

dr inż. Joanna Sagan^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3116-0448

dr inż. Monika Górka-Stańczyk²⁾

ORCID: 0000-0002-5985-2078

Economic development priorities of the EU and research directions – analysis of convergence and challenges in the construction sector

Rozwój gospodarczy UE a kierunki badań naukowych – analiza konwergencji i wyzwania w sektorze budowlanym

DOI: 10.15199/33.2025.10.18

Abstract. The article analyzes the alignment between the strategic goals of the European Union, as outlined in the European Green Deal, and the directions of scientific research in the field of sustainable construction. A qualitative comparative analysis was conducted of EU strategic documents and scientific publications from the Scopus database (2020–2024). Using the VOSviewer tool, five main thematic research clusters were identified: building materials, energy efficiency of buildings, urban planning, environmental assessment, and social aspects. In the field of materials, research is dominated by efforts to reduce the environmental impact of concrete, the use of waste and natural materials, geopolymers, and phase change materials. Regarding buildings and their life cycle, the analysis focuses on energy efficiency, integration of renewable energy sources, and digitalization. In the area of urban planning, studies focus on mitigating the urban heat island effect and urban pollution island through the use of green infrastructure in buildings. The analysis showed a high level of alignment between research and EU priorities, but also highlighted the need for deeper and broader analyses, particularly in the social domain. A research gap was identified in relation to sustainable buildings for agriculture.

Keywords: European Green Deal; sustainable development; sustainable construction; scientific research.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano zgodność pomiędzy strategicznymi celami Unii Europejskiej, wynikającymi z Europejskiego Zielonego Ładu, a kierunkami badań naukowych dotyczących zrównoważonego budownictwa. Przeprowadzono jakościową analizę porównawczą dokumentów strategicznych UE i publikacji naukowych z bazy Scopus (2020–2024). Za pomocą narzędzia VOSviewer zidentyfikowano pięć głównych tematów badań: materiały budowlane; efektywność energetyczna budynków; urbanistyka; ocena środowiskowa oraz aspekty społeczne. W obszarze materiałów dominują badania nad ograniczaniem wpływu betonu na środowisko, wykorzystaniem odpadów i materiałów naturalnych, geopolimerami, czy materiałami zmienofazowymi. W przypadku budynków i ich cyklu życia, analiza koncentruje się na efektywności energetycznej budynków, integracji OZE i cyfryzacji. W obszarze urbanistyki prowadzone są badania dotyczące łagodzenia efektu miejskiej wyspy ciepła i miejskiej wyspy zanieczyszczenia przez zastosowanie zielonej infrastruktury budynków. Analiza wykazała dużą zgodność badań z unijnymi celami, ale wskazano potrzebę pogłębienia i poszerzenia analiz, szczególnie w obszarze społecznym. Wskazano lukę badawczą w odniesieniu do zrównoważonych budynków dla rolnictwa.

Słowa kluczowe: Europejski Zielony Ład; zrównoważony rozwój; zrównoważone budownictwo; badania naukowe.

The European Green Deal is a strategy to achieve net-zero greenhouse-gas emissions by 2050 while decoupling economic growth from the use of natural resources [1]. The construction sector plays a pivotal role in delivering the Green Deal because of its significant environmental footprint across the European Union. In particular, the sector [2]:

- consumes about 50% of all extracted raw materials;
- generates over 35% of total waste;
- accounts for 5–12% of total greenhouse-gas emissions when extraction of raw materials, production of building ma-

Europejski Zielony Ład to strategia zakładająca osiągnięcie zerowej emisji gazów cieplarnianych do 2050 r., przy jednoczesnym oddzieleniu wzrostu gospodarczego od wykorzystania zasobów naturalnych [1]. Sektor budowlany odgrywa kluczową rolę w realizacji założeń Europejskiego Zielonego Ładu, ponieważ istotnie wpływa na jakość środowiska naturalnego w UE [2], gdyż:

- zużywa ok. 50% wszystkich wydobywanych surowców;
- generuje ponad 35% całkowitej produkcji odpadów;
- emisja gazów cieplarnianych związana z wydobywaniem surowców, produkcją materiałów budowlanych oraz wznoszeniem i renowacją budynków wynosi 5–12% emisji ogółem.

Transformacja gospodarcza to globalne wyzwanie, które ma duży wpływ na budownictwo, zarówno w procesie pla-

¹⁾ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami

²⁾ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Ładowej

^{*)} Correspondence address: joanna.sagan@agh.edu.pl

terials, and the construction and renovation of buildings are taken together. This economic transformation is a global challenge with major implications for construction, from planning and delivery to operation and end-of-life. Scientific research is thus central – both to supporting innovative technologies and to assessing the impacts of the transition.

The main assumptions of the conducted analysis are the identification of key research areas, trends, and potential gaps in the literature on sustainable construction, with particular emphasis on buildings. The studies were directed toward this category due to the significant role that buildings play in shaping the environmental impact of the construction sector, both in terms of resource consumption and greenhouse-gas emissions.

Method

A qualitative comparative analysis was applied to assess the alignment between EU strategies and the directions of scientific research concerning sustainable construction. In the first stage, key EU documents were analyzed, including the European Green Deal [1] and related strategies such as the European Commission's Renovation Wave communication [3], the 2020 Circular Economy Action Plan [4], and the proposals of the *Fit for 55* package [5]. Next, a keyword analysis was conducted based on data from the Scopus database, covering 20,293 scientific articles in English published between 2020 and 2024 containing the phrase “sustainable” AND “buildings.” The data were analyzed using the VOSviewer tool, applying the Full Counting method and a threshold of at least ten keyword occurrences. The results were presented in the form of a co-occurrence map showing thematic research clusters. Finally, the identified research areas were compared with EU policy objectives.

EU Strategy for the Construction Sector

The European Green Deal aims to achieve climate neutrality by 2050 while reducing the consumption of natural resources [1]. Its goals also include protecting, preserving, and strengthening the EU's natural capital and ensuring citizens' health and well-being by eliminating environmental hazards and their negative effects. The European Commission recognizes digital technologies and their tools as key catalysts of transformation. They can accelerate and amplify the transition, including solutions such as artificial intelligence (AI), 5G networks, cloud computing, edge computing, and the Internet of Things (IoT). Digitalization also enables new possibilities for remote monitoring of air- and water-pollution, as well as monitoring and optimizing energy and natural-resource use. The economic development strategy and the EU's operational goals – in the broader context of digitalization and social justice – are shown in Figure 1.

Following this strategy, existing regulations have been revised and new EU laws have been introduced, translating the Green Deal's objectives into specific actions. Many detailed goals and initiatives directly concern construction or have

nowania, realizacji, jak i podczas użytkowania i likwidacji obiektu. Kluczową rolę w tym procesie odgrywają badania naukowe – zarówno we wspieraniu innowacyjnych technologii, jak i w analizie skutków wdrażanych zmian.

