that marks the end of the officially recognized *Holocene* epoch, which is the current geological epoch. Just as Rockström demonstrated (Rockström et al. 2009a, b), Stoermer and Crutzen also pointed out that there has been significant human intervention in ecosystems, the global atmosphere, and the geological and ecological systems of the planet. According to these authors, this necessitated a change in the nomenclature of geological epochs.

Currently, there is a strong emphasis on energy conservation, which is changing the built environment into a significant issue. It's important to address the debate on the impact on the climate in this context. Publications extensively describe methods, analyses, standards, and the impact on the natural environment of building objects, as well as the principles and actions that define the assessment of the quality of the built environment in relation to the concept of sustainable development. For example, in a 1998 publication, Baranowski describes the possibility of defining a comprehensive theory and methodology based on the principles of sustainable development. Similarly, the development of quality assessments, implementation, and strategies for construction are discussed by Niezabitowska and Masły (2007), Stawicka-Wałkowska (2001), Kamionka (2012), and the dematerialization of architecture proposed by Świątek (2015). On the other hand, publica-

tions by Adamczyk (2004), Górzyński (2007), Johns et al. (2009), Barański et al. (2011), Bayer et al. (2010) describe the application of the LCA method and the impact of buildings on the environment, as well as the variant selection of building materials required for constructing buildings. This proves that the impact of the built environment on the natural and nature environment should be considered more broadly. Designer, in the design process, must consider many alternative options, questioning the final result each time, and constantly striving to improve the quality of life through project optimization. Therefore, solutions, analyses, and life cycle assessments that allow for the examination of energy consumption (MJ) and the generation of carbon dioxide into the atmosphere (GWP) from production to dismantling and the reuse of materials are pointed out.

In light of the considerations presented in the article, it appears reasonable to undertake further efforts in determining the impact of minimizing and controlling two key aspects of matter and energy on the aesthetics of architecture, such as a single-family home. The proper direction seems to be related to the appropriate selection of building materials (specifying their characteristics as durable, ecological, with a low environmental impact coefficient, assuming they can be easily dismantled and considering a low embedded CO<sub>2</sub> coefficient) and energy demand throughout the building's life cycle. Buildings should adhere to principles such as the 4R approach, design for deconstruction, and formulate aspirations for regenerative design in the era of the Anthropocene.

## 6. CONCLUSIONS

The presented results from the Life Cycle Assessment of three material solutions for the building describe the impact on the natural environment in terms of the materials used in the building's structure and its energy consumption. This highlights the aim of controlling and minimizing the architectural impact on the natural environment. Changes in materials and energy have an impact on the ecological dimension of the building. It has been shown that two significant factors influencing the ecosystem are the energy requirements necessary for the proper functioning of the building, such as heating, and the production of building materials. It is acknowledged that minimizing and optimizing these two elements should be a priority in the process of designing regenerative architecture. It is also assumed that architecture can not only minimize its negative impact on the environment but actively contribute to its improvement and regeneration.

It should be stated that the described impact of single-family housing on the natural environment, including the idea of the "bubble mechanism" as a limit on the ecological footprint in a given area, is significant in the architectural design process. The research results presented, analyzing the relationships between building materials, energy consumption, and emissions, including the potential for greenhouse gas emissions (GWP), are noteworthy. They should be incorporated into the architectural design process at its early stages to enable control and minimization of the impact of the built environment on the natural and environmental surroundings.

## EKOLOGICZNA MINIMALIZACJA I KONTROLA KONSUMPCJI ENERGII I MATERII NA PRZYKŁADZIE DOMU JEDNORODZINNEGO

### 1. WPROWADZENIE

Budynki to istniejąca forma materialna, cechująca się relatywną konsumpcją energetyczną oraz zawartymi w niej materiałami (energiją i substancją). Weizsäcker (Weizsäcker 1978) wskazuje, że jeśli rozpatrywać materię po arystotelesowsku, to jest ona możliwością formy, a to czy dana forma

jest określona czy nie – stanowi pewną alternatywę, która wymaga rozstrzygnięcia w czasie pewnej wielkości alternatyw. Zakładając, iż dom zbudowany jest z czegoś, jakichś materiałów, to określenie materialności materii jest nałożeniem na niego (dom) spektrum informacji, danych (o materii). Wiedza mierzona, jako przyrost informacji stanowi obiektywną cechę przedmiotu. Abstrakcyjnie: cegła, drewno, szkło jako materiały budowlane nakładają na dom rzeczywistą określoną całość materii i formy. W istocie nie ma formy bez materii. Materia, która jest połączeniem substancji i energii nadaje wyraz formie. Podobnie z użytkowaniem budynku, który potrzebuje określonej ilości konsumowanej energii. Wskazuje się, że oba te elementy: materii i energii, są istotne w procesie projektowania m.in. domu jednorodzinnego.

