



DOI: 10.21005/pif.2022.52.B-03

THE USE OF TiO₂ TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURE FOR AIR PURIFICATION IN THE CITY

TECHNOLOGIE TiO₂ W ARCHITEKTURZE NA RZECZ CZYSTEGO POWIETRZA W MIEŚCIE

Alagöz Meryem

Research Assistant Doctor

Orcid number: 0000-0002-7483-4281

Necmettin Erbakan University in Konya, Turkey
Faculty of Arts and Architecture

Pazdur-Czarnowska Anna

Master of Arts

Orcid number: 0000-0002-7479-5665

West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland
Faculty of Architecture, Department of History and Theory of Architecture

ABSTRACT

This paper explores the possibilities of the use of architectural design in benefiting the human condition in polluted cities and shows the role of art in shifting people's ideas about its influence on an urban wellbeing. The authors depict the possible usage of titanium dioxide (TiO₂) technology as a component of building materials and its impact on clearing the atmosphere from nitrogen oxides. This research is focused on shaping the architectural form to promote light-active building materials for ecological thinking. The results of the academic research programme undertaken at WPUT (West Pomeranian University of Technology) in Szczecin, in cooperation with the Necmettin Erbakan University in Konya, are presented here.

Key words: air purification, architecture, urban wellbeing, TiO₂ technology.

STRESZCZENIE

Artykuł bada możliwości wykorzystania form architektonicznych w celu poprawy kondycji ludzkiej w zanieczyszczonych miastach i pokazuje rolę sztuki w zmianie wyobrażeń ludzi o jej wpływie na *wellbeing* w mieście. Autorki przedstawiają możliwości wykorzystania technologii dwutlenku tytanu (TiO₂) jako składnika materiałów budowlanych i jej wpływu na oczyszczanie atmosfery z tlenków azotu. Badania te koncentrują się na kształtowaniu formy architektonicznej w celu promowania światło aktywnych materiałów budowlanych na rzecz ekologicznego myślenia. Przedstawiono tu wyniki akademickiego programu badawczego podjętego w WPUT (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny) w Szczecinie, we współpracy z Necmettin Erbakan University w Konya, Turcja.

Słowa kluczowe: architektura, filtracja powietrza, przestrzeń publiczna, technologia TiO₂.

1. INTRODUCTION

Rapid urbanization and the growing number of megacities and urban complexes has required new types of research and services, in order to make the best use of science and the available technology. The global air pollution map reveals 2,000 cities suffering from dirty air. The ambient concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀ and NO₂ are the largest environmental health risk in the world, responsible for millions of premature deaths every year. Air pollution can be defined as a phenomenon in which various substances that are normally found in the air are out of specified limits, and substances that should not be in the air are found at a rate hazardous to humans, plants, animals and the environment (Cavkaytar, Soyer, Şekerel, 2013).

Air quality in big cities is a result of the complex interaction between natural and anthropogenic environmental conditions. Air pollution in highly-urbanized areas is a serious environmental problem of concern all over the world. Although cities occupy approximately 2% of the global surface, they are responsible for 70% of global energy usage (Masson-Delmotte et al., 2018) 75% of global resource usage and 80% of total emissions. As waste generation is approximately in parallel to resource consumption, urban areas are responsible for toxic and solid waste generation and air pollution, too. It is believed that the global population will reach 8 billion by 2025. It is also thought that this population will be living mostly in metropolitan areas. These increases in risk are based on the Global Burden of Disease risk model which has been developed from dozens of epidemiological studies around the world, covering data from millions of people (Stanaway, Murray, Afshin, 2018, pp. 1923–1994).

In the built environment, the answer to the current threats posed by progressive air pollution processes has been the practical use of TiO₂ photocatalyst for several decades. Titanium dioxide represents an effective photocatalyst for water and air purification and for self-cleaning surfaces. Additionally, it can be used as antibacterial agent because of strong oxidation activity and superhydrophilicity (Zaleska, 2008).

2. MATERIALS AND METHODS

The research was focused on a new possibility of resolving the problem of air purification in big cities by the advanced architectural design of public-use spaces in the urban environment. The objectives of this research were achieved by means of the literature overview and case study of several architectural examples, which present the most versatile usage of TiO₂ component.

The paper focuses on the two on two determinants: historically significant buildings where TiO₂ was first applied, and facilities that use the most of the properties of TiO₂ photocatalytic processes in geographic regions with high concentrations of pollutants in the air.

Architectural examples in which TiO₂ photocatalyst was used were selected based on meeting the main properties of this component (Fig.1). Activation of the aforementioned properties occurs under UV irradiation, and their intensification increases as the geometric complexity of the surface on which TiO₂ has been applied, for example, in the form of a coating paint, progresses. In view of this, studies show that coating curvilinear architectural objects with TiO₂ gives the best cleaning results.



Fig.1. TiO₂ architectural properties. Source: by authors
Ryc.1. Właściwości architektoniczne TiO₂. Źródło: autorki

3. GLOBAL AIR CONTAMINATION

There are three main pollutants associated with poor health in inner cities:

- 1) NO₂ (Nitrogen Dioxide), typically found in areas of high vehicular traffic. Exposure to NO₂ has been associated with a range of health effects including organ and neurodevelopment during pregnancy, early onset asthma in children and lung function decline in older adults.
- 2) PM_{2.5} or particulate matter, such as soot, smoke, dust and liquid droplets measuring less than 2.5 micrometres in diameter; these tiny particles are of particular concern to our health because they can enter the bloodstream and lodge deep in our organs.
- 3) PM₁₀ are larger particles than PM_{2.5}, but come from similar sources. PM of all sizes has been linked to chronic inflammation and is associated with similar health risks, including lung development during pregnancy and early childhood, as well as lung function decline in older adults (Yatkin, Bayram, 2007, pp. 126-139).

The EEA Report No. 09/2020 (Air quality in Europe-2020 report) presents an updated overview and analysis of ambient (outdoor) air quality in Europe (2) and is focused on the state of air quality in 2018. This data shows that air pollution continues to have a significant impact on the health of the European population, particularly in urban areas. Europe's most serious pollutants, in terms of harm to human health, are particulate matter (PM), NO₂ and ground-level ozone (O₃). Some population groups are more affected by air pollution than others, because they are more exposed or susceptible to environmental hazards (EEA Report). Since TiO₂ catalyst is a new chemical element available on the construction market and has been undergoing numerous scientific studies for only 10 years, its application in architecture is still experimental. Current research is being conducted on, among other things, the effect of the angle of a surface coated with TiO₂ paint on its filtration properties.

