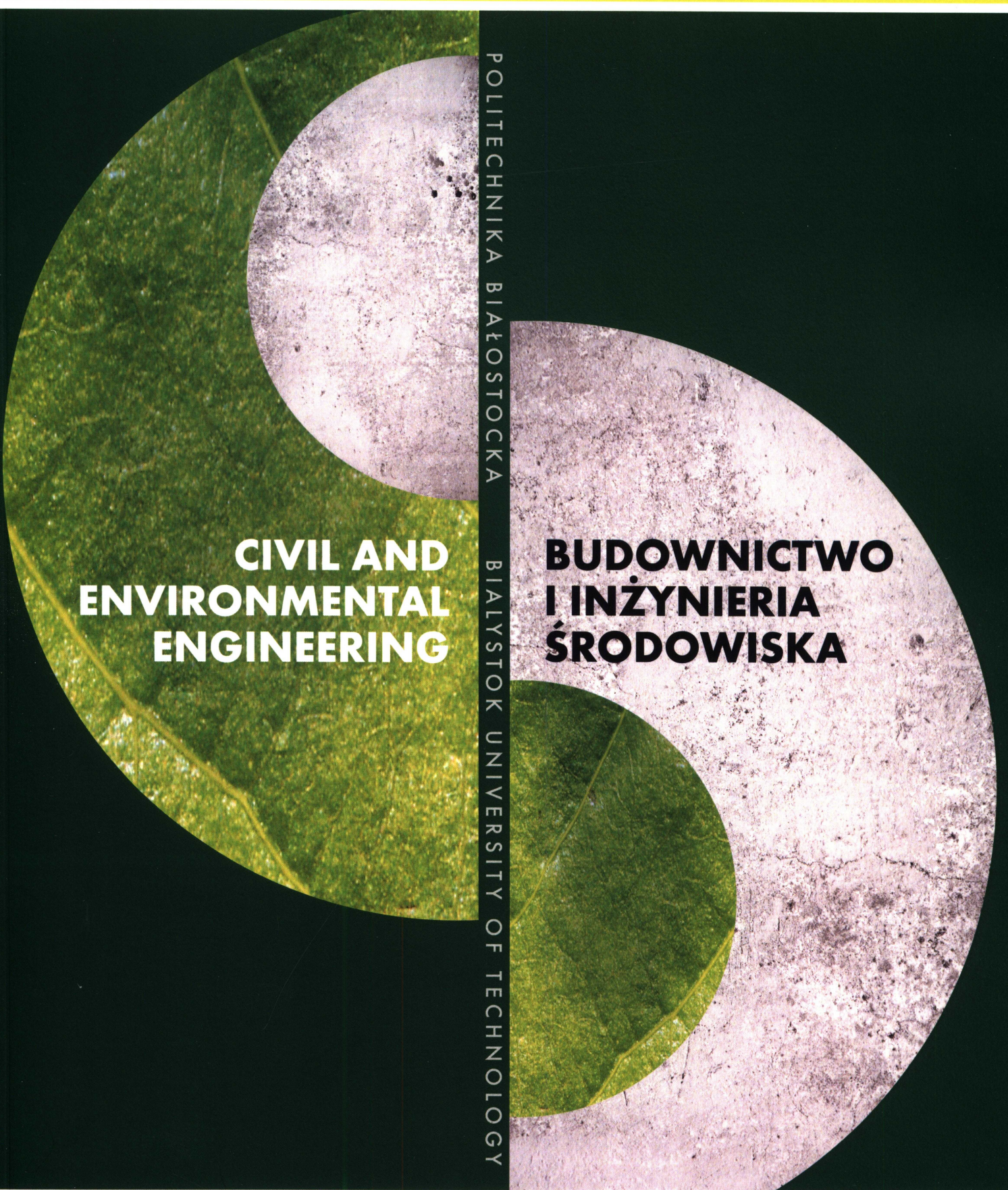


POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

**BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA**



POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA

Spis treści

Mariusz ADAMSKI, Piotr BARA

Badanie charakterystyk turbiny wiatrowej

Research on the characteristics of the wind turbine 61

Aleksandra GOŁONKO, Marzena MATEJCZYK

Dwa oblicza selenu. Wybrane aspekty aktywności biologicznej selenu

Two faces of selenium selected aspects of selenium biological activity 65

Katarzyna MISIOŁEK

Rola bakterii ureolitycznych w procesach biocementacji gruntów – aktualny stan badań