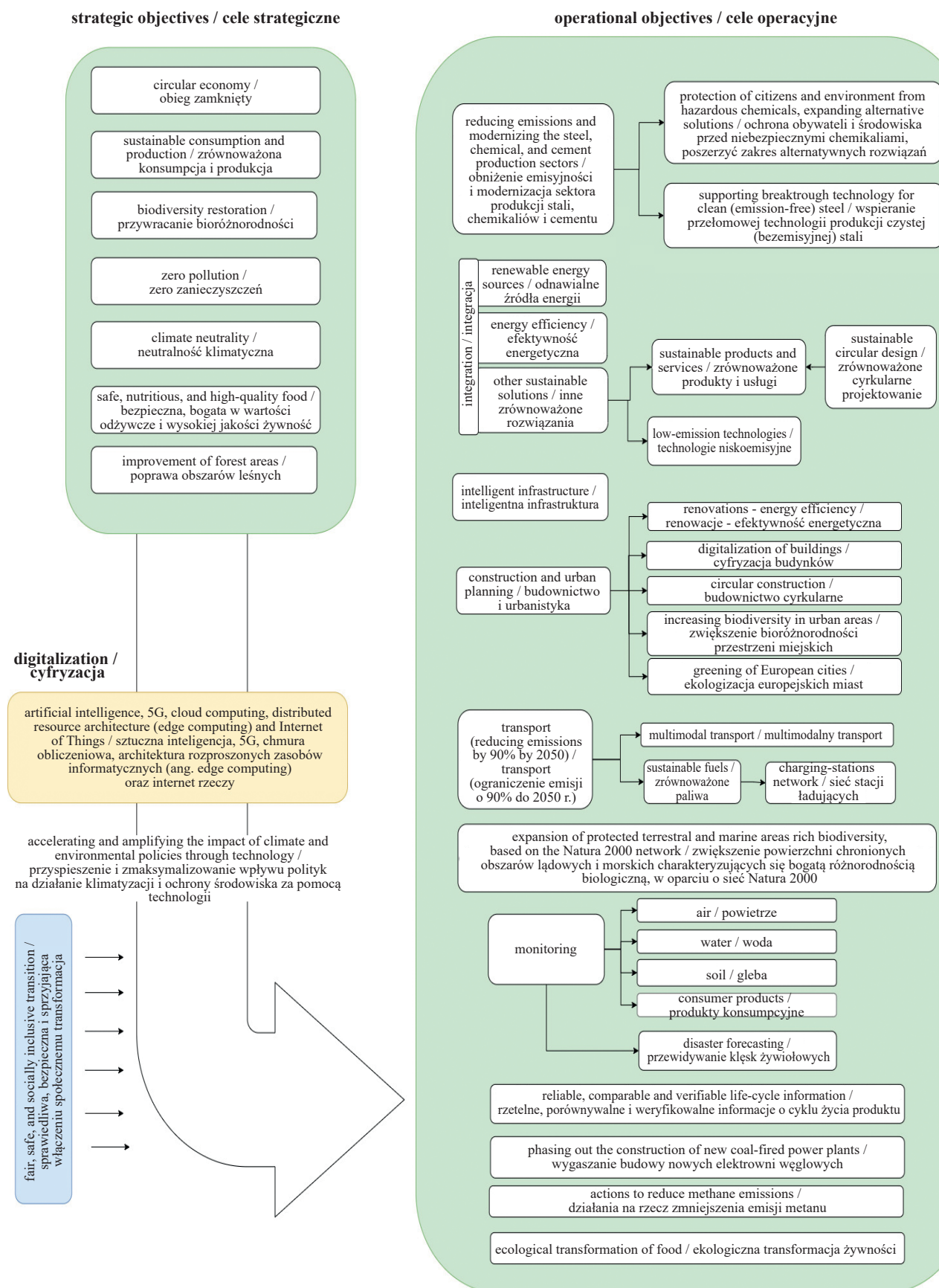
W artykule zaprezentowano zbieżność badań naukowych z kierunkiem wyznaczonym przez strategię Zielonego Ładu, a tym samym ocenę ich roli w kształtowaniu przyszłości zrównoważonego budownictwa. Główne założenia przeprowadzonej analizy to identyfikacja kluczowych obszarów badawczych, trendów oraz potencjalnych luk w literaturze dotyczącej zrównoważonego budownictwa, ze szczególnym uwzględnieniem budynków. Badania zostały ukierunkowane na tę kategorię ze względu na istotną rolę, jaką budynki odgrywają w kształtowaniu oddziaływania sektora budowlanego na środowisko, zarówno pod względem zużycia zasobów, jak i emisji gazów cieplarnianych.

Metoda badań

Zastosowano jakościową analizę porównawczą w celu oceny zgodności strategii UE z kierunkami badań naukowych dotyczących zrównoważonego budownictwa. W pierwszym etapie przeanalizowano kluczowe dokumenty unijne, takie jak Europejski Zielony Ład [1] oraz powiązane strategie, w tym komunikat komisji *Fala renowacji* [3], plan działania GOZ 2020 [4], propozycje pakietu *Fit for 55* [5]. Następnie przeprowadzono analizę słów kluczowych na podstawie danych z bazy Scopus, obejmujących 20 293 artykuły naukowe w języku angielskim opublikowane w latach 2020–2024, zawierające frazę „sustainable” AND „buildings”. Dane analizowano za pomocą narzędzia VOSviewer, stosując metodę Full Counting oraz próg co najmniej dziesięciu wystąpień słowa kluczowego. Wyniki przedstawiono w formie mapy współwystępowania, ukazującej tematyczne klastry badawcze. Ostatecznie zestawiono zidentyfikowane obszary badań z celami polityki UE.

Strategia EU dotycząca budownictwa

Europejski Zielony Ład zakłada osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia zasobów naturalnych [1]. Jej celem jest również ochrona, zachowanie i wzmocnienie kapitału naturalnego UE oraz zapewnienie zdrowia i dobrostanu obywateli przez eliminację zagrożeń środowiskowych i ich negatywnych skutków. Komisja Europejska uznaje technologie cyfrowe i ich narzędzia za kluczowy element transformacji (katalizatory zmian). Mogą one przyspieszyć i zmaksymalizować transformację, obejmując takie rozwiązania jak sztuczna inteligencja (Artificial Intelligence, AI), sieci piątej generacji (5G), przetwarzanie w chmurze (cloud computing), przetwarzanie brzegowe (edge computing) oraz Internet Rzeczy (Internet of Things, IoT). Cyfryzacja otwiera także nowe możliwości zdalnego monitorowania zanieczyszczenia wody i powietrza, a także monitorowania i optymalizacji wykorzystania energii oraz zasobów naturalnych. Strategia rozwoju gospodarczego i cele operacyjne UE, w szerszym kontekście cyfryzacji i sprawiedliwości społecznej, zostały przedstawione na rysunku. W ślad za tą strategią dostosowano istniejące i wdrożono



Economic development strategy and EU operational goals
Strategia rozwoju gospodarczego i cele operacyjne UE

Fig. authors
Rys. autorzy

a significant impact on the built environment. In 2020, the **Renovation Wave** initiative was launched, aiming to double annual renovation rates and modernize 35 million buildings by 2030 [3]. In 2021, the European Climate Law [6] established a legally binding target of reducing CO₂ emissions by 55% by 2030 and achieving climate neutrality by 2050. It was accompanied by the Fit for 55 legislative package, including revisions to the directives on energy efficiency and on the energy performance of buildings – highly relevant to the construction sector [6].