4. MODERN USE OF TiO₂ IN ARCHITECTURE

The research was focused on a new possibility of resolving the problem of air purification in big cities by the advanced architectural design of public-use spaces in the urban environment. Studies have shown that the composition and sources of PM and NO₂ are strongly dependent on the location, traffic load, fossil fuel utilization and industrial activities at the sampling sites. There is a consensus that climate plays a crucial role in the formation and evolution of air pollution. The main aim of the design research program was to demonstrate new possibilities for the application of the new light-active building materials including modified TiO₂ photocatalysts as a crude material for the synthesis of N and/or C. The objectives of the research were achieved based on the case study method of global, architectural examples. The use of TiO₂ as a component of building materials in the objects studied had environmental consequences, but also affected the aging and apparent aging of these materials. TiO₂ ingredient is currently being widely explored within the building market and research institutions. The product meets the criteria of an innovative compound used in the building industry, by delivering multi-curved shapes and yet, at the same time, lowering costs and being environmentally-friendly. The presented research shows an architectural approach towards dissemination of knowledge and popularization of technologies supporting the improvement of air quality in cities.

Titanium dioxide (TiO₂) is the naturally occurring oxide of titanium. It is used in a wide range of pigment related applications (e.g. as a white pigment in paint, a UV blocker in sunscreen, a food colorant etc). TiO₂ is also a powerful photocatalyst, and can speed up the natural, but slow oxidation of organic matter in the presence of light and water. Specialist photoactive TiO₂ is already used in a wide range of photocatalytic products, including self-cleaning windows (Pilkington NSG - Activ™, Saint-Gobain - Bioclean, PPG - Sunclean), self-cleaning tiles (TOTO - Hydrotect) and air purification devices (Hoover, electriQ, De'Longhi, Green UV etc). The current global market for photocatalytic compositions was \$1.5 billion in 2014, and is forecast to grow at a compound annual growth rate of 12.6% over the next five years (Towards Purer Air Report).

The TiO₂-based photocatalysts, under solar radiation, can oxidize and degrade most of the airborne urban pollutants such as nitrogen oxides (NO_x) or volatile organic compounds (VOCs). Titanium dioxide (TiO₂) has been in great demand ever since 1972, when Fujishima and Honda discovered

photocatalytic splitting of water on a TiO_2 electrode under ultraviolet (UV) light (Guan, 2005, pp.35-49) (Fig.2).

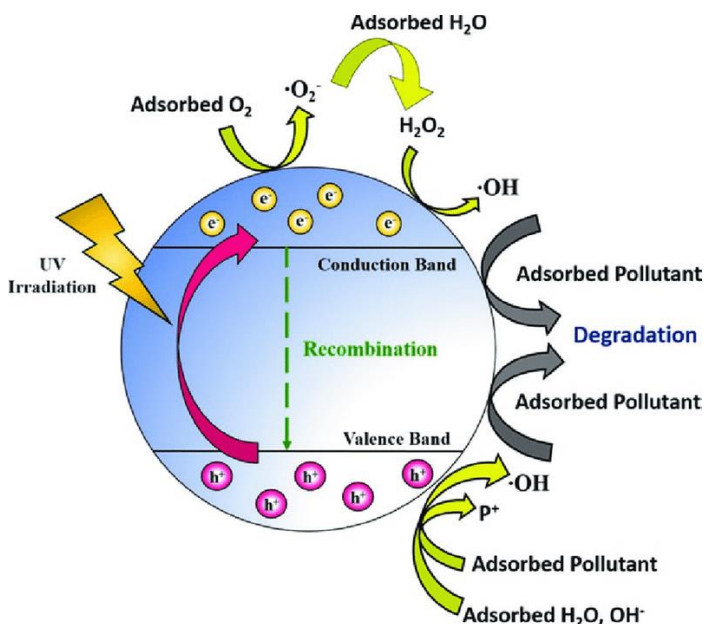


Fig. 2. TiO_2 photocatalysis process during UV exposure. Source: by authors

Ryc. 2. Proces fotoatalizy TiO_2 podczas oddziaływania promieni UV. Źródło: autorki

Moreover, as long as the photocatalyst is exposed to UV light, the UV-light/ TiO_2 photochemical reaction continues to yield oxidative and reductive constituents in perpetuity. Titanium dioxide (TiO_2) is a non-toxic material widely used in products and paints as a white pigment. When producing photo-catalytic concrete, the conventional Portland cement, silica sand, crushed stone, and water are mixed – but the addition of titanium dioxide (TiO_2) in levels reported between 3-5% gives the resulting concrete photo-catalytic properties (Fox, Nikolov, 2014). Taking one step further, the Eindhoven University of Technology has developed a way to apply TiO_2 to pavements making them 'photocatalytic pavements'. This concept can reduce smog in cities by between 19 and 45 percent, depending on conditions.

Students from the University of California Riverside used a similar concept but applied it to roof tiles. Each roof tile is simply covered with titanium dioxide and, as they absorb sunlight throughout the day, the tiles remove the pollution from the air.

The first patented approaches of TiO_2 in building materials (white cement compositions) appeared in the 1990s and at the beginning of the 21st century. In Europe, several buildings have been designed and built utilizing the photocatalytic cement materials since 2000, including the Church of God the Merciful Father (Chiesa di Dio Padre Misericordioso) in Roma (Fig.3).

A new research, 16 years after the building was erected, the self-cleaning and colour-preserving properties arising from the titanium particles (TiO_2) within the concrete mix do not meet the design requirements and the concrete shows premature evidence of decomposition. The findings highlight how the ageing pattern directly connects with the photocatalytic oxidation, geometry of the building and inadequate consideration of the local climate/weather conditions at the design stage. Research within the development of efficient photocatalytic materials has made significant progress over the past two decades. Moreover, this research offered the opportunity to test the durability and the effectiveness of the TiO_2 in the real conditions on an actual building featuring non-standard geometries (Cardellicchio, 2020).



