Review paper (Artykuł przeglądowy)

mgr inż. Ewa Kwiatkowska[1)*)]
ORCID: 0009-0007-9217-7004
dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. uczelni[1)]
ORCID: 0000-0003-3233-2838

The impact of exterior cladding materials on ambient air quality

Wpływ elewacyjnych materiałów budowlanych na stan jakości powietrza atmosferycznego

DOI: 10.15199/33.2026.10.14

Abstract. Ambient air quality is one of the most important aspects of the environment and human life. In this article, the authors analysed the impact of building materials on ambient air quality, focusing in particular on the levels of harmful emissions and available solutions. As a result, very little interest was observed in topics relating to both air pollution and building materials.

Keywords: building materials; air quality; pollution; environmental protection.

Streszczenie. Jakość powietrza atmosferycznego jest jednym z najważniejszych elementów środowiska i życia ludzkiego. W artykule autorzy przeanalizowali wpływ stosowanych materiałów budowlanych na jakość powietrza atmosferycznego. Zwrócono uwagę na wielkość emisji szkodliwych substancji oraz dostępne rozwiązania w celu ich zmniejszenia. W efekcie zauważono bardzo małe zainteresowanie tematyką dotyczącą zarówno zanieczyszczenia powietrza, jak i materiałów budowlanych.
Słowa kluczowe: materiały budowlane; jakość powietrza; zanieczyszczenia; ochrona środowiska.

In today's world, the term *'air quality'* is becoming increasingly common (e.g. in various studies, publications, discussions and the media), both in the context of health and in relation to the built environment and the immediate surroundings [1]. It forms the basis for various debates and discussions around the world (though this naturally varies depending on the continent, country and size of settlements). This is because atmospheric air quality can be influenced by many different factors, including, amongst others, the type and quality of building materials used – both in relation to their manufacturing process and their use on site, as well as during modernisation or renovation works. The scale of the problem is also illustrated by the fact that it is now widely accepted that building materials commonly used on the exterior of buildings can emit significant amounts of air pollutants and, consequently, contribute directly and/or indirectly to the deterioration of the natural environment. Consequently, it's widely believed that the construction sector has a negative impact on the natural environment, (amongst other things, through the high consumption of non-renewable raw materials, the wastage of materials ending up in landfill, significant greenhouse gas emissions, and the generation of pollutants during construction processes) [2]. Urgent corrective action is therefore required [3]. Annual CO_2 emissions generated by buildings account for almost 40% of global emissions, whilst their operation accounts for 28% of total emissions; building materials and the building's structure account for a further 11% of total annual emissions [4]. For this reason, attempts are being made to tackle this problem. With regard to reducing

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: ewa.kwiatkowska@dokt.p.lodz.pl

We współczesnym świecie coraz powszechniejsza staje się obecność (np. w różnego rodzaju opracowaniach, publikacjach, rozmowach i mediach) pojęcia „jakość powietrza" zarówno w kontekście zdrowotnym, jak i w odniesieniu do budownictwa oraz bezpośredniego otoczenia [1]. Stanowi ono podstawę różnego rodzaju debat i rozważań na całym świecie (oczywiście jest to zróżnicowane w zależności od kontynentu, państwa, wielkości jednostek osadniczych). Wynika to z tego, że na jakość powietrza atmosferycznego może wpływać wiele różnych czynników, w tym m.in. rodzaj i jakość stosowanych materiałów budowlanych i to zarówno w związku z procesem ich wytwarzania, jak i wykorzystywania na budowie oraz w trakcie modernizacji/remontów. O skali problemu może również świadczyć to, że obecnie bardzo często przyjmuje się, że materiały budowlane powszechnie stosowane na zewnątrz obiektów mogą emitować znaczne ilości zanieczyszczeń powietrza, a co za tym idzie pośrednio i/lub bezpośrednio przyczyniać się do pogorszenia stanu środowiska naturalnego. W efekcie powszechnie uważa się, że budownictwo negatywnie wpływa na środowisko naturalne (m.in. przez duże zużycie surowców nieodnawialnych, marnowanie materiałów trafiających na wysypiska, znaczną emisję gazów cieplarnianych oraz wytwarzanie zanieczyszczeń w trakcie trwania procesów budowlanych) [2]. Wymaga więc pilnych działań naprawczych [3]. Roczna emisja CO_2 generowana przez budynki wynosi prawie 40% emisji globalnej, a ich eksploatacja odpowiada za 28% całkowitej emisji, przy czym materiały budowlane i konstrukcja budynku odpowiadają za dodatkowe 11% całkowitych emisji rocznie [4]. Z tego powodu podejmowane są próby rozwiązania tego problemu. W przypadku redukcji emisji gazów cieplarnianych prawo klimatyczne Unii Europejskiej wprowadza następujące ograniczenia [5]:

greenhouse gas emissions, the European Union's climate legislation introduces the following limits [5]:

- by 2030, there should be a 55% reduction compared with 1990 levels;
- by 2050, net-zero emissions are to be achieved.