Poruszana tematyka metody oceny cyklu życia (LCA) jest znana i stosowana przede wszystkim w procesie produkcji materiałów budowlanych do określenia ich wpływów na środowisko przyrodnicze. Warto zwrócić uwagę, że obecnie rozwijane jest wprowadzenie modeli parametrycznych. Hollberg i Ruth (2016) w badaniach posługują się programowaniem i modelowaniem parametrycznym, gdzie zastosowano dwa przypadki: nowego projektu budynku wielorodzinnego oraz domu jednorodzinnego. Zauważają oni, że projektant ma dwie możliwości wpływu na projekt: albo poprzez ręczną zmianę geometrii, materiałów budowlanych i usług budowlanych, albo poprzez użycie narzędzia optymalizacyjnego. Wykazują oni z powodzeniem możliwości parametrycznej optymalizacji pro-środowiskowej projektu przez architekta. Z kolei, Arvizu-Piña, i.in. (Arvizu-Piña i.in. 2023) porównują możliwości opracowania minimalizacji oddziaływania na środowisko przyrodnicze przy pomocy podejścia parametrycznego BIM-LCA w tym kilku narzędzi LCA przygotowanych dla Europy i USA oraz dla Ameryki Łacińskiej. Wyniki obrazują różnicę na poziomie 40% wykazując różne kategorie oddziaływania na środowisko i pozwalając na 30% minimalizację śladu węglowego dla studium przypadku domu bioklimatycznego (budynek socjalny, Hermosillo, Sonora w Meksyku) na poziomie 54,7 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>-rok (wcześniej 78,8 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>-rok). W pracy Famiglietti, Madioum Motta korzystając z biblioteki ecoinvent (EN15804) jako biblioteki podstawowej i metod charakteryzacji (EN 15978) zostało zbadanych i porównanych około 240 000 jednostek budowlanych z Mediolanu w regionie Lombardii, wykorzystując do tego celu otwarte bazy danych. Opracowanie obejmowało budynki mieszkalne, komercyjne i handlowe (stare i nowe). Wyniki badań wykazały, że ekwiwalent dwutlenku węgla kształtuje się na poziomie 15 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup> powierzchni netto × rok) dla starych i nowych obiektów oraz 21 kg CO<sub>2</sub>eq / (m<sup>2</sup> powierzchni netto × rok) w przypadku nowych budynków o niemal zerowym zużyciu energii. Przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat LCA dotyczący energii oraz gazów cieplarnianych, przygotowany przez Bahramian, Yetilmeszoja (2018) analizuje 230 publikacji z lat 1997-2018. Wykazali, że budynki niskie (1-5 pięter) w porównaniu do budynków wysokich (powyżej 5 pięter) były częściej analizowane, gdzie 70 procent z nich to budynki mieszkalne a 60% wysokich to obiekty komercyjne. W ocenie cyklu życia uwzględniono żywotność budynków od 20 do ponad 100 lat. Zwrócono uwagę, że bazą danych była Ecoinvent stanowiąc 65% a najczęściej analizowanych prac (40%) posługiwało się oprogramowaniem SimaPro. Z kolei, w tekście Roberts, Allen, i Coley (2020) przeanalizowano 274 prace naukowe z 2019 roku oceniając w jaki sposób metoda LCA jest uwzględniana na różnych etapach procesu projektowania budynku i jakie ulepszenia są potrzebne dla projektowania budynków zeroemisyjnych. W przeglądzie literatury wykazano, że LCA napotyka bariery metodologiczne i praktyczne uniemożliwiając podejmowanie decyzji projektowych na wczesnym etapie procesu projektowego oraz przekłada się to na niski wpływ efektywności środowiskowej poddanych analizie budynków. Należy również wskazać na opracowanie raportu przez IEA (International Energy Agency), w którym na bazie analizy studiów przypadku wykazano, że *różne podejścia, oprogramowanie i algorytmy, funkcje celu, zmienne, ograniczenia i parametry są odpowiednie i wykorzystywane w procesach optymalizacji. Utrudnia to opracowanie ogólnych wytycznych dotyczących optymalizacji energii pierwotnej w cyklu życia, emisji gazów cieplarnianych oraz efektywności środowiskowej i ekonomicznej budynków. Raport zaleca wykreowanie odpowiedniej procedury w celu identyfikacji optymalnych rozwiązań projektowych lub modernizacyjnych dotyczących różnych aspektów całego cyklu życia budynku (np. materiały i grubości przegród budowlanych, wykorzystanie technologii energii odnawialnej w trakcie eksploatacji, okresu użytkowania, itd.* (IEA 2023, s.70).

Przeprowadzone w pracy badania wpisują się w nurt dociekań naukowych oraz wskazują na możliwość poszerzenia stanu wiedzy o nowe elementy we wczesnym etapie procesu projektowego. W tym celu w artykule zaproponowano m.in. obliczeniowe oszacowanie konsumpcji energetycznej i generowania CO<sub>2</sub> do atmosfery przy pomocy autorskich wzorów, charakteryzując i obrazując

ograniczenia negatywnego wpływu budynków na środowisko naturalne na zadanym obszarze. Tym samym, w pracy zaproponowano, wydaje się, nowatorską ideę mechanizmu klosza, która obecnie stosowana jest w sektorze produkcyjnym i służy do handlu emisjami. Połączenie tych dwóch elementów umożliwia m.in. badanie w założonym przedziale czasowym oraz na zadanym obszarze. Następnie, elementy pozwalają na określenie generowanego dwutlenku węgla do atmosfery przez zastosowane materiały oraz z konsumpcji na energii użytkowej do ogrzewania i wentylacji w strefie ogrzewanej analizowanego budynku. Należy przypuszczać, że niniejsze badania pozwolą na rozwój metody LCA i generatywnego podejścia analiz środowiskowych budynków.

## 2. METODY I MATERIAŁY

Metoda analityczna – w pracy posłużono się metodą Oceny Cyklu Życia (ang. *Life Cycle Assessment* - LCA), do tego celu wykorzystano deklaracje środowiskowe produktów (ang. *Environmental Product Declaration* - EPD) i dokonano obliczeń przy użyciu przygotowanego arkusza kalkulacyjnego. Wybór przykładów do obliczeń dokonano z uwagi na pozyskane informacje materiałowe.

Kwerenda literatury – dokonano przeglądu literatury przedmiotu związanej z obszarem badań.

Badania ograniczono do analizy domu jednorodzinnego w trzech wariantach materiałowych i ich konsumpcji energetycznej MJ, generujących emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery. Ponadto, badania powinny pokazać możliwości obliczeniowe emisji zanieczyszczeń umożliwiając późniejszą minimalizację i kontrolę (przy wykorzystaniu proponowanego 'mechanizmu klosza') (Gradziński 2022) negatywnego wpływu rozwiązań na środowisko przyrodnicze w procesie projektowym architektury.

## 3. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU EKOLOGICZNEGO W PROCESIE PROJEKTOWANIA

Człowiek obecnie kładzie nacisk na minimalizację wpływu na środowisko. Z punktu widzenia procesu projektowego, projektanci muszą sprostać niełatwemu zadaniu i przestrzegać ustalonych norm oraz potrzeb klientów. Patrząc przez pryzmat ogólnej korzyści dla ludzkości i biorąc pod uwagę emisję gazów cieplarnianych, odpady, zużywanie nieodnawialnych źródeł materii i źródeł energii, dochodzi się do jednego wniosku, że odciskają one negatywny ślad na środowisku przyrodniczym, co w konsekwencji powinno prowadzić do odnalezienia konkretnych środków zaradczych (Fig. 1. Impact and Consequences of Climate Change in the European Union. The report is based on indicators EEA(2012). Source: EEA (SOER 2015), adapted from 'Urban adaptation to climate change in Europe,' EEA Report No 2/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Author's translation.

Ryc. 1).

Zauważyć należy, że rozważania różnych środowisk naukowych wskazują 'pewne' ograniczenia środowiskowe wynikające z absorpcji 'naszej' planety ujmując to jako odkrywanie bezpiecznej przestrzeni operacyjnej dla ludzkości (Rockström i in. 2009a). Johan Rockström i in. (Rockström i in. 2009b) określają bariery stosując następujące kategorie (Tab. 1).