Role of urease active bacteria in the processes of soil biocementation..... 75

Jakub SIEMIENUK, Ewa SZATYŁOWICZ

Zmniejszenie emisji CO₂ w procesie produkcji cementu

Reducing CO₂ emissions in the process of cement production..... 81

Aleksandra ŚLIWIŃSKA

Sposoby ograniczenia hałasu emitowanego do środowiska przez transport lotniczy

Solutions to decrease the noise emitted by air transport to environment..... 89

Dariusz TOMASZEWICZ, Jerzy OBOLEWICZ

Badania diagnostyczne zbrojenia próbek betonowych w kontekście bezpiecznej eksploatacji wielkopłytowych obiektów budowlanych

Reinforcement diagnostic test of concrete samples in the context to the safe exploitation prefabricated building objects..... 97

Abstracts

Vol. 9 No. 2

Mariusz ADAMSKI, Piotr BARA

Research on the characteristics of the wind turbine

The paper concerns the topic of using wind turbines to produce electricity. Main attention was focused on showing the method of researching the basic characteristics of the model wind turbine: power characteristic as a power of the device to the wind speed ratio and power characteristic as a power of the device to the inclination of blade angle ratio. In addition, some dependencies have been defined: dependence of rotational speed of the wind turbine on a speed of flowing air, and dependence of rotational speed of the wind turbine on an inclination of the blade angle. The measurements required for this purpose were carried out in an aerodynamic tunnel at the Laboratory of Renewable Energy Sources of the Białystok University of Technology.

Aleksandra GOŁONKO, Marzena MATEJCZYK

Two faces of selenium. Selected aspects of selenium biological activity

Studies of recent years indicate the very valuable properties of selenium in medical field. The interest in selenium has increased since we learned the methods of its determination in biological samples and its role in living organisms. Selenium, depending on the concentration, has antioxidant and prooxidative properties. In addition, in animal studies and human and animal cell lines, it exhibits anti-cancer properties. In the era of increased incidence of human and animal cancer, selenium is very popular among scientists around the world due to its high biological activity. Current research results highlight the various effects of selenium molecular activity. One of the main mechanisms of action of this element is active participation in the protection of cells against the effects of oxidative stress. The review presents the general properties of selenium, its biological activity and the current state of knowledge about its potential anticancer activity. Also, known molecular mechanisms of selenium activity in a living cell are mentioned.

Katarzyna MISIOŁEK

Role of urease active bacteria in the processes of soil biocementation

The aim of the paper is to present and describe the use of microbially induced calcite precipitation process (MICP). The basis of MICP process is bacterial metabolic activity which thereby promotes the precipitation of calcium carbonate in the form of calcite. Ureolytic bacteria that hydrolyze urea, proved to be the most effective to perform precipitation of calcium carbonate. Therefore their application seems to be beneficial in the processes biocementation of soils. The paper presents the methods of obtaining the urease active bacteria and describes laboratory methods in order to achieve the best strength parameters of tested soil.

Jakub SIEMIENUK, Ewa SZATYŁOWICZ

Reducing CO₂ emissions in the process of cement production

Emissions of carbon dioxide (CO₂) from fossil fuels and industry account for around 90% of all CO₂ emissions from human activities. Over the last three years, global CO₂ emissions have remained stable despite steady growth in the global economy. In 2017, Forecasts show an increase in emissions by 2.0% from the level of 2016, reaching a record level of 36.8 ± 2 Gt CO₂ emissions. Further economic simulations are likely to further increase emissions in 2018 (Jackson et al 2017). Considering the fact that over 5% of global CO₂ emissions are emissions from the cement industry, the aim of the work was to determine the fuel and ecological benefits resulting from the use of alternative fuels in the cement industry. The article discusses the properties of selected alternative fuels used in cement kilns as a source of heat in co-firing with coal. The use of combustible waste fractions as alternative fuels causes a reduction in their quantity in landfills, which in turn results in a reduction of CO₂ emissions, as waste incineration in cement plants does not increase the amount of CO₂ emitted.