Fig. 3. Degradation of TiO_2 performance as a component of surface paints. Chiesa di Dio Padre Misericordioso, arch. Richard Meier. Source: by authors

Ryc. 3. Degradacja działania TiO_2 jako składnika powierzchniowego. Kościół Świętego Ojca Miłosiernego w Rzymie. Źródło: autorki

The 2500m² facade at Torre de Especialidades (Fig.4) is a 100m long, curved screen along Avenida San Fernando, a busy arterial in Tlalpan, in the southern quarter of Mexico City. Prosolve was chosen by the hospital in part for its anti-microbial, de-polluting effect, as well as providing visual complexity, memorable in form, as a counter to the city's air pollution problem. Currently, the city exhibits some of the highest global air pollution rates at 137 PM₂ (more than 9 times the predicted limit) (IQAir, 2022). According to recent studies of the technology, the facade at Torre de Especialidades is reducing the pollution of 1,000 cars per day. The facade of the building is designed in a honeycomb geometric tile network structure and applied in the form of a double skin to make a higher surface area (2,500). This structure doubles the m² surface area compared to the planar form (Lee, Kyung, Kim, Kim, 2019).



Fig. 4. Torre de Especialidades Hospital in Mexico City. Source: by authors

Ryc. 4. Szpital Torre de Especialidades w Meksyku. Źródło: autorki

The Palazzo Italia for the World Fair Expo 2015 in Milan is one of the first buildings in the world to use cement that can clean the air. Italcementi, which developed the cement, needed no more than 12,500 hours of research to produce the material that was strong and flexible enough to be used for the building. On the basis of the cement, an Italian construction firm has developed a 'biodynamic' mortar building material that is able to remove pollutants from the air automatically. The Palazzo Italia used more than 2,200 tons of the new cement, which was cast into panels to cover much of the exterior and some of the interior of the distinctive building (Januszkiewicz, Kowalski, 2019) (Fig.5).



Fig. 5. Palazzo Italia for the World Fair Expo 2015 in Milan. Source: by authors

Ryc. 5. Palazzo Italia podczas Światowych Targów Expo 2015 w Mediolanie. Źródło: autorki

The mortar, which was made from recycled scraps of marble and left over aggregate, absorbs nitrogen oxide and sulphur pollution and converts it into harmless salts. It uses a titanium catalyst that is activated by ultraviolet light to drive the chemical reaction. The salts then wash off the walls when it rains (Borgogello, 2015).

The organic shape of the Tupras refinery (Fig.6) headquarters allowed the company to take advantage of all the possibilities of TiO_2 's influence through varying angles of sunlight. The usage of Çimsa self-cleaning, air purifying white cement in GRC panels is directly related with the conditions of the application area. In big cities with dense population the pollutant concentration at street level is quite high because the dispersion of the exhaust generated by a large number of vehicles is hindered by the surrounding tall buildings. For these cities applying TiO_2 modified cementitious materials onto the external covering of buildings or roads may be a good supplement to conventional technologies such as catalytic converters fitted on the vehicles for reducing gaseous exhaust emission. Concrete pavement surfaces and external building surfaces are optimal media for applying the photocatalytic materials because the relatively flat configuration of the building materials can facilitate the exposure of the photocatalyst to sunlight. In addition, the nature of cement matrix is particularly suitable for incorporating TiO_2 particles and other photo-oxidation products. Under irradiation of solar light, gaseous pollutants can be degraded on the surface of construction materials which can be eventually washed away by rain. The whole removal process of pollutants is driven by natural energy alone (Delibas, Marasli, 2015).

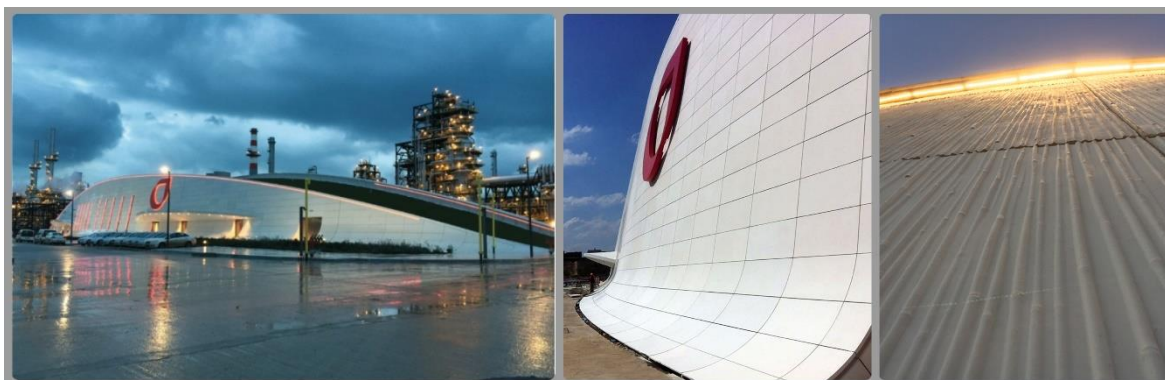


Fig. 6. Tupras Petroleum Refinery Headquarters by Izmir. Source: by authors

Ryc. 6. Siedziba rafinerii Tupras koło Izmiru. Źródło: autorki

The Izmir area of Turkey, especially its industrial areas, is currently showing air contamination 7 times above acceptable limits. The modern shape of the company's headquarters and the use of an innovative TiO_2 photocatalyst on the concrete surface underscore the fuel industry's eco-friendly ideas.

In recent decades, the proliferation of TiO_2 as a component included in construction materials other than concrete has been evident. The self-cleaning properties of TiO_2 -coated surfaces allow the use of this photocatalyst as a layer for glass panels, membranes and even aluminium panels (Fig.7). The figure shows three methods of the use of TiO_2 as a coating in architecture: the membranę roof of Tokio Grand Station, TiO_2 doped ceramic fins of San Raffaele Hospital in Milan and an aluminium facade of residential building Casalgrande Padana designed by Daniel Libeskind.



Fig.7. Different materials including TiO_2 photocatalyst. Left: Tokio Grand Station roof. Middle: San Raffaele Hospital in Milan. Right: Casalgrande Padana in Berlin. Source: by authors.

Rys.7. Różne zastosowania powierzchni wzbogacanych fotokatalizatorem TiO_2 . Od lewej: membranowe zadaskenie głównej stacji kolejowej w Tokio, szpital św.Rafała w Mediolanie, Casalgrande Padana w Berlinie. Źródło: autorki

The coating application of glass, metal and ceramic surfaces with TiO_2 has been patented under the name of HydroTect®. The HydroTect® coating provides the ability to clean the air by neutralizing the nitrogen oxides in the air, in addition to the ability to self-clean with rain water. The 1000 m² photocatalytic cladding is capable of cleaning as much as 70 trees can clean the air (Orhon,2014).

Over the past decades, tests have been conducted on interior materials coated with TiO_2 . The company Green Millennium is engaged in marketing in the US of interior furnishings (Fig.8) whose membranes have been coated with TiO_2 and show very high indoor air cleaning properties and actively contribute to the removal of bacteria and odors from rooms.