The scale of the problem is also illustrated by the fact that, despite global success in reducing the energy intensity of buildings, energy demand in buildings has increased by around 4% since 2020, whilst CO_2 emissions from building operations reached a record level of around 10 $GtCO_2$, representing an increase of around 5% compared with 2020 and 2% more than in 2019. The 2025–2026 report [6] shows that the construction sector continues to account for 37% of global emissions and nearly 50% of global material extraction. It follows that the construction sector will not be able to achieve decarbonisation by 2050 [7]. Pollution generated by the construction sector, apart from greenhouse gas emissions – primarily carbon dioxide – is also linked to emissions of volatile organic compounds. In accordance with the Regulation of the Minister for Development of 8 August 2016 on the limitation of emissions of volatile organic compounds contained in certain paints and varnishes intended for painting buildings and their finishing elements, fittings and structures associated with buildings and these elements, as well as in mixtures for vehicle refinishing [8], the maximum permissible VOC content is as follows:

- paints for external walls – water-based paints 40 g/l, solvent-based paints 430 g/l;
- opacity paints for painting internal or external finishing elements and cladding made of wood, metal or plastics – water-based paints 130 g/l, solvent-based paints 300 g/l;
- varnishes for painting interior or exterior finishing elements, and wood stains, including opaque ones – 130 g/l for water-based paints, 400 g/l for solvent-based paints.

Materials and methods

Given the currently very popular concept of sustainable development – which, in the construction sector, primarily involves the construction and operation of buildings in such a way as to minimise their negative impact on the environment as much as possible – it is worth examining this topic. Accordingly, in this article we have analysed publications (dating back to the 1990s) with regard to the impact of façade building materials on ambient air quality, including, amongst other things, emissions of greenhouse gases and volatile organic compounds. The first part provides a statistical overview of the largest emissions of pollutants originating from external building materials, based on scientific and research articles from two databases (Scopus and Google Scholar), with the analysis taking into account keyword searches covering various combinations containing *'building materials'* and *'outdoor air quality'* (as a result, 45 articles suitable for analysis and combining both these aspects were selected). Figure 1 shows the number of articles analysed, broken down by period. It can be seen that the data on the impact of building materials on air quality are fairly re-

- do 2030 r. powinna nastąpić redukcja o 55% w porównaniu z 1990 r.;
- do 2050 r. ma nastąpić zerowa emisja netto.

O skali problemu świadczy również to, że pomimo globalnego sukcesu w obniżaniu energochłonności budynków zapotrzebowanie na energię w budynkach zwiększyło się o ok. 4% od 2020 r., a emisja CO_2 z eksploatacji budynków osiągnęła rekordowy poziom ok. 10 $GtCO_2$, co oznacza wzrost o ok. 5% w porównaniu z 2020 r. i o 2% więcej niż w 2019 r. Z raportu 2025–2026 [6] wynika, że sektor budownictwa nadal odpowiada za 37% globalnej emisji i prawie 50% globalnego wydobycia materiałów. Wynika z tego, że sektor budownictwa nie będzie w stanie osiągnąć dekarbonizacji do 2050 r. [7]. Wytwarzanie zanieczyszczeń w budownictwie poza emisją gazów cieplarnianych, przede wszystkim ditlenku węgla, wiąże się także z emisją lotnych związków organicznych. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Rozwoju z 8 sierpnia 2016 r. w sprawie ograniczenia emisji lotnych związków organicznych zawartych w niektórych farbach i lakierach przeznaczonych do malowania budynków i ich elementów wykończeniowych, wyposażeniowych oraz związanych z budynkami i tymi elementami konstrukcji oraz w mieszaninach do odnawiania pojazdów [8] dopuszczalna maksymalna zawartość LZO wynosi w przypadku:

- farb na mury zewnętrzne – farb wodnych 40 g/l, farb rozpuszczalnikowych 430 g/l;
- farb kryjących do malowania wewnętrznych lub zewnętrznych elementów wykończeniowych i okładzin z drewna, metalu lub tworzyw sztucznych – farb wodnych 130 g/l, farb rozpuszczalnikowych 300 g/l;
- lakierów do malowania wewnętrznych lub zewnętrznych elementów wykończeniowych oraz bejc, włącznie z nieprzezroczystymi – farb wodnych 130 g/l, farb rozpuszczalnikowych 400 g/l.

Materiały i metody badań

Przy bardzo popularnej obecnie idei zrównoważonego rozwoju, która w budownictwie polega przede wszystkim na realizacji i eksploatacji budynków w taki sposób, aby jak najbardziej minimalizować negatywny wpływ na środowisko, warto przyjrzeć się temu tematowi. W związku z tym w artykule przeanalizowaliśmy publikacje (począwszy od lat dziewięćdziesiątych XX w.) pod kątem wpływu stosowanych elewacyjnych materiałów budowlanych na jakość powietrza atmosferycznego, a więc m.in. emisji gazów cieplarnianych i lotnych związków organicznych. Pierwsza część stanowi statystyczny przegląd największych emisji zanieczyszczeń, pochodzących ze stosowanych zewnętrznych materiałów budowlanych, wykonany na podstawie artykułów naukowo-badawczych z dwóch baz danych (Scopus i Google Scholar), przy czym w analizie uwzględniono wyszukiwania po słowach kluczowych, obejmujących różnego rodzaju kombinacje zawierające *„materiały budowlane"* i *„jakość powietrza zewnętrznego"* (w efekcie wybrano 45 artykułów możliwych do analizy i łączących oba te aspekty). Rysunek 1 przedstawia liczbę przeanalizowanych artykułów w podziale na okresy. Wynika z nich, że dane dotyczące wpływu materiałów budowlanych na jakość powietrza

cent, but not the most recent (the largest number of articles on this topic were published between 2016 and 2020).

In addition, the articles have been categorised according to whether they were published in Polish or international journals (Figure 2). Most of the articles analysed relate to situations abroad and selected case studies.