In 2022, the European Commission reviewed sectoral legislation and proposed a new Construction Products Regulation that integrates product sustainability, along with an update of the Waste Framework Directive to tighten recycling requirements for construction and demolition waste. Additional initiatives were launched to promote digitalization of construction (e.g., digital material passports) and to introduce the principle of accounting for the carbon footprint in public procurement [2]. Based on the above-mentioned documents, Table 1 groups the strategic objectives into thematic areas, forming the basis for further assessment of the alignment between scientific research and EU policy.

Due to the significant impact of this strategy on local economies and societies, an integral part of the European Green Deal is the **Just Transition Mechanism**, which aims to support communities most vulnerable to the effects of the changes being implemented. Through instruments such as the Just Transition Fund, the European Union supports the creation of new jobs, vocational training, improvement of building efficiency, combating energy poverty, and better and more affordable access to clean energy [7].

nowe przepisy w UE, które przekładają cele Zielonego Ładu na konkretne działania. Wiele celów szczegółowych oraz działań w ramach Zielonego Ładu bezpośrednio odnosi się do budownictwa lub ma na niego istotny wpływ. W 2020 r. ogłoszono inicjatywę **Fali renowacji** budynków, której celem jest podwojenie rocznego wskaźnika renowacji oraz modernizacja 35 mln budynków do 2030 r. [3]. Rok później uchwalono *Europejskie prawo klimatyczne* [6], ustanawiające prawnie wiążący cel redukcji emisji CO₂ o 55% do 2030 r. i neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz opracowano pakiet legislacyjny *Fit for 55*, obejmujący m.in. rewizję dyrektyw dotyczących efektywności energetycznej i charakterystyki energetycznej budynków, istotny dla sektora budowlanego [6].

Z kolei w 2022 r. Komisja Europejska dokonała przeglądu przepisów sektorowych, w efekcie czego zaproponowała nowe Rozporządzenie ws. wyrobów budowlanych uwzględniające zrównoważoność produktów oraz przegląd dyrektywy odpadowej w celu zaostrzenia wymagań dotyczących recyklingu odpadów budowlanych. Uruchomiono również inicjatywy wspierające cyfryzację budownictwa (m.in. *cyfrowe paszporty materiałowe*) oraz zasadę uwzględniania śladu węglowego w zamówieniach publicznych [2]. Na podstawie wymienionych dokumentów pogrupowano w tabeli 1 cele strategiczne w obszary tematyczne, co stanowi podstawę do dalszej oceny zbieżności badań naukowych z polityką UE.

Ze względu na istotne oddziaływanie strategii na lokalną gospodarkę i społeczeństwo, integralną częścią Europejskiego Zielonego Ładu jest przyjęty mechanizm **sprawniejszej transformacji**, którego celem jest wsparcie społeczności najbardziej narażonych na skutki wprowadzanych zmian. Dzięki mechanizmom ta-

Table 1. Aggregation of strategic objectives into thematic areas
Tabela 1. Agregacja celów strategicznych do obszarów tematycznych

Thematic area / Obszar	Objectives / Cel
Climate neutrality / Neutralność klimatyczna	reducing emissions and modernizing the steel, chemicals, and cement sectors / obniżenie emisyjności i zmodernizowanie sektora produkcji stali, chemikaliów i cementu,
	renovation wave for buildings / fala renowacji budynków,
	developing and integrating renewable energy, energy efficiency, and other low-emission solutions / rozwój i integracja odnawialnych źródeł energii, efektywności energetycznej i innych zrównoważonych rozwiązań, w tym technologii niskoemisyjnych
	reducing transport emissions by 90% by 2050, expanding protected land and marine areas with high biodiversity / ograniczenie emisji w transporcie o 90% do 2050 r., zrównoważone paliwa, transport multimodalny, sieć stacji ładujących,
	promoting sustainable fuels, multimodal transport, and a charging network / zwiększenie powierzchni chronionych obszarów lądowych i morskich,
	climate monitoring / monitoring klimatyczny,
	actions to reduce methane emissions / działania na rzecz zmniejszenia emisji metanu
Circular economy (CE) / Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ)	circular construction / budownictwo cyrkularne,
	sustainable circular design / zrównoważone, cyrkularne projektowanie,
Digitalization / Cyfryzacja	smart infrastructure / inteligentna infrastruktura,
	increasing biodiversity in cities / cyfryzacja obiektów budowlanych,
Sustainable urban planning / Zrównoważona urbanistyka	increasing biodiversity in cities / zwiększenie bioróżnorodności miast,
	greening european cities / ekologizacja europejskich miast
Reliable life-cycle information / Rzetelna informacja o cyklu życia produktów/ budynków	reliable, comparable, and verifiable life-cycle data / rzetelne, porównywalne i weryfikowalne informacje o cyklu życia produktu,
	monitoring of consumer products / monitoring produktów konsumpcyjnych,
Sustainable construction for agriculture and food / Zrównoważone budownictwo dla rolnictwa	ecological transformation of food systems / ekologiczna transformacja żywności

Scientific Research in Sustainable Construction

The analysis of the scope of scientific research in sustainable construction is based on a keyword map **generated using the VOSviewer software. This map visualizes relationships between keywords according to their co-occurrence** in scientific publications. The keywords were grouped into five main thematic clusters: 1 – Building materials, 2 – Energy efficiency of buildings, 3 – Urban planning, 4 – Environmental assessment of buildings, 5 – Social aspects.

Building Materials (Cluster 1). The dominant topic within this cluster is the search for methods to reduce the environmental impact of building materials while maintaining other key technical parameters such as compressive and flexural strength and the durability of structural elements. Research also addresses fire resistance, thermal insulation, and sound insulation properties.