Komisja Europejska, wskazując na fakt, że: *budynki są odpowiedzialne za 40% zużycia energii oraz 36% emisji CO<sub>2</sub> w UE rocznie. Choć nowe budynki na ogół potrzebują trzy do pięciu litrów oleju opałowego na metr kwadratowy rocznie. Starsze budynki zużywają średnio około 25 litrów/m<sup>2</sup>, a niektóre budynki wymagają nawet do 60 litrów/m<sup>2</sup>. Obecnie około 35% budynków w UE liczy ponad 50 lat. Poprzez poprawę efektywności energetycznej budynków, możliwe jest zmniejszenie zużycia energii w UE o 5% do 6% i obniżenie emisji CO<sub>2</sub> o około 5%.* (EU Commission 2020).

Ponadto, należy zauważyć że wszystkie wyroby potrzebują określonych nakładów energetycznych, które tworzą konkretną wartość energochłonną (Bałandynowicz 1983), materiałochłonną oraz odpadową – emisyjną. Istniejące narzędzia i metody ocen ekologicznych, wskazują negatywne i pozytywne wpływy na środowisko przyrodnicze z działalności, procesów, jak również produktów. Szeereg ocen, analiz, i metod scharakteryzować można na zasadzie analizowania pod względem wejść i wyjść elementów zawartych w cyklu życia. Późniejsze interpretacje nie mogą być analizowane



jednopłaszczyznowo, lecz wielokryterialnie dając kilka wariantów pomocnych do sformułowania prawidłowych wniosków i schematów działania.

### 3.1. Negatywne cechy oddziaływania budownictwa jednorodzinnego na środowisko przyrodnicze

Współcześnie budowa domu powoduje w dużej mierze określoną ilość negatywnego oddziaływania ( $\text{CO}_2$ ) oraz konsumpcji: materiałów, energii, wody, i pozostałych surowców naturalnych. Należy zwrócić uwagę, że w kontekście pro-środowiskowym domy jednorodzinne wydają się bardziej energochłonne czy materiałochłonne, ale również wskazuje się nieekonomiczny rozwój przedmieść m.in. z uwagi na wyposażenie w infrastrukturę techniczną. Założyć należy konieczność podejmowania zrównoważonych decyzji projektowych mających na celu zminimalizowanie oddziaływania budynku w cyklu jego istnienia na ekosystem. Projektowanie i budowanie, m.in. domów jednorodzinnych, prowadzić powinno do poszukiwania rozwiązań w sferze budynków: energooszczędnych, niskoenergetycznych i proekologicznych. Obiekty takie systematyzuje się jako budynki: inteligentne, niskoemisyjne  $\text{CO}_2$ , pasywne, zero lub plus energetyczne, które charakteryzuje całościowe podejście cyklu życia budynku (Przesmycka 2012), (Czarnecki, Rytel 2013, s.11-20).

Do określenia wpływu zabudowy jednorodzinnej na środowisko istotne jest wskazanie energochłonności w cyklu życia budynków, by poznać ich pełny wpływ na środowisko. Sarosiek i Sadowskiej (2009) charakteryzują zmianę szacunkowych wartości wskaźnika zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania na przestrzeni lat, wskazując, na fakt że *jeśli całkowitą energię zużywaną na cały cykl życia uznamy za 100%, to wytwarzanie materiałów i wzniesienie budynku stanowi 10-12%, remonty i rozbiórka ok. 5%, natomiast użytkowanie to aż 83-85% tej energii* (Sarosiek, Sadowska 2009, s.77).

Węglarz (Węglarz 2014) wskazuje średnie zapotrzebowanie na ciepło (energię użytkową, w których eksperci uwzględnili powierzchnię przegród zewnętrznych i ustandaryzowane zapotrzebowania na energię) dla modelowych budynków, określając:

1. Jednorodzinny budynek mieszkalny wolnostojący 216  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ .
2. Jednorodzinny budynek mieszkalny bliźniaczy 186  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ .
3. Jednorodzinny budynek mieszkalny w zabudowie szeregowej 150  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ .

Natomiast, według Stowarzyszenia na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju konsumpcja energii na ogrzewanie nie powinna przekraczać określonych limitów, jak wynika z klasyfikacji energetycznej budynków (Żurawski 2013) oraz zgodnie z poziomem aktualnych norm.

Budownictwo proekologiczne rozwija się w szybkim tempie, co wpływa na ciągłą potrzebę aktualizacji danych. Analizując powyższe zestawienia klas, ocen, klasyfikacji energetycznej budynków pod względem wskaźników sezonowego zapotrzebowania na ciepło i okres budowy, dokonano klasyfikacji w grupach (Tab. 2).

Tab. 2. Podział i klasyfikacja energetyczna budynków. Opracowanie autora na podstawie tabel: Sarosiek, Sadowska (2009), Żurawski (2013).

#### PODZIAŁ I KLASYFIKACJA ENERGETYCZNA BUDYŃKÓW

Klasa energetyczna	Ocena energetyczna	Wskaźnik E ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{rok}$ )	Okres Budowy
H	Budynki wysoko energochłonne (niepoddawane termomodernizacji)	$E > 250$	do 1982
G	Budynki energochłonne (wielkopłytowe i tradycyjnie wznoszone)	$150 < E < 250$	1983 - 1998
F	Budynki średnio energochłonne (systemowe i tradycyjne)	$100 < E < 150$	
E	Budynki średnio energooszczędne (jednorodzinne i wielorodzinne oraz poddane termomodernizacji)	$80 < E < 100$	1999 - 2009

**PODZIAŁ I KLASYFIKACJA ENERGETYCZNA BUDYNKÓW**

Klasa energetyczna	Ocena energetyczna	Wskaźnik E (kWh/m <sup>2</sup> /rok)	Okres Budowy
D	Budynki energooszczędne	45 < E < 80	
C	Budynki niskoenergetyczne	15 < E < 45	
B	Budynki pasywne	E ≤ 15	2010 – 2020 (DPEiR 2010)
A	Budynki (niemal) zeroenergetyczne	E ±0	
A+	Budynki zero i plus energetyczne	0+E	od 2021
A++	Budynki zrównoważone (produkujące energię, wykorzystujące LCA)	+E + LCA	

Wskazuje się, że ważnym elementem w certyfikowaniu energetycznym budynków jest stosowany dla energii elektrycznej wskaźnik emisji CO<sub>2</sub>. Według KOBIZE - Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE), referencyjny wskaźnik jednostkowej emisyjności dwutlenku węgla przy produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2021 roku (dla odbiorców końcowych energii elektrycznej) wyniósł 708 kgCO<sub>2</sub>/MWh, lub 0,708 kgCO<sub>2</sub>/kWh (w 2020 było to 698 kgCO<sub>2</sub>/MWh).