The second part of the article provides examples of innovative and environmentally friendly solutions that do not contribute to pollution but, on the contrary, help to partially purify the atmospheric air, particularly as, in accordance with the Regulation of the Minister of Infrastructure on the technical conditions to be met by buildings and their location of 12 April 2002 [9] Section VIII, Chapter 2, § 312: *A building containing rooms intended for human occupancy, for livestock, or for the production and storage of foodstuffs and pharmaceutical products must not be constructed from materials emitting compounds (gases, vapours, dust) that are harmful to health or produce odours in concentrations exceeding the permissible limits*. The World Health Organisation (WHO), on the other hand, does not directly address the impact of building materials on ambient air quality. These issues are monitored by other global institutions, such as the World Green Building Council [10], whose objectives include, amongst other things, reducing emissions of pollutants into the external environment.

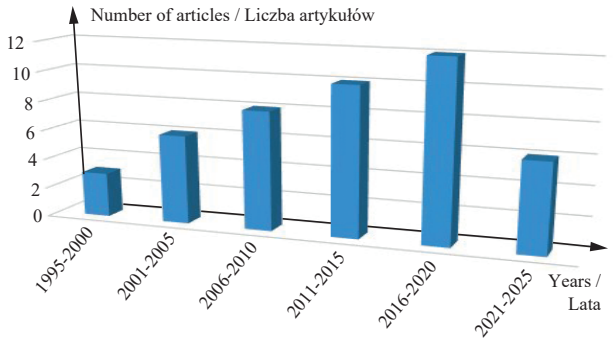


Fig. 1. Number of articles published between 1995 and 2025 – Polish and international publications *Fig. autors*

Rys. 1. Liczba artykułów opublikowanych w latach 1995–2025 – publikacje polskie i międzynarodowe *Rys. autorzy*

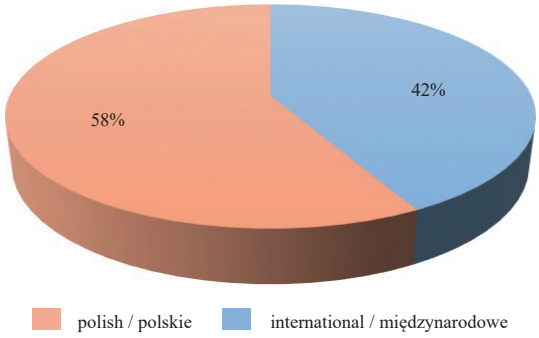


Fig. 2. Percentage of Polish and international journals analysed *Fig. autors*

Rys. 2. Udział [%] przeanalizowanych czasopism polskich i międzynarodowych *Rys. autorzy*

są dosyć nowe, ale nie najnowsze (najwięcej artykułów o tej tematyce opublikowano w latach 2016–2020).

Dodatkowo artykuły podzielone zostały na opublikowane w czasopismach polskich i międzynarodowych (rysunek 2). Większość z przeanalizowanych artykułów odnosi się do sytuacji zagranicznych i wybranych studiów przypadków.

W części drugiej artykułu podano przykłady zastosowanych innowacyjnych i ekologicznych rozwiązań niewpływających na zanieczyszczenie, a wręcz przyczyniających się do częściowego oczyszczania powietrza atmosferycznego, szczególnie że zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* z 12 kwietnia 2002 r. [9] dział VIII rozdział 2 § 312 *Budynek z pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi, dla inwentarza żywego, a także do produkcji i przechowywania artykułów spożywczych oraz farmaceutycznych nie może być wykonany z materiałów emitujących związki (gazy, pary, pyły) szkodliwe dla zdrowia lub zapachowe w stopniu przekraczającym ich dopuszczalne stężenia*. Z kolei Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) nie odnosi się bezpośrednio do wpływu materiałów budowlanych na jakość powietrza atmosferycznego. Zagadnienia te są monitorowane przez inne globalne instytucje, np. World Green Building Council [10], która w swoich celach ma m.in. zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do środowiska zewnętrznego.

The highest greenhouse gas emissions

Greenhouse gases act as an invisible blanket for the planet. They are volatile components of the atmosphere which allow solar radiation to pass through whilst absorbing heat (infrared radiation) reflected from the Earth's surface [11]. The most important greenhouse gases are carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapour. These are components that occur naturally in the atmosphere; however, human activity has increased their concentration. For example, carbon dioxide (CO_2) is the main greenhouse gas and is likely responsible for around 80% of the anthropogenic contribution to global warming [12]. This is confirmed by a 2012 publication [13], which provides information on CO_2 emissions from the production of basic building materials (Figure 3). Even then,

Największa emisja gazów cieplarnianych

Gazy cieplarniane stanowią niewidzialną izolację planety. Są to lotne składniki atmosfery, które przepuszczają promieniowanie słoneczne i pochłaniają ciepło (promieniowanie podczerwone) odbite od powierzchni Ziemi [11]. Najważniejszymi gazami cieplarnianymi są ditlenek węgla, metan, podtlenek azotu i para wodna. Są to składniki występujące naturalnie w atmosferze, przy czym działalność antropogeniczna zwiększyła ich stężenie, np. ditlenek węgla (CO_2) jest głównym gazem cieplarnianym i odpowiada prawdopodobnie za ok. 80% wpływu antropogenicznego na ocieplenie [12]. Potwierdzeniem tego może być publikacja z 2012 r. [13], gdzie podano informację o emisji CO_2 w produkcji podstawowych materiałów budowlanych (rysunek 3). Już wtedy emi-

emissions from steel production were considered to be the highest amongst the materials listed.