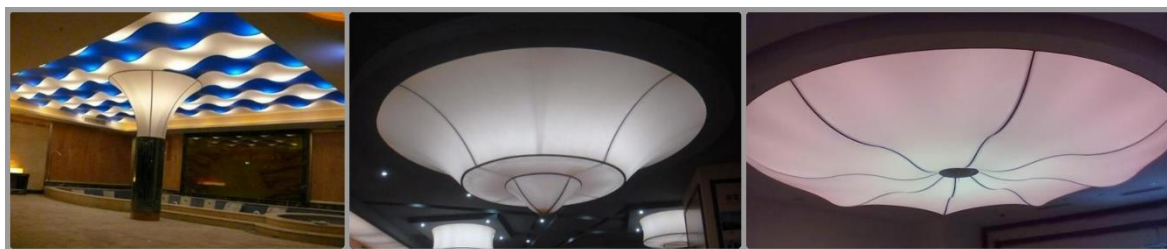


Fig. 8. Green Millenium Company's realizations. Left – theatre of Las Vegas Hotel, middle and right – membrane lamps.

Ryc. 8. Realizacje firmy Green Millenium. Po lewej – teatr hotelu w Las Vegas, środek i po prawej – lampy membranowe. Źródło: autorki

China Commercial TiO₂ coating PVC soft ceilings used as an element of lamp's structure can have purifying air functions. As international research shows 1,000 sq.mt TiO₂ membrane is equal to 100 trees. The indoor use of TiO₂ is still being tested, as the so far research shows, that the purification processes of TiO₂ are only achievable activated by the UV sunlight. In 2007, Professor Hashimoto led a joint project with industry funded by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) that made significant progress toward this goal. This project set the exceedingly ambitious goal of achieving a ten-fold increase in photocatalytic activity under visible light. Market research suggested that this level of activity would be necessary in order to use titanium dioxide in weak indoor light: a goal based on dialogue with the market from the start.

5. DISCUSSION

The widespread use of TiO₂ photocatalyst has become a common backbone of chemical and construction research in recent decades. In practice, this component, is increasingly used in the construction industry, entering into the finishing materials of facades of architectural structures. Historically, a milestone in research came with the discovery of the Honda-Fujishima effect (Hashimoto, Irie, Fujishima, 2005), which sparked widespread interest in the architectural community focused on environmentally friendly solutions. Current research is being conducted on the anti-aging properties of this ingredient, incorporated into the structure of various types of cladding stones (Munafò, Goffredo, Quagliarini, 2015). Additionally, its hydrophobic (Alfieri, Lorenzi, 2017) and antifouling (Ruggiero, Fidanza, 2020) properties are being widely tested, especially in coastal areas. However, in the architectural community, the most interesting research direction seems to be the one undertaken a decade ago - the search for solutions for the active purifying effect of TiO₂ under conditions devoid of UV radiation (*TiO₂ topped materials in-dark research*) (Graziani, Osimani, 2013; Jin, Saad, 2019). Achieving the full impact of TiO₂ under darkened conditions would significantly expand its fields of application to interiors requiring sterile maintenance, such as hospital rooms.

6. CONCLUSIONS

The proposed case study of architectural examples, shows a wide range of use of TiO₂ coated surfaces. Since the late 70s, this photocatalyst material is being researched and tested in the architectural usage, with some aging defects found at the beginning of current century (Chiesa di dio Padre Misericordioso in Rome). However, it's overall durability and dissemination shows a global interest in the usage of eco-friendly chemicals, which support the urban development towards a wellbeing of the citizens.

The widespread use of TiO₂-enriched building materials and coatings is showing a number of both environmental and architectural benefits. This photocatalyst effectively filters air from NoX contaminants, imparts self-cleaning properties to surfaces, and its activation processes intensify as the curvature of the surface becomes more complex. Despite the efficiency seen only in the white pigment, TiO₂ can be used in materials of varying flexibility, such as stretchable membranes, and new research shows that its photocatalytic processes already activate under visible light, not just UV light.

TiO₂ coatings help improve façade performance whilst offering environmental benefits to society. This study reports that ecological maintainability design criteria are vital requirements in designing sustainable buildings at the outset. The identified defects and issues will aid in ensuring the effectiveness of TiO₂ application in building façades.

However, studies show that activation of TiO₂'s photocatalytic processes only under UV irradiation limits its field of application in architecture. Obtaining similar interaction properties inside objects would allow enriching the benefits of TiO₂ properties. This component could in the future contribute to supporting sterilization processes in healthcare interiors, air purification processes in tunnels, bacteria and fungus leveling processes in public interiors, etc.

TECHNOLOGIE TiO_2 W ARCHITEKTURZE NA RZECZ CZYSTEGO POWIETRZA W MIEŚCIE

1. WPROWADZENIE

Szybka urbanizacja oraz rosnąca liczba megamiast i zespołów miejskich wpłynęła na naukowe poszukiwania nowych rodzajów badań i usług, w celu szerszego wykorzystania nowych technologii budowlanych i projektowych. Globalna mapa zanieczyszczenia powietrza wykazuje aż 2 000 miast narażonych na wysoki poziom parametrów zanieczyszczonego powietrza. Stężenia $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} i NO_2 w otoczeniu są aktualnie największym środowiskowym zagrożeniem dla zdrowia na świecie, odpowiedzialnym za miliony przedwczesnych zgonów każdego roku. Zanieczyszczenie powietrza można zdefiniować jako zjawisko, w którym różne substancje, które normalnie występują w powietrzu, znajdują się poza określonymi limitami, a substancje, które nie powinny znajdować się w powietrzu, występują w ilości niebezpiecznej dla ludzi, roślin, zwierząt i środowiska (Cavkaytar, Soyer, Şekerel, 2013).