A major area of interest concerns reducing the environmental footprint of concrete through the use of various additives and admixtures, such as fly ash, slag, and other waste materials that can partially replace Portland cement while also serving as a method of waste utilization. A review of the literature shows that studies examine plant- and animal-based additives to concrete and mortars, including goat hair [8], ashes from biomedical-waste incineration [9], different types of soil, including diatomaceous earth and banana fibers [10], palm-oil fuel ash [11], rice-husk ash [12], coffee-husk ash and sugarcane-bagasse ash [13]. These works focus mainly on the effects of such additives on the mechanical and physical properties of concrete. Some studies identify corrosion problems caused by the presence of chlorides and sulfates. When determining the parameters of concretes with diverse compositions, researchers employ artificial-neural-network models to predict mechanical performance [9, 11]. Further investigations focus on geopolymers, which could serve as a substitute for concrete while enabling the reuse of industrial waste and the implementation of 3D-printing technologies [14]. These innovative materials have the potential to significantly reduce the carbon footprint of construction, making them an attractive option in the context of sustainable development [15]. In addition, geopolymers show high resistance to fire and chemicals, making them ideal for demanding industrial and infrastructural applications [16]. Another important research direction concerns recycling of building materials – the efficient processing and reuse of construction and demolition waste [17], as well as the utilization of agricultural by-products [18] and combustion residues [19].

Studies in this cluster also address phase-change materials (PCMs) [20] and thermal-insulation materials, which are closely linked to the energy performance of buildings. Considerable attention is given to natural materials, such as wood, cellulose, lignin, bamboo, cork, and hemp. The cluster contains keywords related to microstructural research, such as scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), indicating the importance of microstructure and chemical-composition analysis of building materials. A sepa-

kim jak Fundusz na rzecz Sprawiedliwej Transformacji, Unia Europejska wspiera tworzenie nowych miejsc pracy, szkolenia zawodowe, poprawę efektywności budynków, walkę z energocynym ubóstwem, lepszy i tańszy dostęp do czystej energii [7].

Badania naukowe w obszarze zrównoważonego budownictwa

Analiza zakresu badań naukowych w obszarze zrównoważonego budownictwa bazuje na mapie słów kluczowych (ang. keyword map), wygenerowanej za pomocą oprogramowania VOSviewer. Mapa ta wizualizuje relacje między słowami kluczowymi na podstawie ich współwystępowania w publikacjach naukowych. Słowa kluczowe zostały pogrupowane w pięć głównych klastrow tematycznych: 1 – materiały budowlane; 2 – efektywność energetyczna budynku; 3 – urbanistyka, 4 – ocena środowiskowa budynków; 5 – aspekty społeczne.

Materiały budowlane (klastera 1). Dominującym tematem klastera jest poszukiwanie metod na zmniejszenie wpływu materiałów budowlanych na środowisko, przy jednoczesnej kontroli pozostałych istotnych parametrów technicznych, takich jak wytrzymałość na ściskanie, zginanie czy trwałość elementów. Badane są również parametry odporności ogniowej, izolacyjności cieplnej i dźwiękowej.

Widoczne jest zainteresowanie zmniejszeniem wpływu betonu na środowisko, za pomocą wykorzystania dodatków i domieszek do betonów, takich jak fly ash (popiół lotny), ślag (żużel) oraz innych materiałów odpadowych, które mogą częściowo zastąpić cement portlandzki i być jednocześnie metodą utylizacji odpadów. Z przeglądu literatury wynika, że badane są dodatki do betonu i zapraw pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, takie jak: włosie kóz [8], odpady, w tym ze spalania biomedical waste [9], różnego rodzaju typy ziem, w tym np. okrzemkowej [10], włókna bananowe [10], popiół z oleju palmowego [11], popiół z łusek ryżowych [12], kawy [13], wytlóków trzciny cukrowej [13] itp. Badania koncentrują się na wpływie tych dodatków na właściwości mechaniczne i fizyczne betonu. Widoczne są problemy korozyjności betonów, związane z obecnością chlorków i siarczków. Podczas określania parametrów technicznych betonów o zróżnicowanym składzie, wykorzystuje się sieci neuronowe do przewidywania parametrów technicznych [9, 11]. Prowadzone są również badania nad geopolimerami, które mogłyby stanowić substytut betonu, a jednocześnie umożliwiać zagospodarowanie odpadów przemysłowych i wdrożenie technologii druku 3D [14]. Te innowacyjne materiały mają potencjał do znacznego zmniejszenia śladu węglowego budownictwa, co czyni je atrakcyjną alternatywą w kontekście zrównoważonego rozwoju [15]. Ponadto, geopolimery mają dużą odporność na ogień i chemikalia, co sprawia, że są idealnym rozwiązaniem w wymagających warunkach przemysłowych oraz w budownictwie infrastrukturalnym [16]. Istotnym elementem jest też recykling materiałów budowlanych, efektywne przetwarzanie i wykorzystanie odpadów budowlanych i rozbiórkowych [17], a także zagospodarowanie odpadów rolniczych [18] i produktów spalania [19].

W klastrze dostrzegane są badania nad materiałami zmienne-fazowymi [20] oraz izolacyjnymi. Odnotowano ich powiąza-

rate research strand concerns self-healing materials, designed to extend the service life of concrete [21]. Additional studies examine glass materials, including dynamic glazing that enables adjustable light and heat transmittance to improve energy efficiency. Analyses also cover plastic waste and biochar. Environmental studies are largely limited to carbon-footprint evaluation and heavy-metal content, with less focus on material toxicity. Economic analyses appear less frequently and play a secondary role, which may hinder the contribution of new technologies to a **just transition**. Research on sustainable materials also explores the application of machine learning to predict technical parameters of geopolymers and heterogeneous concretes, further linking material science with digital modeling.

Sustainable Buildings and Life-Cycle Assessment (Clusters 2 and 4). Clusters 2 and 4 are discussed jointly because the sustainability of buildings is evaluated primarily through life-cycle analysis (LCA). This includes not only the assessment of environmental impacts of innovative solutions but also their economic viability over the building's entire lifespan.

Cluster 2 focuses on research related to intelligent and energy-efficient buildings. Within this area, various studies are conducted on both office buildings – including high-rise structures – and residential buildings. A key research area is energy management, along with the development of smart systems designed to ensure efficient heating, cooling, and ventilation in buildings. Digitalization plays a central role in these studies, involving the use of sensors, monitoring systems, and optimization technologies that enable automatic real-time control of building processes, thereby improving energy efficiency [22]. In many analyses, the energy-management strategy is divided into **passive and active approaches**. The passive strategy concerns the structural design of a building, such as its geometry, insulation, and the use of natural lighting. The active strategy includes integrated HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) and lighting systems connected with renewable-energy sources and smart control technologies capable of collecting and processing data in real time [23].