The analysis found that approximately 95% of articles on this subject confirm that, within the construction sector, the production and use of materials such as cement, steel and aluminium are the largest sources of greenhouse gas emissions. These account for 37% of global emissions [14]. Cement is a hydraulic binder that forms the basis of concrete products, plastering mortars and construction chemicals. Consequently, the cement industry accounts for approximately 5–8% of global CO_2 emissions [15–17]. Steel products, on the other hand, which are widely used in road construction (bridge building) and in the construction of industrial halls due to their high strength [18, 19] and ease of use (prefabricated steel components are delivered to the construction site), mean that the steel industry accounts for 7–9% of global CO_2 emissions. Aluminium, on the other hand, is currently a very popular material due to its properties and aesthetic appeal (aluminium products are used in the manufacture of window frames, façades and balustrades) and, owing to its considerable strength (is utilised in fire-resistant and burglar-proof structural systems) [20], accounts for approximately 70% of global CO_2 emissions [21]. Figure 4 shows how greenhouse gas emissions from aluminium production have evolved over a ten-year period (2014–2024). In 2021, a reduction in CO_2 emissions from aluminium was recorded, but after 2022 they began to rise again.

The International Energy Agency [23] has proposed scenarios aimed at reducing global CO_2 emissions. The expected outcome will be a reduction in global warming. The scenarios are based on the assumption of a sharp increase in demand for materials by 2060 and the following emission reductions: 70% for steel; 20% for cement; and 30% for aluminium.

Another pollutant analysed was VOC emissions from various building materials. Volatile organic compounds are a group of chemical substances whose common characteristic is that their molecules contain carbon atoms and that, at temperatures of around 20°C and above, they very

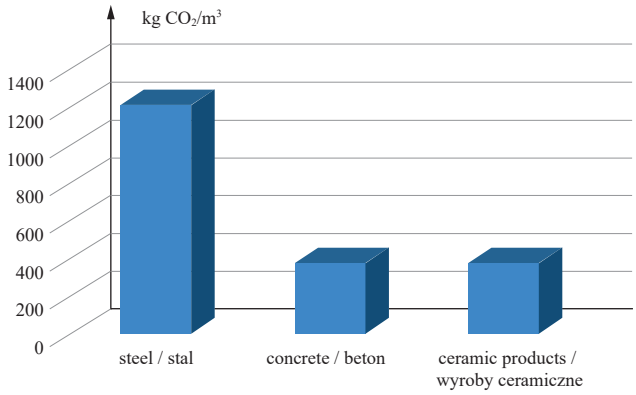


Fig. 3. CO_2 emissions from the production of building materials
Fig. own analysis based on [11]
Rys. 3. Emisja CO_2 w produkcji materiałów budowlanych
Rys. autorzy na podstawie [11]

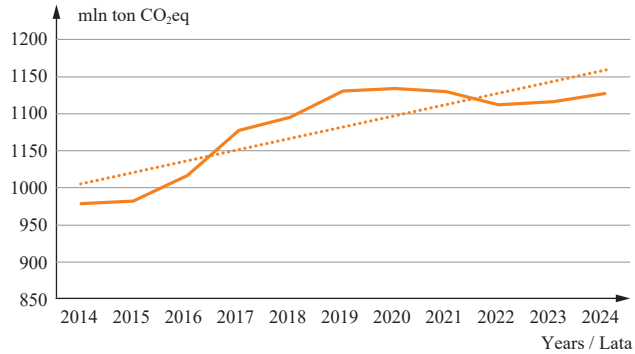


Fig. 4. Total greenhouse gas emissions in the aluminium sector between 2014 and 2024
Fig. own analysis based on [22]
Rys. 4. Całkowita emisja gazów cieplarnianych w produkcji aluminium w latach 2014–2024
Rys. autorzy na podstawie [22]

sja z produkcji stali uważana była za największą spośród wymienionych materiałów.

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że ok. 95% artykułów odnoszących się do tej tematyki potwierdza, że w sektorze budownictwa największym emitentem gazów cieplarnianych jest produkcja i używanie materiałów, takich jak cement, stal i aluminium. Odpowiadają one za 37% globalnych emisji [14]. Cement jest spoiwem hydraulicznym stanowiącym podstawę wyrobów betonowych, zapraw tynkarskich i produktów chemii budowlanej. W efekcie przemysł cementowy odpowiada za ok. 5–8% światowej emisji CO_2 [15÷17]. Wyroby ze stali natomiast, które są powszechnie stosowane w budownictwie drogowym (budowa mostów) oraz przy budowie hal ze względu na duże możliwości wytrzymałościowe [18, 19] i łatwość wykorzystania (na plac budowy przywożone są gotowe elementy stalowe), powodują, że przemysł hutniczy odpowiada za 7–9% globalnej emisji CO_2. Z kolei aluminium, które obecnie jest bardzo popularnym materiałem ze względu na właściwości i estetykę (wyroby aluminiowe stosowane są przy wytwarzaniu stolarki okiennej, fasad i balustrad) oraz w związku ze znaczną wytrzymałością (wykorzystywane jest w systemach konstrukcji przeciwpożarowych i antywłamaniowych) [20], powoduje ok. 70% globalnej emisji CO_2 [21]. Rysunek 4 przedstawia, jak emisja gazów cieplarnianych w produkcji aluminium kształtowała się na przestrzeni dziesięciu lat (2014–2024). W 2021 r. odnotowano zmniejszenie emisji CO_2 z aluminium, ale po 2022 r. zaczęła znowu wzrastać.

Międzynarodowa Agencja Energetyczna [23] zaproponowała scenariusze w celu zmniejszenia globalnej emisji CO_2. Oczekiwanym efektem będzie ograniczenie globalnego ocieplenia. Scenariusze obejmują założenie gwałtownego zwiększenia zapotrzebowania na materiały do 2060 r. i następujące redukcje emisji w przypadku: stali o 70%; cementu o 20%; aluminium o 30%.