Kolejnym aspektem jest wieloaspektowość oceny materiałów budowlanych. Należy zauważyć, że materiały użyte do powstawania obiektu architektonicznego przechodzą określoną drogę, którą poddaje się analizie od pozyskania surowców i ich przetwarzania > proces produkcji materiałów potrzebnych do produkcji końcowego wyrobu > dystrybucję i transport materiału > budowę obiektu > użytkowanie obiektu > do rozbiórki obiektu = recyklingu odpadów rozbiórkowych, czy składowania na wysypisku. W tradycyjnych procesach produkcji materiałów wykorzystuje się zasoby naturalne. Zużycie energii do produkcji materiałów budowlanych jest ściśle powiązane z emisją dwutlenku węgla (Milne, Reardon 2008). Według badań Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) energia zainwestowana (wbudowana) w materiały zastosowana do budowy przeciętnego gospodarstwa domowego jest równa ekwiwalentowi zużycia energii użytkowej dla potrzeb: ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia, wyposażenia i urządzeń w tym gospodarstwie w okresie około 15 lat (Lancaster 2012). Dlatego ważny jest świadomy dobór materiałów, które w trakcie czy również po zakończeniu użytkowania budynku zostaną poddane ponownemu użyciu, recyklingowi, ewentualnemu składowaniu na wysypisku. Świadomość takiej kolejności zdarzeń jest ważna z punktu widzenia metod ekologicznych w tym metody LCA, gdyż minimalizuje wpływ na środowisko dzięki świadomemu doborowi i konsekwencji w zastosowaniu materiałów budowlanych w strukturze budynku, co odgrywa istotną rolę w idei zrównoważonego rozwoju<sup>5</sup>.

Wieloaspektowość wyrobów budowlanych sprowadza się zatem do ich charakterystyki energetyczno-ekologicznej. Charakterystyka ta zamknięta w LCA - Analizie Cyklu Życia oraz całościowej Ocenie Cyklu Życia, materiału zawiera się w publikowanych danych deklaracji środowiskowych produktów EPD (ang. *Environmental Product Declaration*)<sup>6</sup>. Opis prawdopodobnych zdarzeń przed, w trakcie, i po cyklu życia materiału wskazuje szacunkowy wpływ na środowisko. W konsekwencji umożliwia to nałożenie pewnych ograniczeń w intensywności śladu ekologicznego.

Przedstawione ramowe analizy należy traktować jako wyznacznik dla wyrażenia głównie negatywnego oddziaływania środowiskowego budynków w przyszłości, a optymistycznie warto dopuścić pozytywne oddziaływanie na środowisko badanej zabudowy. W badaniu przyjęto ocenę energetyczną na poziomie minimum domów energooszczędnych (klasa D). Z uwagi na uszczegółowienie wymagań w celu spełnienia postanowień, art. 5, ustawy Prawo budowlane – rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki oraz ich usytuowanie (Wa-

<sup>5</sup> Na przestrzeni 100 lat ilość surowców zużytych do produkcji materiałów na terenie USA wzrosła z 161 mln ton w 1900 roku do 2,8 mld ton w 1995 roku. Materiały budowlane stanowią około 75% spośród zużywających energię, a jedynie 8% z nich zostało uznane za odnawialne (Matos, Wagner 1998).

<sup>6</sup> Należy zauważyć, że EPD specyfikowane są przez niezależne jednostki badawcze np. Eco-Platform. Najczęściej deklaracje obejmują ograniczony zakres określający oddziaływanie produktu na środowisko w modułach, na przykład obowiązkowy jest etap wyrobu produktu (A1-A3).

runki Techniczne), wskazuje się na cząstkowe maksymalne wartości wskaźnika  $EP_{H+W}$  [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)] na potrzeby ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla domu jednorodzinnego<sup>7</sup>. Kształtujących się następująco: od 2014r. 120kWh/(m<sup>2</sup>·rok), od 2017r. 95kWh/(m<sup>2</sup>·rok), od 2021r. 70kWh/(m<sup>2</sup>·rok).

#### 4. CHARAKTERYSTYKA OGRANICZENIA NEGATYWNEGO WPLYWU BUDYNKU NA ŚRODOWISKO NATURALNE W ZADANYM OBSZARZE

Badanie charakterystyki negatywnego wpływu na środowisko przez budynki jednorodzinne w zadanym obszarze, możliwe jest przez:

- (1) określenie czasu ich budowy, co następnie wpływa na oszacowanie zapotrzebowania energetycznego [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)], i wskazuje materiały występujące w strukturze budynku w okresie powstania budynku, spełniające wartość współczynnika przenikalności cieplnej „U” [W/(m<sup>2</sup>·K)]
- (2) określenie ekwiwalentu wpływów na środowisko projektowanego i wybudowanego budynku (Ekwiwalent energetyczny budynku:  $E_{sbe}$  wyrażony w wartości kWh, oraz ekwiwalent środowiskowy budynku:  $E_{sb}$  wyrażony w wartości kgCO<sub>2</sub>), przez zastosowane materiały (wykorzystując metodę Analizy Cyklu Życia,  $U_m$ ) oraz zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji w strefie ogrzewanej (korzystając z charakterystyki energetycznej, analizy narzędzi cyfrowych,  $Q_u$ ) analizowanego budynku. Opisać tę analizę można według zaproponowanego przez autora- poniższego wzoru:

$$E_{sbe}kWh = \sum U_{me} + \sum Q_{ue}$$

$$E_{sb}kgCO_2 = \sum U_m + \sum Q_u$$

gdzie:

$\sum U_m$  – to suma współczynników przenikalności cieplnej budynku [W/(m<sup>2</sup>·K)], przegród zewnętrznych budynku określająca zastosowane materiały oraz ich ekwiwalent wpływu na środowisko (wynikający z zawartych w EPD analiz cyklu życia materiałów), [kWh/rok] = suma struktur (w obliczeniach z EPD) wyrażona w MJ następnie zamieniona na kWh (podzielono przez liczbę lat planowanego istnienia (cyklu życia) budynku).

$$U_{1m+2m+\dots+m}=(MJ / x \text{ lat}) * 0,277 \ 777 \ 777 \ 8 \ (\text{kWh})$$

$$1MJ=0,277 \ 777 \ 777 \ 8 \ \text{kWh}$$

$$1kWh=3,6MJ$$

oraz jako suma wszystkich struktur (ilości obliczeniowe wynikające z sumy w zawartych, w EPD Oceny Cyklu Życia -LCA- materiału) GWP = *Global Warming Potential* [kgCO<sub>2</sub>-Eq].

$\sum Q_{ue}$  – suma rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji w strefie ogrzewanej budynku - [kWh/rok] pomnożona przez obowiązujący wskaźnik emisyjności (kgCO<sub>2</sub>/kWh).