In the context of life-cycle assessment (**Cluster 4**), attention is also given to cost-benefit analyses of implementing modern solutions, emphasizing savings achieved throughout the building's life cycle – from design and use to potential renovation or modernization. Publications indicate that, during the operational phase of office buildings, HVAC systems account for about 40% of total energy use, making them a central focus of efficiency strategies. However, researchers emphasize that, in addition to technology, user behavior, awareness, and habits play a crucial role. The modernization (retrofit) of buildings is identified as an effective method of improving energy efficiency, but it remains expensive at the early investment stage and logistically complex [24]. The scope of life-cycle studies also connects with research on sustainable materials, including insulation and phase-change materials (PCMs), as well as analyses of thermal conductivity.

nie z charakterystyką i efektywnością energetyczną budynku. Widoczne są również badania nad zastosowaniem materiałów pochodzenia naturalnego, do których należą drewno, celuloza, lignina, bambus, korek, konopie. Klaster zawiera słowa kluczowe związane z badaniami mikrostrukturalnymi, takie jak scanning electron microscopy (skaningowa mikroskopia elektronowa) i x-ray diffraction (dyfrakcja rentgenowska), co wskazuje na wagę analizy mikrostruktury i składu chemicznego materiałów budowlanych. Odrębny wątek w klastrze stanowią materiały samonaprawialne, których celem jest przedłużenie okresu wykorzystania betonów [21]. Ponadto obserwuje się badania nad szkłem, w tym dynamiczną kontrolą przepuszczalności światła i ciepła przez przeszkłone powierzchnie w celu poprawy efektywności energetycznej budynku. Badania dotyczą również odpadów tworzyw sztucznych oraz biowęgla. Analizy środowiskowe odnoszą się w dużej mierze do śladu węglowego, zawartości metali ciężkich, mniej do toksyczności materiałów budowlanych. Z kolei analizy kosztowe są obecne w mniejszej skali i odgrywają rolę drugoplanową, co może powodować, że nowe technologie nie wesprą **sprawiedliwej transformacji**. Badania nad zrównoważonymi materiałami obejmują również zastosowanie uczenia maszynowego do przewidywania parametrów technicznych geopolimerów i betonów o zróżnicowanym składzie.

Zrównoważone budynki i ocena ich cyklu życia (klaster 2 i 4). Zdecydowano się na wspólne omówienie klastrów 2 i 4, ponieważ zrównoważoność budynków jest oceniana na podstawie analiz cyklu życia. Dotyczy to zarówno oceny ekologiczności nowych rozwiązań, jak i oceny ich rentowności.

Klaster 2 koncentruje się na badaniach dotyczących inteligentnych, efektywnych energetycznie budynków. W jego ramach podejmowane są różne działania badawcze, obejmujące zarówno budynki biurowe, w tym wieżowce, jak i budynki mieszkalne. Kluczowym obszarem badań jest zarządzanie energią, a także rozwój inteligentnych systemów służących do efektywnego ogrzewania, chłodzenia i wentylacji w tych obiektach. Cyfryzacja odgrywa główną rolę w badaniach, takich jak stosowanie czujników, systemów monitorujących oraz technologii optymalizacyjnych umożliwiających automatyczne zarządzanie procesami w budynku w czasie rzeczywistym, dzięki czemu można osiągnąć lepszą efektywność energetyczną [22]. W badaniach stosowany jest podział strategii zarządzania energią w budynku na **strategię pasywną**, związaną z projektowaniem strukturalnym budynku, oraz **aktywną**, która obejmuje zintegrowane z odnawialnymi źródłami energii systemy HVAC (ang. Heating, Ventilation, Air Conditioning) i oświetlenia, które dodatkowo są połączone z inteligentnymi systemami sterowania, umożliwiające gromadzenie i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym [23].

W przypadku oceny cyklu życia budynków i wyrobów budowlanych w kolejnych fazach życia budynków (**klaster 4**), szczególną uwagę poświęca się również analizie kosztów i korzyści związanych z wdrażaniem nowoczesnych rozwiązań, zwracając uwagę na oszczędności w całym cyklu życia obiektu budowlanego – od projektowania, przez użytkowanie, aż po ewentualną modernizację. W publikacjach dostrzega się, że na etapie eksploatacji obiektów biurowych, ogrzewanie, wentyla-

Further work investigates indoor-air quality and ventilation systems. Examples include smart ventilation systems controlled by demand [25] and the application of natural bio-filtering and adsorbent materials to capture indoor pollutants [26]. These approaches illustrate the integration of material innovations, digital technologies, and occupant behavior into a comprehensive strategy for sustainable, high-performance buildings.

Urban Planning (Cluster 3). In this cluster, **buildings are considered as elements of the urban environment**. Research concerns both planning and development of sustainable urban space (urban morphology) using innovative solutions. These studies are related to the analysis of costs and benefits for various stakeholders and for the environment. Research focuses on mitigating the urban heat-island effect and the urban pollution-island effect through the use of green infrastructure of buildings [27, 28]. Studies show that green roofs and façades can partly compensate for the loss of biologically active land in cities and constitute a substitute for permeable surfaces, bringing ecological benefits similar to natural ecosystems [28, 29]. The literature emphasizes the need for strong political support, institutional strengthening, and community involvement to overcome barriers to creating sustainable urban spaces. Strategies such as increased funding and public-awareness campaigns are considered necessary to support the adoption of green infrastructure, ultimately leading to more sustainable and resilient urban environments [30]. The cluster also covers the issue of accessibility, both in urban planning and building design. Numerous papers highlight the need for a more inclusive design approach that takes into account the needs of all users, including people with disabilities, the elderly, and children (*Design for All – DfA*) [31]. Another proposed approach involves the removal of existing barriers [32].

Another area of research within this cluster concerns **the supply and management of greywater and rainwater**. Rainwater harvesting is considered a key method for sustainable domestic water supply [33]. Sustainable water-management systems, although initially expensive, can over time lead to significant cost reductions. For example, the *Terra Bio-Hotel project* in Colombia showed that the costs of investment in sustainable water systems can be recovered within five years [34]. Among the identified keywords, software-based solutions are also present, which indicates the involvement of IT tools in creating sustainable urban spaces. For instance, programmable logic controllers (PLCs) in water-management systems can optimize the distribution and use of water [35].

Social Aspects (Cluster 5). The field of social research includes issues related to building human capacity to meet the challenges of sustainable construction. Studies address the topic of gender diversity and indicate that teams with balanced gender representation are more likely to generate creative solutions and improve project performance, thereby aligning them with the principles of sustainable development [36]. Research highlights the need to improve the

cja i klimatyzacja (HVAC) w 40% odpowiadają za zużycie energii, dlatego też stają się centralnym punktem strategii zwiększania efektywności energetycznej. Zwraca się jednak uwagę, że oprócz technologii duże znaczenie ma zachowanie użytkowników, ich świadomość i nawyki. W badaniach dostrzega się, że modernizacja budynków jest skuteczną metodą poprawy ich efektywności energetycznej, ale jest jednak kosztowna na wczesnym etapie inwestycji i skomplikowana logistycznie [24]. Ponadto, badania cyklu życia łączą się z materiałami zrównoważonymi, izolacyjnymi oraz zmiennofazowymi, jak również z zagadnieniami dotyczącymi przewodnictwa cieplnego.