Kolejnym przeanalizowanym zanieczyszczeniem była emisja LZO pochodząca z poszczególnych materiałów budowlanych. Lotne związki organiczne stanowią grupę substancji chemicznych, których wspólną cechą jest to, że ich cząsteczki zawierają atomy węgla oraz że w temperaturze ok. 20°C i wyższej bardzo łatwo przechodzą do postaci

readily transition into a volatile state (vapour or gas) at temperatures of approximately 20°C and above [24]. Volatile organic compounds are found primarily in paint products [25], but are also present in many other building products made from plastics, containing chemically curing resins, adhesives, as well as residues of unreacted monomers [26]. Among the various types of building materials, plasterboard has a negligible impact on VOC levels [27]. Many parameters, such as air velocity, temperature and relative humidity, can influence the emission of VOCs from building materials [28, 29]. Despite the presence of volatile organic compounds in, amongst other things, paints, plasters and gypsum used externally, studies confirm [30, 31] that the highest indoor VOC emissions stem from the use of various types of adhesives, cladding, flooring and paints.

In the case of ceramic tiles, however, it can be observed that their greatest environmental impact occurs during the transport of raw materials [32]. Consequently, on the one hand, ceramic products are used as a building material because of their aesthetic appeal, whilst on the other hand, they have a significant impact on the environment, as they account for over 50% of building material production. Global production of ceramic tiles reached 13,056 million m^2 in 2016. Compared with 2015, this represented an increase of 5.7%. At that time, China was the largest producer and consumer of ceramic products, accounting for 42.8% of global tile production, followed by India and Brazil. Research carried out by Muthukannan M., which analysed the impact of specific parameters of ceramic products (sintering, smoke and CO_2 emissions) on the environment, showed that the ceramics industry contributes to air pollution and climate change due to the emission of harmful gases [33]. It is also worth referring to the pollutants investigated by Da Silva K.K., Duarte F.T. et al. [34], who examined total particulate matter (PM) in the ceramics industry in Brazil. The authors reported that its average concentration was 65 ± 26.2 μg/m^3. Another pollutant investigated by other authors was silica dust [35]. They assessed the risk to the health of people exposed to this dust, which is present in factories producing, amongst other things, ceramic tiles. Liao C.M., Wu B.C. et al. [36] found that, at average dust concentrations of 0.11–5.48 and 0.46–1,763.30 μg/m^3, the silica content ranged from 0.22–33.04% and demonstrated that the production of ceramic tiles in a closed factory poses a risk to the health or life of those directly exposed to silica dust over many years.

Nanomaterials constitute a group of products with the potential to be released into the environment. Their particles may have an adverse effect on human health during the processing of materials. Nanomaterials are primarily used as admixtures and additives in cementitious products. In 2018, Sikora P. [37] found a wealth of data indicating the harmful effects of nanomaterials on living organisms. He identified the production stage of cement composites as the main source of nanomaterial release.

lotnej (pary lub gazu) [24]. Lotne związki organiczne występują przede wszystkim w wyrobach malarskich [25], ale spotykane są także w wielu innych wyrobach budowlanych wykonanych z tworzyw sztucznych, zawierających żywice chemoutwardzalne, kleje, a także pozostałości nieprzereagowanych monomerów [26]. Spośród różnego rodzaju materiałów budowlanych płyty gipsowo-kartonowe mają niewielki wpływ na poziom lotnych związków organicznych [27]. Wiele parametrów, takich jak: prędkość powietrza, temperatura i wilgotność względna, może mieć wpływ na emisję lotnych związków organicznych z materiałów budowlanych [28, 29]. Pomimo występowania lotnych związków organicznych m.in. w farbach, tynkach i gipsach stosowanych zewnętrznie, badania potwierdzają [30, 31], że największa emisja LZO występuje wewnątrz pomieszczeń pochodzi ze stosowania różnego rodzaju klejów, okładzin, podłóg i farb.

W przypadku płytek ceramicznych można natomiast zaobserwować, że najbardziej wpływają one na środowisko podczas transportu surowców [32]. W efekcie z jednej strony wyroby ceramiczne są stosowane jako materiał budowlany ze względu na ich estetyczny wygląd, natomiast z drugiej strony w istotny sposób wpływają na środowisko naturalne, gdyż odpowiadają za ponad 50% produkcji materiałów budowlanych. Produkcja płytek ceramicznych w 2016 r. osiągnęła na całym świecie 13 056 mln m^2. W porównaniu z 2015 r. odnotowano wzrost o 5,7%. Wówczas największym producentem i konsumentem wyrobów ceramicznych były Chiny, które odpowiadały za 42,8% światowej produkcji płytek, a kolejne miejsca zajmowały Indie i Brazylia. Badania przeprowadzone przez Muthukannan M., w których analizowany był wpływ poszczególnych parametrów wyrobów ceramicznych (spiekanie, dym i emisja CO_2) na środowisko, wykazały, że przemysł ceramiczny przyczynia się do zanieczyszczenia jakości powietrza atmosferycznego i zmian klimatycznych ze względu na emisję szkodliwych gazów [33]. Warto również odnieść się do zanieczyszczeń zbadanych przez Da Silva K.K., Duarte F.T i in. [34], podczas których badany był całkowity pył zawieszony (PM) w przemyśle ceramicznym w Brazylii. Autorzy przedstawili, że średnie jego stężenie wynosiło 65 ±26,2 μg/m^3. Kolejnym zanieczyszczeniem zbadanym przez innych autorów był pył krzemionkowy [35]. Ocenili oni ryzyko dla zdrowia ludzi narażonych na ten pył, unoszący się w zakładach produkujących m.in. płytki ceramiczne. Liao C.M., Wu B.C. i in. [36] stwierdzili, że przy średnim stężeniu pyłu 0,11–5,48 i 0,46–1763,30 μg/m^3 zawartość krzemionki wynosiła 0,22–33,04% i wykazali, że produkcja płytek ceramicznych w fabryce zamkniętej stanowi zagrożenie dla zdrowia lub życia osób bezpośrednio narażonych na działanie pyłu krzemionkowego przez wiele lat.