$\sum Q_u = Q_u \ 0,708 \ \text{kgCO}_2/\text{kWh}$  (wartość ta jest podana jedynie dla poniższych obliczeń wskaźnik KOBIZE należy zmieniać na zastosowaną jednostkę cieplną).

W ten sposób opisywane elementy, określają obliczeniowy charakter ilości substancji w banku materii. Jednocześnie wskazując pełne spektrum informacji o budynkach oraz możliwość oszacowania limitu emisji śladu ekologicznego dla obszaru w kontekście już istniejącej oraz projektowanej materii wbudowanej. Wskazuje się na ‘mechanizm klosza’, jako limit śladu ekologicznego dla architektury budynku jednorodzinnego na danym terenie (Gradziński 2022) (Ryc. 2).

<sup>7</sup> Uchwała Nr 91 RADY MINISTRÓW z dnia 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia *Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii*.

Należy wskazać, że mechanizm klosza (*ang. Bubbles*) wprowadzony jest obecnie w sektorach przedsiębiorstw, zakładów produkcyjnych, który polega na określeniu maksymalnego poziomu emisji zanieczyszczeń oraz ich możliwego handlu nadwyżkami w trzech systemach. Handel oraz ograniczenie emisji (*ang. Cap and Trade*) w ustalonym sektorze osiągany jest za pomocą określenia całkowitego limitu emisji (*cap*) i działa w dwóch płaszczyznach *upstream* (na poziomie producentów), *downstream* (w miejscu emisji) (Gradziński 2022, s.97). Kierunek rozważań względem prowadzenia mechanizmu klosza do procesu projektowego architektury, powinien umożliwić kontrolę oraz określenie minimalnego i maksymalnego oddziaływania (negatywnego lub pozytywnego) obiektów na danym obszarze. Prowadzić to powinno do ukierunkowanego ograniczenia i koordynacji w handlu emisjami pomiędzy obszarami podobnie jak to ma miejsce w obecnych systemach sektorów przedsiębiorstw.

W badaniu przyjęto metodę obliczeniową uwzględniającą podział budynków według:

- 1) liczby obiektów wybudowanych w określonym czasie,
- 2) określenia ich zapotrzebowania energetycznego (kWh/m<sup>2</sup>/r),
- 3) wskazania danego czasu budowy i zastosowanych materiałów w strukturze budynku (kgCO<sub>2</sub>).

W wyniku tego możliwe jest oszacowanie wpływu na środowisko (kgCO<sub>2</sub>/kWh) całkowitej struktury materialnej budynków wzniesionych na danym obszarze określając ich limit śladu ekologicznego na zamkniętym terenie.

Poniżej obliczono wpływ zabudowy jednorodzinnej na środowisko pod względem: liczby wzniesionych budynków (GUS), w określonych przedziałach czasowych przypadających na okres ich wzniesienia i wynikające z tego zapotrzebowanie na ciepło charakteryzując ekwiwalent emisyjności dwutlenku węgla (KOBIZE, 2014-2022):

2014-2016 - liczba wzniesionych budynków (budynki indywidualne)  $E = 213\,966 \times$  średnia powierzchnia użytkowa  $137\,m^2 = 29\,285\,948m^2$  (łączna powierzchnia użytkowa).

Zapotrzebowanie na ciepło  $120 > E > 95$  (kWh/m<sup>2</sup>/r)

$$3\,514\,313\,760,0 < E_{sbe} \text{ kWh} < 2\,782\,165\,060,0$$

Referencyjny wskaźnik jednostkowej emisyjności dwutlenku węgla przy produkcji energii elektrycznej w Polsce  $0,781 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$  (KOBIZE, 2016)

$$2\,744\,679\,046,6 \text{ kgCO}_2/\text{r} < E_{sb} \text{ kgCO}_2 < 2\,172\,870\,911,9$$

2017-2022 - liczba wzniesionych budynków (budynki indywidualne)  $E = 560\,501 \times$  średnia powierzchnia użytkowa  $142,7m^2 = 79\,983\,492,7m^2$  (łączna powierzchnia użytkowa).

Zapotrzebowanie na ciepło  $95 > E > 70$  (kWh/m<sup>2</sup>/r)

$$7\,598\,431\,806,5 < E_{sbe} \text{ kWh} < 5\,598\,844\,489,0$$

Referencyjny wskaźnik jednostkowej emisyjności dwutlenku węgla przy produkcji energii elektrycznej w Polsce  $0,708 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$  (KOBIZE, 2022)

$$5\,379\,689\,718,6 < E_{sb} \text{ kgCO}_2 < 3\,963\,981\,898,2$$

Należy przypuszczać, że w przedziale czasowym od 2014 do 2022 roku zapotrzebowanie na ciepło wzniesionych budynków (budynki indywidualne) wyniosło:  $11\,112\,745\,566,5 < E_{sbe} \text{ kWh} < 8\,381\,009\,549,0$  oraz oddały one do atmosfery określoną ilość dwutlenku węgla przy produkcji energii elektrycznej, tj.:  $8\,124\,368\,765,2 < E_{ek} \text{ kgCO}_2 < 6\,136\,852\,810,1$ .

#### 4.1. Analiza metodą LCA oraz zapotrzebowania energetycznego na przykładzie trzech rozwiązań materiałowych

Analizie i Ocenie Cyklu Życia pod względem wpływu na środowisko przyrodnicze został poddany budynek z trzema rozwiązaniami materiałowymi<sup>8</sup>. Korzystając z Deklaracji Środowiskowych Produktów – EPD (ang. *Environmental Product Declaration*) uzyskano wyniki obliczeniowe wpływu materiałów budowlanych budynku na środowisko w pełnym zakładanym cyklu życia 100 lat (Żywotność Referencyjna - RSL (ang. *Reference Service Life*) przyjęta m.in. z uwagi na określenie możliwej ilości cykli zmian lub napraw wynikających z zastosowanych materiałów budowlanych). Oszacowano w ten sposób potencjalny wpływ materiałów budowlanych na środowisko przyrodnicze wynikający z całej struktury budynku. In this way, the potential environmental impact of building materials arising from the entire building structure was estimated. Do tego celu posłużono się następującymi miernikami: potencjał tworzenia efektu cieplarnianego - GWP (ang. *Global Warming Potential*), całkowite wykorzystanie nieodnawialnych zasobów energii pierwotnej - PENRT (ang. *Total use of non renewable primary energy resources*), całkowite wykorzystanie odnawialnych zasobów energii pierwotnej - PERT (ang. *Total use of renewable primary energy resources*).