W badaniach dostrzegalna jest analiza wentylacji i jakości powietrza w budynkach, np. badane są inteligentne systemy wentylacyjne sterowane zapotrzebowaniem [25] oraz naturalne materiały biofiltracyjne i absorbenty zanieczyszczeń [26].

Urbanistyka (klastery 3). W klastrze tym **budynki są rozważane jako elementy środowiska miejskiego**. Badania dotyczą zarówno planowania, jak i rozwoju zrównoważonej przestrzeni miejskiej (urban morphology), z zastosowaniem innowacji. Wiążą się one z analizą kosztów oraz korzyści odnoszonych przez różnych interesariuszy i środowisko. Prowadzone badania dotyczą łagodzenia efektu miejskiej wyspy ciepła i miejskiej wyspy zanieczyszczenia przez zastosowanie zielonej infrastruktury budynków [27, 28]. Badania dowodzą, że zielone dachy czy fasady mogą częściowo kompensować utratę biologicznie czynnych gruntów w mieście i stanowić substytut powierzchni biologicznie czynnej, przynosząc korzyści ekologiczne podobne do naturalnych ekosystemów [28, 29].

W literaturze podkreśla się konieczność silnego wsparcia politycznego, wzmocnienia instytucjonalnego i zaangażowania społeczności w celu przezwyciężenia barier w kreowaniu zrównoważonych przestrzeni miejskich. Strategie, takie jak zwiększone finansowanie i kampanie uświadamiające społeczeństwo są niezbędne do wspierania przyjęcia zielonej infrastruktury, ostatecznie prowadząc do bardziej zrównoważonych i odpornych środowisk miejskich [30]. Przedmiotem analiz w klastrze jest również dostępność, zarówno w planowaniu urbanistycznym, jak i projektowaniu budynków. Liczne artykuły podkreślają konieczność bardziej inkluzywnego podejścia projektowego, uwzględniającego potrzeby wszystkich użytkowników, w tym osób niepełnosprawnych, osób starszych i dzieci (podejście „Design for All (DfA)”) [31]. Proponowane jest również podejście polegające na usuwaniu istniejących barier [32].

Kolejny obszar badań klastra dotyczy **dostarczania i zarządzania wodą szarą oraz deszczową**. Zbieranie wody deszczowej jest uważane za kluczową metodę zrównoważonego zaopatrzenia w wodę do użytku domowego [33]. Zrównoważone systemy gospodarki wodnej, choć początkowo drogie, mogą z czasem prowadzić do znacznego zmniejszenia kosztów, np. projekt *Terra Bio-hotel* w Kolumbii wykazał, że koszty inwestycji w zrównoważone systemy wodne można odzyskać w ciągu pięciu lat [34]. Wśród słów kluczowych pojawiają się również rozwiązania software'owe, a więc widoczny jest udział narzędzi IT w kreowaniu zrównoważonych przestrzeni miejskich, np. programowalne sterowniki logiczne (PLC) w systemach gospodarki wodnej mogą zoptymalizować dystrybucję i wykorzystanie wody [35].

qualifications of architects and engineers in the fields of BIM, LCA (Life Cycle Analysis), and CE (Circular Economy) [37] in order to support the transformation. The cluster also includes analyses of social behavior in relation to urban-structure modeling and spatial planning [38]. A separate topic concerns public-private partnership analyses in construction investments and the availability and characteristics of construction infrastructure in developing countries [39, 40]. Some publications address the crisis situation related to the COVID-19 pandemic and the provision of medical infrastructure for this purpose.

Summary and Conclusions

The aim of the analysis was to determine to what extent the topics addressed in scientific publications respond to the needs and goals defined in the EU's strategic documents. This comparison makes it possible to identify the degree of consistency and thematic gaps, which may represent important directions for future research (Table 2).

The conducted analysis indicates a high degree of convergence between the directions of scientific research and the strategic objectives of the European Green Deal related to the construction sector. The goal of climate neutrality and improving the energy efficiency of buildings is strongly supported by the scientific community. Similarly, the idea of a circular economy has entered the mainstream of construction science. The increasing number of publications on this

Aspekty społeczne (klastery 5). W obszarze badań społecznych znajduje się **tematyka budowania potencjału ludzkiego**, który będzie odpowiadał na wyzwania zrównoważonego budownictwa. Badania poruszają problematykę różnorodności płci i wskazują, że zespoły o zrównoważonej reprezentacji płci mają większe predyspozycje do generowania kreatywnych rozwiązań i poprawy wyników projektu, dostosowując je w ten sposób do zasad zrównoważonego rozwoju [36]. W badaniach wskazuje się na konieczność podnoszenia kwalifikacji architektów i inżynierów w dziedzinie BIM, LCA (ang. Life Cycle Analysis – Środowiskowa analiza cyklu życia) i GOZ (gospodarka o obiegu zamkniętym) [37], aby wesprzeć transformację. Klastery obejmują też analizy zachowań społecznych w odniesieniu do modelowania struktury miast oraz planowania przestrzeni [38]. Odrębny wątek stanowią analizy partnerstwa publiczno-prywatnego w inwestycjach budowlanych oraz dostępność i charakterystyka infrastruktury budowlanej w krajach Trzeciego Świata [39, 40]. Część publikacji dotyczy sytuacji kryzysowej związanej z pandemią COVID-19 i zapewnieniem na ten cel infrastruktury medycznej.

Podsumowanie i wnioski

Celem analizy było określenie, w jakim stopniu tematyka podejmowana w publikacjach naukowych odpowiada na potrzeby i cele zdefiniowane w dokumentach strategicznych UE. Zestawienie to umożliwia identyfikację poziomu zgodności oraz luk tematycznych, które mogą stanowić istotne kierunki przyszłych badań (tabela 2).