Grupą wyrobów o potencjalnym narażeniu na emisję do środowiska są nanomateriały. Ich cząstki mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie osób podczas obróbki materiałów. Nanomateriały stosowane są przede wszystkim w postaci domieszek i dodatków do wyrobów cementowych. W 2018 r. Sikora P. [37] znalazł wiele danych świadczących o szkodliwości nanomateriałów na organizmy żywe. Jako główne źródło uwalniania się nanomateriałów wskazał etap produkcyjny kompozytu cementowego.

Solutions to improve air quality

In the scientific and research articles analysed (from 2016–2025), the authors identified certain methods that could be used to reduce emissions of harmful substances and improve air quality. Over the last 10–15 years, solutions relating to so-called green building, as well as eco-friendly approaches based on LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) [38] and BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) [39].

Another concept relating to binding agents is that of geopolymers, based on alkali-activated aluminosilicates [39]. In approximately 70% of the articles analysed, it was confirmed that photocatalytic concrete (which utilises the process of photocatalysis to break down air pollutants) contributes to air purification and improves air quality [17, 40]. Another example of an eco-friendly building material is autoclaved aerated concrete, which has a minimal environmental impact [41]. Research [15] confirms that *autoclaved aerated concrete products can absorb approximately 77 kg of CO_2 per m^3 over their entire life cycle* (80% of carbon dioxide sequestration occurs after fifty years, and 95% after eighty years).

Summary

Analyses have shown that construction products used on the exterior of buildings result in significant greenhouse gas emissions. The production of ceramic products and the transport of finished building materials also have a significant impact on outdoor air quality. Emissions of volatile organic compounds are recorded from paints and plasters, with the highest levels found indoors. The use of products such as photocatalytic concrete, autoclaved aerated concrete, or the application of green building technologies, can contribute to a significant improvement in ambient air quality. Furthermore, should the targeted reduction in emissions of harmful substances from building materials be achieved, ambient air quality and the state of the natural environment would improve significantly. An analysis was carried out of the available articles (approximately 45 scientific and research articles from the period 1995–2025) relating to the impact of external building materials on ambient air quality. Following this analysis, it was concluded that further research should be carried out due to the high level of interest in this topic and the insufficient number of recent publications. From two databases (*'Scopus'* and *'Google Scholar'*), 45 articles were selected that were thematically relevant to the study. In the *'Google Scholar'* database, out of the 300 results obtained relating to building materials and air quality, 'only' 30 articles were usable, as they dealt with the impact of external building materials on ambient air quality. From the *'Scopus'* database, half as many literature items were usable, i.e. 'only' 15 scientific research articles.

A key element of this article is the compilation and summary of the current state of knowledge regarding the building

Rozwiązania w celu poprawy jakości powietrza

W przeanalizowanych artykułach naukowo-badawczych (z lat 2016–2025), autorzy wskazywali pewne metody, możliwe do zastosowania w celu ograniczenia emisji szkodliwych substancji i poprawy jakości powietrza atmosferycznego. W okresie ostatnich 10–15 lat bardzo popularne stały się zarówno rozwiązania związane z tzw. zielonym budownictwem, jak i ekologiczne na bazie technologii LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) [38] i technologii BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

Z kolei innym pomysłem dotyczącym spoiw wiążących są geopolimery, bazujące na aktywnych glinokrzemianach aktywowanych alkaliami [39]. W ok. 70% przeanalizowanych artykułów potwierdzono, że beton fotokatalityczny (wykorzystujący proces fotokatalizy do rozkładu zanieczyszczeń powietrza) wpływa na oczyszczanie i poprawę jakości powietrza [17, 40]. Z kolei innym przykładem ekologicznego materiału budowlanego jest autoklawizowany beton komórkowy, który ma niewielki wpływ na środowisko [41]. Badania [15] potwierdzają, że *produkty z autoklawizowanego betonu komórkowego mogą w całym cyklu życia pochłonąć ok. 77 kg CO_2 na m^3,* (80% wiązania ditlenku węgla następuje po pięćdziesięciu latach, a 95% po osiemdziesięciu latach).

Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że w przypadku wyrobów budowlanych stosowanych na zewnątrz obiektów występuje duża emisja gazów cieplarnianych. Na jakość powietrza zewnętrznego mają istotny wpływ także produkcja wyrobów ceramicznych oraz transport gotowych materiałów budowlanych. Emisja lotnych związków organicznych odnotowywana jest natomiast z farb i tynków, a największy jej udział został stwierdzony wewnątrz pomieszczeń. Zastosowanie wyrobów takich, jak beton fotokatalityczny, autoklawizowany beton komórkowy, czy wykorzystanie technologii zielonego budownictwa, może przyczynić się do znacznej poprawy jakości powietrza atmosferycznego. Ponadto w przypadku, gdyby udało się osiągnąć założoną redukcję emisji szkodliwych substancji z materiałów budowlanych, jakość powietrza atmosferycznego i stan środowiska naturalnego uległyby znacznej poprawie. Analizie poddano dostępne artykuły (ok. 45 artykułów naukowo-badawczych z okresu lat 1995–2025), związane z wpływem zewnętrznych materiałów budowlanych na jakość powietrza atmosferycznego. Po ich analizie stwierdzono, że należałoby przeprowadzić nowe badania ze względu na duże zainteresowanie tą tematyką oraz niewystarczającą liczbą nowych publikacji. Z dwóch baz danych („*Scopus*" i „*Google Scholar*") wybrano 45 artykułów odpowiadających tematycznie opracowaniu. W bazie „*Google Scholar*" spośród otrzymanych 300 wyników związanych z materiałami budowlanymi i jakością powietrza, możliwe do wykorzystania było „tylko" 30 artykułów, które pokrywały się z wpływem stosowanych zewnętrznych materiałów budowlanych na jakość powietrza atmosferycznego. Z bazy „*Scopus*" możliwe do wykorzystania było o połowę mniej pozycji literatury, czyli „tylko" 15 artykułów naukowo-badawczych.