Jakość powietrza w dużych miastach jest wynikiem złożonej interakcji pomiędzy naturalnymi i antropogenicznymi warunkami środowiska. Zanieczyszczenie powietrza w obszarach wysoko zurbanizowanych jest poważnym problemem środowiskowym budzącym niepokój na całym świecie. Choć miasta zajmują około 2% powierzchni globu, są odpowiedzialne za 70% globalnego zużycia energii, 75% globalnego zużycia zasobów naturalnych i 80% całkowitej emisji zanieczyszczeń (Masson-Delmotte i in., 2018). Obszary miejskie są odpowiedzialne za generowanie odpadów toksycznych i stałych, a także za zanieczyszczenie powietrza, ponieważ generowanie odpadów odbywa się w przybliżeniu równoległe do zużycia zasobów. Uważa się, że globalna populacja osiągnie 8 miliardów do 2025 roku. Uważa się również, że ludność ta będzie zamieszkiwać głównie obszary metropolitalne. Ten wzrost ryzyka wynika z modelu ryzyka Global Burden of Disease, który został opracowany na podstawie dziesiątek badań epidemiologicznych na całym świecie, obejmujących dane pozyskane wśród milionów ludzi (Stanaway, Murray, Afshin, 2018, s. 1923-1994).

W środowisku architektonicznym, odpowiedzią na aktualne zagrożenia wynikające z postępujących procesów zanieczyszczenia powietrza jest od kilku dekad praktyczne stosowanie fotokatalizatora TiO_2 . Dwutlenek tytanu stanowi skuteczny składnik chemiczny do oczyszczania wody i powietrza oraz do samooczyszczania powierzchni. Dodatkowo może być stosowany jako środek antybakteryjny ze względu na silną aktywność utleniania i super hydrofilowość (Zaleska, 2008).

2. MATERIAŁY I METODY

Badania auterek koncentrowały się na nowej możliwości rozwiązania problemu oczyszczania powietrza w dużych miastach poprzez zaawansowane projektowanie architektoniczne przestrzeni użytku publicznego w środowisku miejskim. Badania wykazały, że skład i źródła PM i NO_2 są silnie uzależnione od lokalizacji, obciążenia ruchem drogowym, wykorzystania paliw kopalnych i działalności przemysłowej w miejscach pobierania próbek. Postępująca degradacja klimatu odgrywa kluczową rolę w powstawaniu i ewolucji zanieczyszczeń powietrza.

Przykłady architektoniczne, w których zastosowano fotokatalizator TiO_2 , zostały wybrane na podstawie spełnienia głównych właściwości tego składnika (Rys. 1). Aktywacja wykazanych właściwości następuje pod wpływem promieniowania UV, a ich intensyfikacja wzrasta wraz z postępowaniem złożoności geometrycznej struktury, na którą TiO_2 został naniesiony, np. w postaci farby powłokowej.

Głównym celem programu badań projektowych było zademonstrowanie nowych możliwości zastosowania światłoaktywnych materiałów budowlanych, w tym zmodyfikowanych fotokatalizatorów TiO_2 jako surowca do syntezy N i/lub C . Cele badań zostały osiągnięte w oparciu o metodę studium przypadku na światowych, architektonicznych przykładach. Zastosowanie TiO_2 jako składnika materiałów budowlanych w badanych obiektach miało konsekwencje środowiskowe, ale także wpływ na starzenie się tych materiałów. Składnik TiO_2 jest obecnie szeroko eksplorowany w ramach rynku budowlanego i instytucji badawczych. Spełnia on kryteria innowacyjnego związku stosowanego

w budownictwie, zapewniając możliwości kreowania wielopłaszczyznowych struktur, a jednocześnie obniżając koszty i będąc przyjaznym dla środowiska. Prezentowane badania pokazują architektoniczne podejście do upowszechniania wiedzy i popularyzacji technologii wspierających poprawę jakości powietrza w miastach.

3. GLOBALNE SKAŻENIE POWIETRZA

Istnieją trzy główne zanieczyszczenia związane ze złym stanem zdrowia w miastach:

- 1) NO₂ (dwutlenek azotu), zwykle występujący na obszarach o dużym natężeniu ruchu samochodowego. Narażenie na NO₂ jest związane z szeregiem szkodliwych skutków zdrowotnych, w tym z rozwojem narządów i układu nerwowego w czasie ciąży, wczesnym początkiem astmy u dzieci i spadkiem wydolności płuc u starszych osób.
- 2) PM_{2.5} lub cząstki stałe, takie jak sadza, dym, kurz i kropelki cieczy o średnicy mniejszej niż 2,5 mikrometra; te małe cząstki są szczególnie ważne dla naszego zdrowia, ponieważ mogą dostać się do krwioobiegu i osadzić się głęboko w naszych organach.
- 3) PM₁₀ to większe cząstki niż PM_{2.5}, pochodzące z podobnych źródeł. PM wszystkich rozmiarów został powiązany z przewlekłym zapaleniem oślnoustrojowym i jest związany z podobnymi zagrożeniami dla zdrowia, w tym rozwojem płuc w czasie ciąży i wczesnego dzieciństwa, jak również spadkiem funkcji płuc u starszych dorosłych (Yatkin, Bayram, 2007, str. 126-139).

Raport EEA nr 09/2020 (Air quality in Europe-2020 report) przedstawia zaktualizowany przegląd i analizę jakości powietrza atmosferycznego (zewnętrznego) w Europie i koncentruje się na stanie jakości powietrza. Dane te pokazują, że zanieczyszczenie powietrza nadal ma znaczący wpływ na zdrowie ludności europejskiej, szczególnie na obszarach miejskich. Najpoważniejsze zanieczyszczenia w Europie, pod względem szkodliwości dla zdrowia ludzi, to pył zawieszony (PM), NO₂ i ozon przyziemny (O₃). Niektóre grupy ludności są bardziej dotknięte zanieczyszczeniem powietrza niż inne, ponieważ są bardziej narażone lub podatne na zagrożenia środowiskowe (Raport EEA). Ponieważ katalizator TiO₂ jest nowym pierwiastkiem chemicznym dostępnym na rynku budowlanym i dopiero od 10 lat poddawany jest licznym badaniom naukowym, jego zastosowanie w architekturze jest wciąż eksperymentalne. Obecnie prowadzone są badania m.in. nad wpływem kąta nachylenia powierzchni pokrytej farbą TiO₂ na jej właściwości filtracyjne.

4. WSPÓŁCZESNE METODY UŻYCIA TiO₂ W ARCHITEKTURZE

Dwutlenek tytanu (TiO₂) jest naturalnie występującym tlenkiem tytanu. Jest on wykorzystywany w wielu zastosowaniach związanych z pigmentami (np. jako biały pigment w farbach, bloker UV w filtrach przeciwsłonecznych, barwnik spożywczy itp.). TiO₂ jest również silnym fotokatalizatorem i może przyspieszyć naturalne, ale powolne utlenianie substancji organicznych w obecności światła i wody. Specjalistyczny fotoaktywny TiO₂ jest już stosowany w szerokiej gamie produktów fotokatalitycznych, w tym w samoczyszczących się oknach (Pilkington NSG - ActivTM, Saint-Gobain – Bioclean, PPG - Sunclean), samoczyszczących się płytkach (TOTO – Hydrotect) i urządzeniach do oczyszczania powietrza (Hoover, electriQ, De'Longhi, Green UV itp.). Obecny światowy rynek kompozycji fotokatalitycznych wynosił 1,5 mld USD w 2014 r. i przewiduje się, że w ciągu najbliższych pięciu lat będzie rósł ze złożoną roczną stopą wzrostu na poziomie 12,6% (Raport Towards Purer Air).