Table 2. Analysis of the alignment of research with EU goals

Tabela 2. Analiza zbieżności badań z celami UE

EU policy area / Obszar polityki UE	Alignment with scientific research / Zbieżność z badaniami naukowymi
Climate neutrality / Neutralność klimatyczna	numerous studies on low-carbon materials and phase-change materials; extensive work on building energy efficiency, and LCA/LCC of buildings and systems. Limited research on public opinion and just transition within the Renovation Wave; limited LCC analysis of novel material technologies. / liczne badania materiałów o niskim śladzie węglowym oraz nad materiałami zmiennofazowymi; widoczne badania nad efektywnością energetyczną budynków, analizy LCA i LCC budynków i systemów; niewielka liczba badań dotyczących opinii społecznej / sprawiedliwej transformacji w kontekście fali renowacji; Ograniczone analizy LCC nowych technologii materiałowych.
Circular economy (CE) / Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ)	many studies on concrete admixtures and geopolymers enabling valorization of wastes from various industries; research on construction-waste management. Few references to social aspects of waste management. Limited discussion of LCA/LCC for new solutions; environmental assessments often reduced to carbon-footprint metrics. / liczne badania dodatków i domieszek do betonów oraz rozwój geopolimerów umożliwiających zagospodarowanie odpadów z różnych gałęzi przemysłu; badanie problematyki zarządzania odpadami budowlanymi, nieliczne odniesienia do aspektów społecznych w procesach gospodarki odpadami; niewielka dyskusja nad LCA i LCC nowych rozwiązań, analiza środowiskowa ograniczana głównie do oceny śladu węglowego.
Digitalization of the construction sector / Cyfryzacja sektora budowlanego	numerous studies on BIM, smart HVAC, sensors, and building automation; partial references to social aspects via user-behaviour analyses. / liczne badania nad BIM smart, systemami HVAC, sensorami, automatyzacją zarządzania budynkiem; częściowe odniesienia do aspektów społecznych w zakresie analiz zachowania użytkowników.
Sustainable urban planning / Zrównoważona urbanistyka	extensive research on green infrastructure and urban ecosystems; studies on retention systems and management of greywater and rainwater; research on accessibility in urban space and buildings. / liczne badania nad zieloną infrastrukturą, ekosystemami miejskimi; badania nad systemami retencji, zarządzaniem wodą szarą i deszczową; badanie dostępności w przestrzeni miejskiej i w budynkach.
Reliable life-cycle information / Rzetelna informacja o cyklu życia produktów	research on BIM as a building data repository; few references to EPDs; environmental assessments mostly limited to carbon footprint; little discussion of materials passports. / badania nad BIM jako narzędziem umożliwiającym przechowywanie danych o budynku. Nieliczne odniesienia do EPD; ocena środowiskowa przeważnie ograniczona do wskaźnika śladu węglowego, niewielka dyskusja o paszportach materiałowych.
Sustainable construction for agriculture and food / Zrównoważone budownictwo dla rolnictwa i żywności	marginal – only sporadic references. / marginalne – nieliczne odniesienia

topic shows that the academic world is actively seeking solutions related to closing material loops and minimizing waste. The area of digitalization also provides an example of convergence – EU policy goes hand in hand with intensive research on BIM, IoT, and AI tools related to sustainable construction. On the other hand, the analysis revealed certain gaps. Research on the social and economic aspects of the transformation is much less extensive compared to studies on technical innovations.

Environmental analyses are most often limited to carbon-footprint assessment, whereas a comprehensive life-cycle analysis should not be restricted to a single indicator and should not omit other important components of the natural environment. The Green Deal emphasizes the importance of a just transition, yet small amount of studies address the social consequences of implementing new regulations and technologies in construction. Therefore, there is a need for more in-depth interdisciplinary analyses combining engineering, social sciences, natural sciences, and economics in order to better understand non-technological barriers and drivers of the green transformation in the construction sector.

Received: 27.05.2025

Revised: 30.07.2025

Published: 23.10.2025

Przeprowadzona analiza wskazuje, że istnieje duża zbieżność między kierunkami badań naukowych a celami strategicznymi Europejskiego Zielonego Ładu dotyczącymi budownictwa. Cel neutralności klimatycznej i poprawy efektywności energetycznej budynków jest mocno wspierany przez środowisko naukowe. Podobnie, idea gospodarki o obiegu zamkniętym przeniknęła do głównego nurtu nauki o budownictwie. Coraz większa liczba publikacji o tej tematyce wskazuje, że świat akademicki aktywnie poszukuje rozwiązań dotyczących zamknięcia obiegu materiałów i minimalizacji odpadów. Obszar cyfryzacji stanowi również przykład konwergencji – polityka UE idąca w parze z intensywnymi badaniami nad narzędziami BIM, IoT czy AI dotyczącymi zrównoważonego budownictwa. Z drugiej strony, analiza ujawniła pewne luki. Badania aspektów społecznych i ekonomicznych transformacji mają znacznie mniejszy zakres w dotychczasowych badaniach w porównaniu z innowacjami technicznymi.

Przeprowadzane analizy środowiskowe ograniczają się do śladu węglowego, tymczasem pełna analiza cyklu życia nie może się ograniczać do jednego wskaźnika i pomijać inne istotne komponenty środowiska naturalnego. Zielony Ład kładzie nacisk na sprawiedliwą transformację, tymczasem niewiele prac dotyczy społecznych skutków wdrażania nowych regulacji i technologii w budownictwie. Istnieje zatem potrzeba pogłębionych analiz interdyscyplinarnych, łączących inżynierię z naukami społecznymi, przyrodniczymi i ekonomiczną, aby lepiej zrozumieć bariery pozatechnologiczne i stymulatory zielonej transformacji sektora.

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] European Commission, The European Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, 2019.
- [2] European Commission, "Buildings and construction," https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en.
- [3] European Commission, "Renovation wave." Accessed: Mar. 15, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en.
- [4] European Commission, A new Circular Economy Action Plan. 2020.
- [5] European Commission, *Fit for 55*. 2021.
- [6] European Parliament and Council of the European Union, Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ("European Climate Law"). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>, 2021.
- [7] European Commission, „Mechanizm sprawiedliwej transformacji: z myślą o wszystkich”, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism_pl.
- [8] Hassas N, et al., "The impact of goat hair as a natural animal fiber on properties of the lightweight cement composite," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, DOI: 10.1038/s41598-025-91130-9.
- [9] Kumar R, Karthik S, Kumar A, Tantri A, Shahaji, Sathvik S. "Machine

learning approach for predicting the compressive strength of biomedical waste ash in concrete: a sustainability approach," *Discov Mater*, vol. 5, no. 1, Dec. 2025, DOI: 10.1007/s43939-025-00223-9.

[10] Dicha HM, Chaudhary S, Husain MN, Krishnaraj R. "Banana fibre-reinforced diatomaceous earth slurry treatment of recycled aggregate for enhanced structural concrete performance," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, DOI: 10.1038/s41598-024-84762-w.

[11] Ali T. et al., "Advanced and hybrid machine learning techniques for predicting compressive strength in palm oil fuel ash-modified concrete with SHAP analysis," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, DOI: 10.1038/s41598-025-89263-y.

[12] Jing Y, Lee JC, Moon WC, Ng JL, Yew MK, Jin Y. "Durability and environmental evaluation of rice husk ash sustainable concrete containing carbon nanotubes," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, DOI: 10.1038/s41598-025-88927-z.

[13] Onsongo SK, Olukuru J, Munyao OM, Mwabonje O. "The role of agricultural ashes (rice husk ash, coffee husk ash, sugarcane bagasse ash, palm oil fuel ash) in cement production for sustainable development in Africa," *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, 2025, DOI: 10.1007/s43621-025-00841-6.