materials in use and their potential impact on the environment (primarily on ambient air quality). Research into the impact of façade building materials on air quality may include product life-cycle analyses and the use of building products of natural origin. The focus should be on both neutralising pollutants and minimising the carbon footprint of the production and disposal of building materials.

This article systematises the current state of knowledge, presents solutions that contribute to improving air quality through the use of modern building materials, and identifies gaps in new research of this kind.

Istotnym elementem tego artykułu jest zebranie i podsumowanie stanu wiedzy na temat stosowanych materiałów budowlanych i ich potencjalnego wpływu na środowisko naturalne (przede wszystkim stanu jakości powietrza atmosferycznego). Kierunki badań wpływu elewacyjnych materiałów budowlanych na jakość powietrza mogą obejmować analizy cyklu życia produktu/wyrobu oraz stosowanie wyrobów budowlanych pochodzenia naturalnego. Skupiać się powinny zarówno na neutralizacji zanieczyszczeń, jak i na minimalizacji śladu węglowego produkcji i utylizacji materiałów budowlanych.

W artykule usystematyzowano dotychczasowy stan wiedzy i przedstawiono rozwiązania przyczyniające się do poprawy jakości powietrza z stosowaniem nowoczesnych materiałów budowlanych oraz wskazano luki w nowych tego typu badaniach.

Received: 08.06.2026
Revised: 11.08.2026
Published: 21.10.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 08.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 11.08.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Chen F, Zhang W, Mfarrej MFB, Saleem MH, Khan KA, Ma J, Raposo A. Heesup Han, Breathing in danger: Understanding the multifaceted impact of air pollution on health impacts, Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 280, 2024, 116532, ISSN 0147-6513, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116532.

[2] Yu Z, Nurdiawati A, Kanwal Q, Al-Humaiqani MM, Al-Ghamdi SG. Assessing and mitigating environmental impacts of construction materials: Insights from environmental product declarations, Journal of Building Engineering, Volume 98, 2024, 110929, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110929.

[3] Labaran YH, Mathur VS, Muhammad SU, Musa AA. Carbon footprint management: A review of construction industry, Cleaner Engineering and Technology, Volume 9, 2022, 100531, ISSN 2666-7908, https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531.

[4] Global ABC Global Status Report, 2018 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/03/2018-GlobalABC-Global-Status-Report.pdf (accessed 23.05.2026).

[5] European Union https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20230316STO77629/zmiana-klimatu-gazy-cieplarniane-powodujace-globalne-ocieplenie (accessed 23.05.2026).

[6] Global Status Report for Buildings and Construction 2025–2026, https://globalabc.org/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-2025-2026 (accessed 23.05.2026).

[7] Global Status Report for Buildings and Construction 2022, https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction (accessed 23.05.2026).

[8] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 8 sierpnia 2016 https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/ograniczenie-emisji-lotnych-zwiazkow-organicznych-zawartych-w-18336823 (accessed 23.05.2026).

[9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z 12 kwietnia 2002 r. https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20020750690 (accessed 22.05.2026).

[10] World Green Building Council https://worldgbc.org/healthy-equity-resilience/air-quality-in-the-built-environment/(accessed 22.05.2026).

[11] Singh K. Greenhouse Gases And Their Impact On Global Warming, Peer Reviewed and Refereed Journal, volume 13, Issue 4(2), April 2024, DOI: http://ijmer.in.doi./2024/13.4.29.

[12] Portal informacyjny https://gozych.edu.pl/geografia/fizyczna/klimatologia/gazy-cieplarniane/#Dwutlenek_wegla_CO2 (accessed 23.05.2026).

[13] Golański M. Wybór materiałów budowlanych w kontekście efektywności energetycznej i wpływu środowiskowego, Civil and Environmental Engineering/Budownictwo i Inżynieria Środowiska 3 (2012) 39-53.

[14] Building Materials And The Climate: Constructing A New Future, Report, 2023, https://wedocs.unep.org/items/effe9d8d-a949-4397-bed6-7afda856e261 (accessed 24.05.2026).

[15] Zapotoczna-Sytek G, Małolepszy J. Zrównoważony rozwój, a proces wytwarzania i stosowania elementów z betonu komórkowego, DNI BETONU 2008.

[16] Spychał E, Czapik P. The Influence of Cement Type on the Properties of Plastering Mortars Modified with Cellulose Ether Admixture. Materials (Basel). 2021 Dec 11;14(24):7634. doi: 10.3390/ma14247634.

[17] Wang Y, Zhang S, Chen Y, Zhao S, Zhu X. Nanotechnology in cement-based materials: A state-of-the-art review on performance enhancement, sustainability challenges, and future prospects, Green Technologies and Sustainability, Volume 4, Issue 3, 2026, 100389, ISSN 2949-7361, https://doi.org/10.1016/j.grets.2026.100389.

[18] Miki C, Homma K, Tominaga T. (2002). High Strength and High Performance Steels and Their Use in Bridge Structures," Journal of Constructional Steel Research, 58(1): 3-20. Journal of Constructional Steel Research. 58. 3-20. 10.1016/S0143-974X(01)00028-1.