Dodatkowo, obliczono sumę ekwiwalentu zapotrzebowania energetycznego (kWh/m<sup>2</sup>/r) analizowanych budynków w założonym przedziale czasowym 100 lat. Badanie charakterystyki negatywnego wpływu na środowisko przez budynki jednorodzinne w zadanym obszarze, możliwe jest przez zastosowane materiały występujące w strukturze budynku w okresie powstania budynku, spełniające wartość współczynnika przenikalności cieplnej „U” [W/(m<sup>2</sup>\*K)], by następnie oszacować zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji w strefie ogrzewanej analizowanego budynku wyrażony w wartości kWh/rok, oraz ekwiwalent środowiskowy budynku wyrażony w wartości kgCO<sub>2</sub>/rok. Otrzymując wyniki oszacowano wpływ na środowisko (kgCO<sub>2</sub>/kWh) całkowitej struktury materialnej budynków. Do celów badań posłużono się przykładem bazowym, tj. budynkiem z 1933 roku (ryc. 3).

W pierwszym badaniu użyto oryginalnych danych materiałowych, w drugim badaniu, zmieniono materiały budowlane, tak aby spełniały parametry współczynnika przenikalności cieplnej „U” określone w Warunkach Technicznych, w trzecim przypadku przebadany został budynek wzniesiony w technologii szkieletowej drewnianej. We wszystkich badaniach obliczono przy pomocy LCA wpływ na środowisko użytych materiałów oraz zapotrzebowanie energetyczne (współczynnik przenikalności cieplnej „U” obliczono według zastosowanych materiałów budowlanych). Badania wykonano w założonym 100 letnim cyklu (Tab. 3).

Tab. 3. Wpływ materiałów budowlanych na środowisko w pełnym cyklu życia oraz zapotrzebowanie energetyczne budynku (pow. 160m<sup>2</sup>, 294,1 kWh/m<sup>2</sup>/r) na środowisko w pełnym cyklu życia. Opracowanie autora.

	Wpływ materiałów budowlanych na środowisko w pełnym cyklu życia (100 lat)		Zapotrzebowanie energetyczne budynku (pow. 160m <sup>2</sup> , 294,1 kWh/m <sup>2</sup> /r) na środowisko w pełnym cyklu życia (100 lat)					
	PENRT + PERT MJ	GWP kgCO <sub>2</sub> -eQ.	Roczne zap. energetyczne kWh/m <sup>2</sup> /r	Pow. m <sup>2</sup>	Czas (lata)	kWh	PENRT MJ	GWP kgCO <sub>2</sub> -eQ.
1	605 009,7 + 86 731,7 <b>RAZEM 691 741,5</b>	<b>41 885,6</b>	294,1	160	100	4 706 416	<b>16 943 097,6</b>	<b>3 755 720,0</b>
2	728 790,0 + 535 88,1 <b>RAZEM 782 378,1</b>	<b>776 79,3</b>	57,7	160	100	922 784	<b>3 322 022,4</b>	<b>736 381,6</b>
3	252 697,0 + 518 288,0 <b>RAZEM 770 979,0</b>	<b>-6 241,9</b>	63,5	160	100	1 016 096	<b>3 657 945,6</b>	<b>810 844,6</b>

<sup>8</sup> Autor przygotował własny arkusz kalkulacyjny dla zachowania wiarygodności obliczeń, ponieważ darmowe oprogramowanie LCA udostępnia i umożliwia obliczenia według wartości szacunkowych lub ujednoliconych. Dlatego aby mieć rzeczywiste wartości produktów posłużono się konkretnymi deklaracjami środowiskowymi produktów (EPD) z platform internetowych: Źródło: EPD Portal, knaufinsulation, EPD - Online, IBU

Poniżej porównano wpływ materiałów na środowisko i związany z tym poziom emisji CO<sub>2</sub> - Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) i zużycia: całkowitego wykorzystania nieodnawialnych zasobów energii pierwotnej (PENRT), oraz całkowitego wykorzystania odnawialnych zasobów energii pierwotnej (PERT), tj. PENRT+PERT pomiędzy materiałami zastosowanymi w strukturze i użytkowaniem budynku (w przedziale czasowym 100 lat) (ryc. 4, 5, 6, 7).

Wyniki analiz obrazują ilość niezbędnej energii elektrycznej i generowanego dwutlenku węgla do atmosfery przy wytworzeniu materiałów budowlanych oraz ilość niezbędnej energii i generowanego dwutlenku węgla do funkcjonowania budynku w całym stu letnim cyklu życia. Poniżej przedstawiono sumaryczne zestawienia wpływów na środowisko, tj.: ekwiwalent energetyczny budynku:  $E_{sbe}$  (kWh), ekwiwalent środowiskowy budynku:  $E_{sb}$  (kgCO<sub>2</sub>), oraz ich procentowy udział:

Przedstawione wyniki analiz wykazały, że najlepszym pod względem generowania CO<sub>2</sub> oraz konsumpcji energetycznej jest przykład 3 - dom jednorodzinny w drewnianej technologii wznoszenia. Natomiast, niewiele gorszym jest przykład 2 - dom jednorodzinny w tradycyjnej technologii wznoszenia a zauważalnie najgorszym przykład 1 - dom jednorodzinny z 1933 roku. Umożliwia to świadomy wybór najlepszego rozwiązania oraz pro-środowiskową kontrolę i optymalizację rozwiązań np. materiałowych w strukturze projektowanego budynku już na wczesnym etapie projektowym.

## 5. DYSKUSJA

### Kontrola architektury w erze antropocenu

Zauważalny problem wpływu „ślądu” jaki pozostawia budynek w środowisku, dotyczy obecnie przedmiotu (architektury) oraz podmiotu (architekta, użytkownika) odpowiedzialnych za proces i rozwiązania formalne. Niewątpliwie jest to pole do ciągłego dyskursu nad kształtowaniem pro i ekologicznego budynku w świetle zasad zrównoważonego rozwoju. Warto zwrócić uwagę, że terminy: środowisko naturalne i środowisko przyrodnicze traktuje się na równi przyjmując, że są one synonimami. Należy zauważyć, że środowisko naturalne jest w literaturze przedmiotu środowiskiem, które zostało w pewien sposób przetworzone przez człowieka, natomiast środowisko przyrodnicze ekosystemem bez ingerencji człowieka – należą do niego m.in. Parki Narodowe.