Fotokatalizatory na bazie TiO₂, pod wpływem promieniowania słonecznego, mogą utleniać i degradować większość przenoszonych przez powietrze zanieczyszczeń miejskich, takich jak tlenki azotu (NO_x) czy lotne związki organiczne (VOC). Dytlenek tytanu (TiO₂) cieszy się dużym zainteresowaniem od 1972 roku, kiedy to Fujishima i Honda odkryli fotokatalityczny rozdział wody na elektrodzie TiO₂ pod wpływem promieniowania ultrafioletowego (UV) (Guan, 2005, s.35-49) (Rys.2).

Ponadto, tak długo jak fotokatalizator jest wystawiony na działanie promieniowania UV, reakcja fotochemiczna światło UV/TiO₂ kontynuuje wyzwalanie składników utleniających i redukujących w nie-

skończoność. Dwutlenek tytanu (TiO_2) jest nietoksycznym materiałem szeroko stosowanym w produktach i farbach jako biały pigment. Podczas produkcji betonu fotokatalitycznego miesza się konwencjonalny cement portlandzki, piasek krzemionkowy, kruszony kamień i wodę - ale dodatek dwutlenku tytanu (TiO_2) na poziomie 3-5% nadaje betonowi właściwości fotokatalityczne (Fox, Nikolov, 2014). Uniwersytet Technologiczny w Eindhoven opracował sposób zastosowania TiO_2 w płytkach chodnikowych, czyniąc je "chodnikami fotokatalitycznymi". Koncepcja ta może zmniejszyć smog w miastach o 19 do 45 procent, w zależności od warunków atmosferycznych.

Studenci z University of California Riverside wykorzystali podobną koncepcję wykorzystania ditlenku tytanu na powierzchniach wystawionych na oddziaływanie promieni UV, pokrywając ditlenkiem tytanu dachówki. Ten materiał budowlany absorbuje światło słoneczne przez cały dzień usuwając zanieczyszczenia z powietrza.

Pierwsze opatentowane testy TiO_2 w materiałach budowlanych (kompozycje białego cementu) pojawiły się w latach 90. i na początku 21. wieku. W Europie od 2000 roku zaprojektowano i wybudowano kilka budynków z wykorzystaniem fotokatalitycznych materiałów cementowych, w tym Kościół Boga Ojca Miłosiernego (Chiesa di Dio Padre Misericordioso) w Rzymie (Rys.3).

Jak wynika z nowych badań, po 16 latach od wzniesienia budynku, właściwości samoczyszczące i zachowujące kolor, wynikające z obecności cząstek tytanu (TiO_2) w mieszance betonowej, nie spełniają wymogów projektowych, a beton wykazuje przedwczesne oznaki rozkładu. Wyniki badań wskazują na bezpośredni związek pomiędzy wzorcem starzenia a utlenianiem fotokatalitycznym oraz geometrią budynku i niedostatecznym uwzględnieniem lokalnych warunków klimatycznych na etapie projektowania. Badania w zakresie rozwoju wydajnych materiałów fotokatalitycznych wskazują na znaczne postępy technologiczne w ciągu ostatnich dwóch dekad. Ponadto, badania te dały możliwość sprawdzenia trwałości i skuteczności TiO_2 w rzeczywistych warunkach na zrealizowanym budynku o niestandardowej geometrii (Cardellicchio, 2020).

Fasada o powierzchni 2500 m² w Torre de Especialidades (Rys.4) to 100-metrowy, zakrzywiony ekran wzdłuż Avenida San Fernando, ruchliwej arterii w Tlalpan, w południowej dzielnicy miasta Meksyk. Fasada typu Prosolve została wybrana częściowo ze względu na jego antybakteryjne, oczyszczające działanie, jak również zapewnienie wizualnej złożoności, zapadającej w pamięć formy. Fasada budynku została zaprojektowana w strukturze geometrycznej sieci płytek o strukturze plastra miodu i zastosowana w formie podwójnej powłoki, aby uzyskać większą powierzchnię (2.500). Struktura ta podwaja m² powierzchnię w porównaniu do formy płaskiej (Lee, Kyung, Kim, Kim, 2019).

Aktualnie miasto wykazuje jedno z najwyższych, światowych wskaźników skażenia powietrza na poziomie 137 jednostek PM₂ (ponad 9 razy więcej niż przewidywany limit) (IQAir, 2022). Według ostatnich badań nad tą technologią, fasada w Torre de Especialidades znacząco redukuje zanieczyszczenia emitowane przez 1000 samochodów dziennie.

Palazzo Italia zaprojektowane na Światowe Targi Expo 2015 w Mediolanie jest jednym z pierwszych budynków na świecie, w którym zastosowano cement mogący oczyszczać powietrze. Firma Italcementi, która opracowała cement, potrzebowała nie więcej niż 12 500 godzin badań, aby wyprodukować materiał, który był wystarczająco mocny i elastyczny, aby można go było wykorzystać do budowy. Na bazie cementu włoska firma budowlana opracowała "biodynamiczny" materiał budowlany w postaci zaprawy, który jest w stanie automatycznie usuwać zanieczyszczenia z powietrza. W Palazzo Italia zużyto ponad 2200 ton nowego cementu, który został odlany w płyty, dla pokrycia fasady zewnętrznej i części wnętrza charakterystycznego budynku (Januszkiewicz, Kowalski, 2019)(Rys.5).

Zaprawa, która powstała z przetworzonych skrawków marmuru i kruszywa, pochłania tlenek ni-tro-genu oraz zanieczyszczenia siarkowe i przekształca je w nieszkodliwe sole. Do reakcji chemicznej wykorzystuje się właśnie katalizator tytanowy, który jest aktywowany przez światło ultrafioletowe. Sole następnie zmywane są ze ścian podczas deszczu (Borgogello, 2015).