[19] Kowal M, Szala M. Diagnosis of the microstructural and mechanical properties of over century-old steel railway bridge components, Engineering Failure Analysis, Volume 110, 2020, 104447, ISSN 1350-6307, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104447.

[20] Zhongxing W, Mengyu L, Han Q, Yun X, Zhou K, Gardner L, Mazzolani F. (2022). Structural fire behaviour of aluminium alloy structures: Review and Outlook. Engineering Structures. 268. 114746. 10.1016/j.engstruct.2022.114746.

[21] Ahmad S, Steen J, Zajac T, Azadi M, Ali SH. Carbon emissions in metal manufacturing productivity: A global analysis of aluminium smelting, Energy Research & Social Science, Volume 129, 2025, 104343, ISSN 2214-6296, https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104343.

[22] Aluminium Sector Greenhouse Gas Emissions https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/(accessed 24.05.2026).

[23] Drewniok M, Kostrzanowska-Siedlarz A, Emisyjność głównych materiałów budowlanych – co przyniesie przyszłość, Magazyn Autostrady, 2019, Tom nr 11-12, Strony 52–56.

[24] Cicolella A. (2008), Volatile Organic Compounds (VOC): Definition, classification and properties. Revue des maladies respiratoires. 25. 155-63. 10.1016/S0761-8425(08)71513-4.

[25] Mo Z, Lu S, Shao M. Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China, Environmental Pollution, Volume 269, 2021, 115740, ISSN 0269-7491, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115740.

[26] David E, Niculescu VC. Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Occurrence and Mitigation Using Nanomaterials. Int J Environ Res Public Health. 2021 Dec 13;18(24):13147. doi: 10.3390/ijerph182413147. PMID: 34948756; PMCID: PMC8700805.

[27] Weigl-Kuska M, Fürhapper C, Niedermayer S, Habla E, Nohava M, Nagl S, Polleres S. (2014). VOC emissions from building materials: Results from lab and model room trials. International Wood Products Journal. 5. 136-138. 10.1179/2042645314Y.0000000072.

[28] Wolkoff P. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term voc emissions from building products, Atmospheric Environment, Volume 32, Issues 14–15, 1998, Pages 2659-2668, ISSN 1352-2310, https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00402-0.

[29] Hall EC, Haines SR, Marciniak K, Goldstein AH, Adams RI, Dannemiller KC, Misztal PK. Varying humidity increases emission of volatile nitrogen-containing compounds from building materials, Building and Environment, Volume 205, 2021, 108290, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108290.

[30] Xudong Y. Study of Building Material Emissions and Indoor Air Quality, 1999, Massachusetts Institute of Technology, http://hdl.handle.net/1721.1/9366.

[31] Harčárová K, Vilcekova S, Balintova M. (2020). Building Materials as Potential Emission Sources of VOC in the Indoor Environment of Buildings. Key Engineering Materials. 838. 74-80. 10.4028/www.scientific.net/KEM.838.74.

[32] Tikul N, Srichandr P. (2010). Assessing the environmental impact of ceramic tile production in Thailand. Journal of the Ceramic Society of Japan. 118. 887-894. 10.2109/jcersj2.118.887.

[33] Muthukannan M, Ganesh ASC. The Environmental Impact Caused by the Ceramic Industries and Assessment Methodologies, International Journal for Quality Research, 2019, 13(2) 315–334, DOI – 10.24874/IJQR13.02-05.

[34] Da Silva KK, Duarte FT, Matias JNR, Dias SAMM, De Souza E, Duarte F, Da Silva Soares CGC, Hoelzemann JJ, De Oliveira Galvão MF. Physico-chemical properties and genotoxic effects of air particulate matter collected from a complex of ceramic industries, Atmospheric Pollution Research, Volume 10, Issue 2, 2019, Pages 597-607, ISSN 1309-1042, https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.001.

[35] Hu A, Li R, Chen G, Chen S. Impact of Respiratory Dust on Health: A Comparison Based on the Toxicity of PM2.5, Silica, and Nanosilica, Int J Mol Sci., 2024 Jul 12;25(14):7654. doi: 10.3390/ijms25147654. PMID: 39062897; PMCID: PMC11277548.

[36] Liao CM, Wu BC, Cheng YH, et al. Ceramics manufacturing contributes to ambient silica air pollution and burden of lung disease. Environ Sci Pollut Res 22, 15067–15079 (2015). https://doi.org/10.1007/s11356-015-4701-6.

[37] Sikora P. Zagrożenia środowiskowe i zawodowe związane ze stosowaniem nanodomieszek do produkcji kompozytów cementowych, Dni Betonu 2018.

[38] Amiri A, Emami N, Ottelin J, Sorvari J, Marteinsson B, Heinonen J, Junnila S. Embodied emissions of buildings – A forgotten factor in green building certificates, Energy and Buildings, Volume 241, 2021, 110962, ISSN 0378-7788, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110962.

[39] Hager I. Materiały budowlane i zrównoważony rozwój, Nasza Politechnika nr 12 (160) grudzień 2016, www.nasza.pk.edu.pl.

[40] Chilmon K, Jackiewicz-Rek W. Beton fotokatalityczny a możliwość oczyszczania powietrza, 2019, Budownictwo, Technologie, Architektura, tom nr 2, str. 66-69.

[41] Abou-Zeid M, Khalil E. Environmental Impact of Autoclaved Aerated Concrete in Modern Construction: A Case Study from the New Egyptian Administrative Capital, Journal of Civil & Environmental Engineering, 2020, vol: 14, no: 1.