Obawy dotyczące negatywnego oddziaływania na środowisko, ukierunkowały poszukiwania badawcze mające na celu ograniczenie zużycia, konsumpcji, i emisji, m.in: materiałów, energii, i odpadów. Na początku lat 60-tych, XX wieku wywołały zainteresowanie w poszukiwaniu sposobów określenia drogi jaką dany produkt pokonuje w czasie swojego istnienia, to jest pełnym cyklu życia. Wykształciła się wtedy metoda inwentaryzacji cyklu życia, którą przedstawił Harold Smith na World Energy Conference w 1963 roku. W późniejszych latach problem odpadów i skażenia środowiska stał się znamienny by od późnych lat 80-tych i wczesnych lat 90-tych dopracowano metodę Analizy i Oceny Cyklu Życia, która stała się metodą marketingową w odróżnieniu do realnej możliwości metody obliczeniowej jaką umożliwia. Zauważalne było, że na przestrzeni wieków relacja człowiek – przyroda kształtowała się pod wyraźnym wpływem antropocentrycznego wzoru (Goldsmith 1972). Wzrastająca na świecie urbanizacja (Meadows i in. 1972) odciskała piętno na środowisku, czego efektem jest obecnie globalne ocieplenie i zmiany klimatu – o czym informują coroczne raporty IPCC (ang. *The Intergovernmental Panel on Climate Change*) oraz EEA (ang. *European Environment Agency*). Naukowe podejście w kwestii zmian klimatycznych spotkało się z różnego rodzaju społeczną negacją lub zaprzeczeniem. Ogólne zjawisko kontrowersji ekosceptyzmu, kształtuje negacjonizm w zaprzeczający globalnemu ociepleniu, tym samym określa się denializm klimatyczny, denializm globalnego ocieplenia, oraz negacjonizm klimatyczny (hasło: Zaprzeczanie globalnemu ociepleniu). Należy wykazać, że powstało wiele publikacji naukowych w zakresie badań nad oddziaływaniem architektury na środowisko względem zrównoważonego rozwoju. Nazwa Antropocen została zaproponowana w 2000 roku przez Eugene Stoermer i Paul Crutzen jako nowa epoka geologiczna kończąca trwającą oficjalnie epokę geologiczną polodowcową *holocenu*. Podobnie jak wykazał Rockström i in. (Rockström i in. 2009 a, b) Stoermer i Crutzen wskazali, że zaszła już znaczna ingerencja działań człowieka na ekosystemy, atmosferę w skali globalnej geologii i ekologii planety co wymusiło potrzebę (według autorów) zmiany w nazewnictwie epok.

Obecnie kładzie się nacisk na oszczędzanie energii, a to zmienia środowisko zbudowane w istotny problem. Warto w tym miejscu ustosunkować się na dyskusyjne podejście w kontekście oddziaływania na klimat. W publikacjach opisuje się w szeroki sposób metody, analizy, standardy i wpływ na środowisko naturalne obiektów budowlanych oraz zasady, działania określające ocenę jakości środowiska zbudowanego w stosunku do założeń idei zrównoważonego rozwoju. Na przykład, Baranowski w publikacji z 1998 roku opisuje możliwość określenia całościowej teorii i metodologii wynikających z założeń zrównoważonego rozwoju, podobnie rozwijanie ocen jakości, wdrażania i strategii dla budownictwa przez: Niezabitowską, Masły (2007), Stawicką-Wałkowską (2001), Kamionkę (2012), oraz dematerializacja architektury, którą proponuje Świątek (2015). Z kolei, publikacje Adamczyka (2004), Górczyńskiego (2007), Johns, i in. (2009), Barańskiego, i in. (2011), Bayer, i in. (2010) charakteryzują zastosowanie metody LCA i wpływu budynków na środowisko, ale również wariantową selekcję materiałów budowlanych potrzebnych do wznoszenia obiektów budowlanych. Projektant w procesie projektowym musi wybrać wiele alternatywnych opcji, poddając w wątpliwość ostateczny rezultat, za każdym razem dążąc do poprawy jakości życia przez optymalizację projektu. Wskazuje się zatem rozwiązania, analizy i oceny cykli życia umożliwiające badanie: konsumpcji energii (MJ), generowania dwutlenku węgla do atmosfery (GWP) od wytworzenia aż do demontażu i ponownego użycia materiału.

W świetle rozważań przedstawionych w artykule wydaje się zasadne podjęcie dalszych prób w określeniu wpływu z minimalizacji i kontroli dwóch kluczowych aspektów materii i energii na estetykę architektury np. domu jednorodzinnego. Właściwy wydaje się kierunek dotyczący odpowiedniego doboru materiałów budowlanych (określając ich cechy jako: trwałe, ekologiczne, o niskim współczynniku oddziaływania na środowisko; zakładających, że dają się w łatwy sposób demontować, uwzględniają niski współczynnik wbudowanego CO<sub>2</sub>) oraz zapotrzebowania energetycznego w pełnym cyklu życia budynku. Budynki, które powinny spełniać m.in. zasady: 4R, projektowania dla dekonstrukcji (ang. *design for deconstruction*), formułując dążenia do projektowania regeneratywnego (ang. *regenerative design*) w erze antropogenu.

## 6. WNIOSKI

Przedstawione wyniki z przeprowadzonej Analizy i Oceny Cyklu Życia trzech typów rozwiązań materiałowych budynku opisują wpływ na środowisko naturalne pod względem: użytych materiałów w strukturze budynku oraz zapotrzebowania energetycznego do jego funkcjonowania. Wskazuje się poprzez to dążenie do kontroli w minimalizacji oddziaływania architektury na środowisko naturalne. Zmiany materiałowe i energetyczne wpływają na ekologiczny wymiar budynku. Wykazano, że dwoma istotnymi elementami oddziałującymi na ekosystem są: zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do prawidłowego funkcjonowania budynku tj. energia potrzebna do ogrzania budynku oraz wytworzenia materiałów budowlanych. Uznaje się, że minimalizacja i optymalizacja tych dwóch elementów powinna mieć priorytetowe znaczenie w procesie projektowania regeneratywnego architektury. Zakłada się także, że architektura może nie tylko minimalizować negatywny wpływ na środowisko, ale także aktywnie przyczynić się do jego poprawy i regeneracji.

Należy stwierdzić, że opisany wpływ zabudowy jednorodzinnej na środowisko naturalne odnoszący się również do idei 'mechanizmu klosza', jako limitu śladu ekologicznego na danym terenie jest istotny w procesie projektowym architektury. Przedstawione wyniki badań analizujące relacje wpływu materiałów budowlanych, konsumpcji energii i ich emisji m.in. potencjalnego tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) są godne uwagi. Powinny być wprowadzone do procesu projektowego we wstępnym jego etapie, aby umożliwić kontrolę i minimalizację oddziaływania środowiska zbudowanego na środowisko naturalne i przyrodnicze.