Organiczny kształt siedziby rafinerii Tupras koło Izmiru (Rys.6) pozwolił firmie wykorzystać wszystkie możliwości wpływu TiO_2 poprzez różne kąty padania światła słonecznego. Korzystanie z Çimsa – samooczyszczającego białego cementu w panelach GRC było bezpośrednio związane z warunkami

zastosowania – krzywoliniowymi powierzchniami obiektu. W dużych miastach o gęstej populacji stężenie zanieczyszczeń na poziomie ulicy jest dość wysokie, ponieważ rozproszenie spalin generowanych przez dużą liczbę pojazdów jest utrudnione przez otaczające wysokie budynki. Betonowe powierzchnie chodników i zewnętrzne powierzchnie budynków są optymalnym medium do nakładania materiałów fotokatalitycznych, ponieważ stosunkowo płaska konfiguracja materiałów budowlanych może ułatwić ekspozycję fotokatalizatora na światło słoneczne. Wpływem promieniowania słonecznego zanieczyszczenia gazowe mogą być degradowane na powierzchni materiałów budowlanych, które ostatecznie mogą być zmywane przez deszcz. Cały proces usuwania zanieczyszczeń napędzany jest wyłącznie energią naturalną (Delibas, Marasli, 2015).

Rejon Izmiru w Turcji, a szczególnie jego obszary przemysłowe wykazuje aktualnie skażenie powietrza 7 razy przewyższające dopuszczalne limity. Nowoczesny kształt siedziby firmy oraz zastosowanie innowacyjnego fotokatalizatora TiO_2 na powierzchni betonu podkreśla proekologiczne idee branży paliwowej.

W ciągu ostatnich dekad widoczne jest rozpowszechnianie TiO_2 jako komponentu wchodzącego w skład materiałów budowlanych innych niż beton. Samoczyszczące właściwości powierzchni pokrytych TiO_2 pozwalają na użycie tego fotokatalizatora jako warstwy paneli szklanych, membran, a nawet paneli aluminiowych (Rys.7). Na rysunku przedstawiono trzy sposoby wykorzystania TiO_2 jako powłoki w architekturze: membranowy dach dworca Tokio Grand, ceramiczne żebra z domieszką TiO_2 szpitala San Raffaele w Mediolanie oraz aluminiową fasadę budynku mieszkalnego Casalgrande Padana zaprojektowanego przez Daniela Libeskinda.

Aplikacja powłoki na powierzchnie szklane, metalowe i ceramiczne z TiO_2 została opatentowana pod nazwą HydroTect®. Powłoka HydroTect® zapewnia zdolność do oczyszczania powietrza poprzez neutralizację tlenków azotu w powietrzu, dodatkowo posiada zdolność do samooczyszczania się wodą deszczową. Fotokatalityczna okładzina o powierzchni 1000 m² posiada właściwości filtrujące powietrze równe 70 drzewom (Orhon, 2014).

W ciągu ostatnich dziesięcioleci przeprowadzono badania materiałów wykończeniowych do wnętrza pokrytych TiO_2 . Firma Green Millennium zajmuje się aktualnie wprowadzaniem na rynek USA materiałów wyposażenia wnętrz (Rys.8), których membrany zostały pokryte TiO_2 i wykazują bardzo wysokie właściwości oczyszczania powietrza w pomieszczeniach oraz aktywnie przyczyniają się do usuwania bakterii i nieprzyjemnych zapachów z pomieszczeń.

Miękkie powłoki China Commercial TiO_2 stosowane jako element struktury lampy lub sufitów podwieszanych wykazują funkcje oczyszczające powietrze. Jak pokazują międzynarodowe badania 1,000 m² membrany TiO_2 jest równa właściwościom filtrującym stu drzew.

5. DYSKUSJA

Powszechne zastosowanie fotokatalizatora TiO_2 stało się w ostatnich dziesięcioleciach powszechnym trzonem chemicznych i budowlanych. W praktyce, składnik ten, znajduje coraz szersze zastosowanie w budownictwie, wchodząc w skład materiałów wykończeniowych elewacji obiektów architektonicznych. Kamieniem milowym w badaniach było odkrycie efektu Hondy-Fujishimy (Hashimoto, Irie, Fujishima, 2005), które wywołało szerokie zainteresowanie środowiska architektonicznego ukierunkowanego na rozwiązania przyjazne środowisku. Obecnie prowadzone są badania nad właściwościami przeciwstarzeniowymi tego składnika, włączonego w strukturę różnego rodzaju kamieni okładzinowych (Munafò, Goffredo, Quagliarini, 2015). Dodatkowo szeroko testowane są jego właściwości hydrofobowe (Alfieri, Lorenzi, 2017) i przeciwporostowe (Ruggiero, Fidanza, 2020), zwłaszcza w geograficznych obszarach przybrzeżnych. W środowisku architektów najciekawszym kierunkiem badawczym wydaje się jednak ten podjęty dekadę temu - poszukiwanie rozwiązań dla aktywnego efektu oczyszczającego TiO_2 w warunkach pozbawionych promieniowania UV (*TiO₂ doped materials in-dark research*) (Graziani, Osimani, 2013; Jin, Saad, 2019). Osiągnięcie pełnego oddziaływania TiO_2 w warunkach zaciemnionych znacznie rozszerzyłoby pola jego zastosowania o wnętrza wymagające utrzymania sterylności, takie jak np. sale szpitalne.

6. WNIOSKI

Zaproponowane studium przypadku na przykładzie światowej architektury pokazuje szeroki zakres zastosowań powierzchni pokrytych TiO_2 . Od końca lat 70-tych ten materiał fotokatalityczny jest badany i testowany w zastosowaniach architektonicznych, z pewnymi wadami starzeniowymi stwierdzonymi na początku obecnego wieku (Chiesa di dio Padre Misericordioso w Rzymie). Jednakże jego ogólna trwałość i rozpowszechnienie wskazuje na globalne zainteresowanie wykorzystaniem ekologicznych substancji chemicznych, które wspierają rozwój miast w kierunku dobrobytu mieszkańców.

Powszechne stosowanie materiałów i powłok budowlanych wzbogaconych TiO_2 wykazuje szereg korzyści zarówno środowiskowych, jak i architektonicznych. Ten fotokatalizator skutecznie filtruje powietrze z zanieczyszczeń NoX , nadaje powierzchniowi właściwości samooczyszczające, a procesy jego aktywacji nasilają się wraz ze wzrostem krzywizny powierzchni. Pomimo efektywności widocznej tylko w białym pigmentcie, TiO_2 może być stosowany w materiałach o różnej elastyczności, takich jak rozciągliwe membrany, a nowe badania pokazują, że jego procesy fotokatalityczne aktywują się już w świetle widzialnym, a nie tylko promieniach UV.