[14] Sambucci M, Sibai A, Valente M. "Recent advances in geopolymer technology. A potential eco-friendly solution in the construction materials industry: A review," Apr. 01, 2021, MDPI AG. DOI: 10.3390/jcs5040109.

[15] Shehata N, Al-Fitori O, Sayed ET, Abdelkareem MA, Olabi A. "Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials," *Science of The Total Environment*, vol. 836, p. 155577, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155577.

- [16] Jwaida Z, Dulaimi A, Mashaan N, Othuman Mydin MA. "Geopolymers: The Green Alternative to Traditional Materials for Engineering Applications," Jun. 01, 2023, MDPI. DOI: 10.3390/infrastructures8060098.
- [17] Enobie B, Okwandu AC, Abdulwaheed SA, Iwuanyanwu O. "Effective waste management in construction: Techniques and implementation," International journal of applied research in social sciences, 2024, DOI: 10.51594/ijarss.v6i8.1390.
- [18] Benjamin B.W, Lekshmi S, Nishaant Ha, Geordy R, Sudhakumar J. "A preface to agricultural wastes as sustainable construction material," Mater Today Proc, 2023, DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.512.
- [19] Wang X. "Recycling of various combustion/incineration residues into calcium sulfoaluminate cementitious material (CSA)," Elsevier BV, 2024, pp. 219–245. DOI: 10.1016/b978-0-443-21536-0.00007-1.
- [20] Huo D. "Exploring the Sustainable Role of Phase Change Energy Storage Materials in Construction Engineering," Highlights in Science Engineering and Technology, vol. 106, pp. 286–292, 2024, DOI: 10.54097/p7gk6r55.
- [21] Kadamba S, Blesson S, Rao AU, Kamath M, Tantri A. "Mechanical, durability and microstructure properties of self-healing concrete utilizing agro-industrial waste: a critical review," Journal of building pathology and rehabilitation, vol. 9, no. 2, 2024, DOI: 10.1007/s41024-024-00501-8.
- [22] Su Y, Jin Q, Zhang S, He S. "A review on the energy in buildings: Current research focus and future development direction," Jun. 30, 2024, Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32869.
- [23] Sowa S. "An improvement in the energetic efficiency of a building using daylight in the light control system," in E3S Web of Conferences, EDP Sciences, Jul. 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184500115.
- [24] Anarene B. "Revolutionizing Energy Efficiency in Commercial and Institutional Buildings: A Complete Analysis," International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM), vol. 12, no. 09, pp. 7444–7468, Sep. 2024, DOI: 10.18535/ijssrm/v12i09.em12.
- [25] Lopes MB et al., "A Numerical and Experimental Study to Compare Different IAQ-Based Smart Ventilation Techniques," Buildings, vol. 14, no. 11, Nov. 2024, DOI: 10.3390/buildings14113555.
- [26] Ji W, Chen C, Zhao B. "A comparative study of the effects of ventilation-purification strategies on air quality and energy consumption in Beijing, China," Build Simul, vol. 14, no. 3, pp. 813–825, Jun. 2021, DOI: 10.1007/s12273-020-0694-2.
- [27] Wu Q, et al., "Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure," Nov. 01, 2024, Academic Press. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122985.
- [28] Ugochukwu Kanayo Ashinze, Blessing Aibhamen Edeigba, Aniekan Akpan Umoh, Preye Winston Biu, and Andrew Ifesinachi Daraojimba, "Urban green infrastructure and its role in sustainable cities: A comprehensive review," World Journal of Advanced Research and Reviews, vol. 21, no. 2, pp. 928–936, Feb. 2024, DOI: 10.30574/wjarr.2024.21.2.0519.
- [29] Michalik-Śnieżek M, Adamczyk-Mucha K, Sowisz R, Bieske-Matejak A. "Green Roofs: Nature-Based Solution or Forced Substitute for Biologically Active Areas? A Case Study of Lublin City, Poland," Sustainability (Switzerland) , vol. 16, no. 8, Apr. 2024, DOI: 10.3390/su16083131.
- [30] Bhatt H, Devkota S, Shah S. "Sustainable Urban Planning and Green Infrastructure: A Symbiotic Relationship," International Journal for Multi-disciplinary Research, vol. 6, no. 6, Dec. 2024, [Online]. Available: www.ijfmr.com.
- [31] Steffan I. "Sustainability and accessibility: The Design for All approach," in Work, 2012, pp. 3888–3891. DOI: 10.3233/WOR-2012-0057-3888.
- [32] Eisenberg Y, Heider A, Labbe D, Gould R, Jones R. "Planning accessible cities: Lessons from high quality barrier removal plans," Cities, vol. 148, May 2024, DOI: 10.1016/j.cities.2024.104837.
- [33] Nnaji CC. "Sustainable Water Supply in Buildings Through Rooftop Rainwater Harvesting," in The Construction Industry in the Fourth Industrial Revolution, W. Aigbavboa Clinton and Thwala, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 390–400.
- [34] Leon G., García P. "Sustainable water management in buildings, an affordable approach. Case Study: Terra Bio-Hotel Project, Medellín, Colombia," 2014.
- [35] Desai R., Maske P. "Sustainable Development Goal-Oriented Water Management for Smart Buildings in Smart Cities: An Automatic PLC-Based Demand and Supply Approach," Nov. 11, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-5279760/v1.
- [36] Ben-Amar W, Chang MM, McIlkenny P. "Board Gender Diversity and Corporate Response to Sustainability Initiatives: Evidence from the Carbon Disclosure Project," Journal of Business Ethics, vol. 142 (2), pp. 369–383, 2017, [Online]. Available: <https://ro.uow.edu.au/buspapers/1396>.
- [37] Rahimian FP, Goulding JS, Arciszewski T. "Successful education of professionals for supporting future BIM implementation within the architecture engineering construction context," 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113548498>
- [38] Qi J, Mazumdar S, Vasconcelos AC. "Understanding the Relationship between Urban Public Space and Social Cohesion: A Systematic Review," International Journal of Community Well-Being, vol. 7, no. 2, pp. 155–212, Jun. 2024, DOI: 10.1007/s42413-024-00204-5.
- [39] Akomea-Frimpong I, Jin X, Osei-Kyei R, Kukah AS. "Public-private partnerships for sustainable infrastructure development in Ghana: a systematic review and recommendations," Smart and Sustainable Built Environment, vol. 12, no. 2, pp. 237–257, Feb. 2023, DOI: 10.1108/SAS-BE-07-2021-0111.
- [40] Diaz-Sarachaga JM, Jato-Espino D, Alsulami B, Castro-Fresno D. "Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in developing countries," Ecol Indic, vol. 71, pp. 491–502, Dec. 2016, DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.07.033.