## BIBLIOGRAPHY

- Adamczyk W. (2004) Ekologia wyrobów: jakość, cykl życia, projektowanie. Wydawnictwo PWE.
- Arvizu-Piña V.A., López J.F.A., González A.A.G., Alarcón I.G.B. (2023) *An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context. A screening LCA case study for a bioclimatic building.* Energy and Buildings, Volume 295, 113269. DOI:10.1016/j.enbuild.2023.113269.
- Bahramian M., Yetilmezsoy K. (2020) *Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018).* Energy and Buildings, Volume 219, 109917. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.109917
- Bałandynowicz H.W. (1983) *Energochłonność skumulowana.* PWN, Warszawa.
- Baranowski A. (1998) *Projektowanie zrównoważone w architekturze.* Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Seria Monografie, Gdańsk.
- Barański A., Gworek B., Bojanowicz-Bablok A. (2011) "Ocena cyklu życia: teoria i praktyka". IOŚ-PIB, Warszawa.
- Czarnecki M., Rytel G., *Zagadnienia ekologii i energooszczędności w architekturze – współczesne tendencje w projektowaniu domów jednorodzinnych,* ARCHITECTURAE et ARTIBUS - 4/2013, Białystok, pp.11-20.
- DPEiR 2010, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, s.L153/21
- EPD - Online. *Herzlich Willkommen bei EPD-Online, der Plattform zur EPD-Erstellung des Institut Bauen und Umwelt e. V.!* <http://www.epd-online.com> (Accessed: 01-07-2023)
- EPD Portal. The International EPD System. <http://www.environdec.com> (Accessed: 18-08-2023)
- EU Commission 2020, [online] [https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17\\_en](https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en) (Accessed: 01-07-2023).
- Famiglietti J., Madioum H. Motta M. (2023) *Developing a New Data-Driven LCA Tool at the Urban Scale: The Case of the Embodied Environmental Profile of the Building Sector.* Sustainability 15(15):1-31, DOI:10.3390/su151511518
- Goldsmith E., *The Ecologist: A Blueprint for Survival,* w: The Ecologist, Vol.2, No.1, 1972. Ecosystems Ltd.
- Górzyński J. (2007) *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów.* WNT, Warszawa.
- Gradziński P. (2022) *Minimization of the ecological footprint through the use of the bubbles mechanism in the architecture design process,* Space & Form | Przestrzen i Forma 52. <http://doi.org/10.21005/pif.2022.52.B-04>.
- GUS, [online] <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/dane/podgrup/wykres> (Accessed: 01-07-2023).
- Hollberg A., Ruth J. (2016) *LCA in architectural design—a parametric approach.* The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer. DOI:10.1007/s11367-016-1065-1
- IBU. The Institut Bauen und Umwelt e. V. <http://www.ibu-epd.com/> (dostęp: 01.07.2023)
- Johns S., Nebel B., Perez N., Buchanan A. (2009) *Environmental Impacts of Multi-Storey Buildings Using Different Construction Materials, Research Report 2008-02.* Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- Kamionka L.W. (2012) *Architektura zrównoważona i jej standardy na przykładzie wybranych metod oceny.* Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Knauf Insulation. SMART INSULATION SOLUTIONS AND SERVICES FOR A BETTER WORLD. <http://www.knaufinsulation.com/> (Accessed: 01-07-2023)
- KOBIZE, [online] <https://kobize.pl/pl/fileCategory/id/28/wskazniki-emisyjnosci> (Accessed: 01-07-2023).
- Longo S., Cellura M., Montana F., Birgisdottir H., Cusenza A.M., Frischknecht R. Guarino F., Hollberg A., Kiss B., Peuportier B., Sanseverino E.R., Szalay Z. (2023) *Life-cycle optimization of building performance: a collection of case studies.* International Energy Agency, treeze Ltd.. DOI:10.5281/zenodo.7468477
- Matos G., Wagner L., *Consumption of Materials in the United States, 1900–1995.* Annual Reviews of Energy and the Environment, vol. 23, 1998, pp.107-122
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. III, (1972) *The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.* Universe Books.
- Milne G., Reardon C., McGee C., Downton P. (2010) Your home technical guide, Embodied Energy, Commonwealth of Australia.
- Niezabitowskiej E., Masły D. (2007) *Oceny jakości środowiska zabudowanego i ich znaczenie dla rozwoju koncepcji budynku zrównoważonego.* Monografia, Gliwice.



- Roberts M., Allen S., Coley D. (2020) *Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review*, Building and Environment, Volume 185, 107274, DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107274.
- Rockström J., et.al. (2009) *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, Ecology and Society 14(2): 32. [online] [www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32](http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32) (Accessed: 01-07-2023)
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S.III, Lambin E. Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry W.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J. (2009) *A safe operating space for humanity*. NATURE [Vol 461] 24, Londyn: Macmillan Publishers Ltd, pp.472-475. DOI:10.1038/461472a
- Sarosiek W., Sadowska B., *Ekologiczne aspekty termomodernizacji wybranych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej*, Materiały Budowlane, 2009, pp.77.
- Stawicka-Wałkowska M. (2001) *Procesy wdrażania zrównoważonego rozwoju w budownictwie*. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa.
- Steve Lancaster S. (2012) *Green Australia: A Snapshot*. Wyd. Kent Town, S. Aust.: Wakefield Press.
- Stoermer E., Crutzen P., The “Anthropocene”, Global Change, NewsLetter, no.41, 2000, pp.17-18.
- Świątek L. (2015) *Dematerializacja w architekturze: imperatyw projektowania zrównoważonego*. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin.
- Weizsäcker von, C.F. (1978) *Jedność przyrody*. Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa.
- Węglarz A. (2014) *Strategia modernizacji budynków: mapa drogowa 2050*, Rozdział 3: Analiza potencjału termomodernizacji zasobów budowlanych w Polsce. Kraków.
- Żurawski J., *Efektywność energetyczna w budownictwie*, 2013. [online] <http://www.lex-bud.com.pl/pdfpliki/efektywnoscenergia.pdf> (Accessed: 01-07-2023)

## **AUTHOR'S NOTE**

Dr inż. arch. Piotr Gradziński, Assistant Professor at the West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Architecture, Department of Housing and Technical and Ecological Basics of Architecture. His academic interests concern architecture based on sustainable development principles with the application of life cycle analysis (LCA) and building information modelling (BIM) in regenerative design.

## **O AUTORZE**

Dr inż. arch. Piotr Gradziński, adiunkt w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie, Wydział Architektury, Katedra Mieszkalnictwa i Podstaw Techniczno-Ekologicznych Architektury. Zainteresowania naukowe dotyczą architektury opartej na zasadach zrównoważonego rozwoju z wykorzystaniem oceny cyklu życia (LCA) i modelowania informacji o budynku (BIM) w procesie projektowania regeneracyjnego architektury.

Contact | Kontakt: [piotr.gradzinski@zut.edu.pl](mailto:piotr.gradzinski@zut.edu.pl)