Powłoki TiO_2 pomagają poprawić parametry elewacji, oferując jednocześnie korzyści środowiskowe dla społeczeństwa. W niniejszym opracowaniu wykazano, że ekologiczne kryteria projektowe dotyczące łatwości utrzymania są istotnymi wymogami przy projektowaniu zrównoważonych budynków na samym początku. Badania pokazują, że pokrycie TiO_2 krzywoliniowych obiektów architektonicznych daje najlepsze efekty czyszczące.

Badania wykazują jednak, że aktywacja procesów fotokatalitycznych TiO_2 jedynie w warunkach nasłonecznienia promieniowaniem UV ogranicza jego pole zastosowania w architekturze. Uzyskanie podobnych właściwości oddziaływania wewnątrz obiektów pozwoliłoby na wzbogacenie benefitów płynących z właściwości TiO_2 . Komponent ten może w przyszłości przyczynić się do wspomagania procesów sterylizacyjnych we wnętrzach służby zdrowia, procesów oczyszczania powietrza w tunelach, procesów niwelujących bakterie i grzyby we wnętrzach użyteczności publicznej etc.

REFERENCES

- Air quality in Mexico, <https://www.iqair.com/us/mexico/mexico-city> Accessed 14.11.2022.
- Alfieri I., Lorenzi A., Ranzenigo L., Lazzarini L., Predieri G., Lottici P.P. (2017). *Synthesis and characterization of photocatalytic hydrophobic hybrid TiO_2 - SiO_2 coatings for building applications*, Building and Environment, Volume 111, Pages 72-79, ISSN 0360-1323.
- B. Borgogello, *Palazzo Italia to get air purifying for EXPO 2015*, New Atlas, Architetcure.com. Accessed:12.11.2022.
- Cardellicchio, L. (2020). Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: Case study of the Jubilee Church in Rome. *Building Research & Information*, 48(2), 160-179.
- Cavkaytar, Ö.; Soyer, Ö.U.; Şekerel, B.E. *Türkiye’de Hava Kirliliğinden Kaynaklanan Sağlık Sorunları*. Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi 2 (2013), pp. 105–111.
- Delibas, T., Marasli M. (2015). Self-cleaning and air purifying cement based GRC panels used in Tüpraş Rub project.
- EEA Report No 09/2020. Air quality in Europe — 2020 report. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020. doi:10.2800/786656.
- Graziani L., Quagliarini E., Osimani A., Aquilanti L., Clementi F., Yéprémian C., Lariccio V., Amoroso S., D’Orazio M., Evaluation of inhibitory effect of TiO_2 nanocoatings against microalgal growth on clay brick façades under weak UV exposure conditions, *Building and Environment*, Volume 64, 2013, Pages 38-45, ISSN 0360-1323.
- Guan, K. Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ films. *Surface and Coating Technology 2005*, vol.191, 2-3, pp. 155–160.
- Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO_2 photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, 44(12R), 8269.

- Januszkiewicz, K., Kowalski, K. G. (2019, September). *Air Purification in Highly-Urbanized Areas with Use TiO₂: New Approach to Design the Urban Public Space to Benefit Human Condition*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 603, No. 5, p. 052071). IOP Publishing.
- Jin, Q., Saad, E. M., Zhang, W., Tang, Y., & Kurtis, K. E. (2019). Quantification of NO_x uptake in plain and TiO₂-doped cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 122, 251-256.
- Lee, S., Kyung, D., Kim, J., & Kim, Y. (2019). Characteristics and Reducing Methods of Urban Particulate Matter, 19(5), 11-16.
- Masson-Delmotte V.; Zhai P.; Pörtner H.O.; Roberts D.; Skea J.; Shukla P.R.; Pirani A.; Moufouma-Okia W.; Péan C.; Pidcock R.; Connors S.; Matthews J.B.R.; Chen Y.; Zhou X.; Gomis M.I.; Lonnoy E.; Maycock T.; Tignor M., and Waterfield T. (eds.), IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 2018. In Press.
- Munafò, P., Goffredo, G. B., Quagliarini, E. (2015). TiO₂-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: An overview. *Construction and Building Materials*, 84, 201-218.
- Nikolov, N., Fox, J. T. (2014). Clean by Concrete: Use of Photocatalytic Concrete enables Buildings to be Passive Environmental Remediators. *Research Journal of Engineering Sciences* ISSN, 2278, 9472.
- Orhon, A. V. (2014). Sürdürülebilir çatı ve cephe sistemleri, 7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, 3– 4 Nisan, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ruggiero, L., Fidanza, M. R., Iorio, M., Tortora, L., Caneva, G., Ricci, M. A., & Sodo, A. (2020). Synthesis and characterization of TEOS coating added with innovative antifouling silica nanocontainers and TiO₂ nanoparticles. *Frontiers in Materials*, 7, 185.
- Stanaway, J.; Murray, Ch.J.L.; Afshin A. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioral, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the GBD Study 2017. *The Lancet*; 2018, 8, vol. 392, pp. 1923–1994.
- Towards Purer Air: A review of the latest evidence of the effectiveness of photocatalytic materials and treatments in tackling local air pollution. EIC – Environment Innovation Business. <https://eic-uk.co.uk/media/baec-bnd4/towards-purer-air.pdf> Accessed 10.11.2022.
- Yatkin, S.; Bayram, A. Elemental composition and sources of particulate matter in the ambient air of a Metropolitan City. *Atmospheric Research*, 2007, Vol. 85, issue 1, pp. 126-139.
- Zaleska, A. (2008). Doped-TiO₂: a review. *Recent patents on engineering*, 2(3), 157-164.

AUTHOR'S NOTE

Meryem Alagöz - Research Assistant Doctor in the Faculty of Fine Arts and Architecture of Necmettin Erbakan University in Konya. Her research field includes; architectural building design, building physics, energy efficiency in building design, sustainable architecture and energy issues in architecture.

Anna Pazdur-Czarnowska – Master of Arts, lecturer and research assistant at the Faculty of Architecture at West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Department of Theory and History of Architecture. Her research field includes public space design with the use of Human-Computer interaction technologies, Artificial Intelligence implementation in architecture, sustainable and wellbeing architecture.

Contact | Kontakt: meryemalagoz@gmail.com; Anna.Pazdur-Czarnowska@zut.edu.pl