Aleksandra ŚLIWIŃSKA*Solutions to decrease the noise emitted by air transport to environment*

The air transport as well as the service provided at airports is responsible for noise emission to the local environment, which hinders the functioning and living, of both, people and animals. The paper shows the potential solutions aimed at reducing the emission of high sounds to the environment, which are primarily caused by aircraft, as well as the activities and functioning of airports. The conducted research has shown that there are numerous solutions which may lead to decrease of the noise emission. Just the introduction and use of new technologies, as well as technological solutions have an impact on the reduction of noise, both in an active and passive way. Undoubtedly both have an impact on its reduction and entails a reduction of its negative impact on the local environment. The aim of this study was to characterize the methods, the solutions which can be use either at airports, or in their surroundings or in aircraft's construction, which allows to reduce the noise emission to the local environment by air transport. The article is a response to the research problem, which was.

Dariusz TOMASZEWICZ, Jerzy OBOLEWICZ*Reinforcement diagnostic test of concrete samples in the context to the safe exploitation prefabricated building objects*

The paper presents one of the diagnostics systems for building objects by means of profometers. Three-layer samples were made to reproduce three-layer external walls in large-panel buildings. Next three-layer samples and a long window sill in the construction wall of a large-panel building were tested. The thickness of the cover, the diameter of the hanger bars and the degree of corrosion of the reinforcement were assessed. The application of research results in practice will allow further safe exploitation of large-panel construction works.

BADANIE CHARAKTERYSTYK TURBINY WIATROWEJ

Mariusz ADAMSKI*, Piotr BARA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Celem badań było wyznaczenie podstawowych charakterystyk modelowej turbiny wiatrowej, do których należą charakterystyka mocy turbiny w funkcji prędkości strumienia przepływającego powietrza oraz charakterystyka mocy turbiny dla różnych kątów nachylenia łopat wirnika. Dodatkowo wyznaczone zostały zależności prędkości obrotowej turbiny od prędkości strumienia przepływającego powietrza przy stałym kącie nachylenia łopat turbiny, a także prędkości obrotowej turbiny od kąta nachylenia łopat przy stałej prędkości przepływającego powietrza. Pomiary wykonano w tunelu aerodynamicznym w Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii Politechniki Białostockiej.

Słowa kluczowe: energia odnawialna, energia wiatru, turbiny wiatrowe.

1. Zasoby energii wiatru w Polsce

Energetyka wiatrowa jest najbardziej dynamicznie rozwijającym się sektorem energetyki odnawialnej zarówno w Europie, jak i na świecie. Polska należy do krajów o korzystnych do rozwoju energetyki zasobach wiatru, porównywalnych do Niemiec (Soliński, 1999). Jednak jak dotychczas w Polsce zainstalowano moc jedynie około 300 MW, natomiast w Niemczech ponad 20 000 MW (Soliński i in., 2008).

Sporządzone przez specjalistów z UE ekspertyzy dotyczące ocen możliwości rozwoju energii uzyskiwanej z wiatru w Polsce wykazały, iż poziom mocy zainstalowanej w roku 2050 może osiągnąć nawet 5 000 MW (Korban, 2010). Do szybkiego rozwoju energetyki wiatrowej nie są przystosowane również przesyłowe sieci elektroenergetyczne (Napieraj i Stańczak, 2013). Stąd szczególnego znaczenia nabierają turbiny wiatrowe o niedużych mocach do około 10 kW pracujące na potrzeby poszczególnych gospodarstw domowych.

2. Turbiny wiatrowe

Turbina wiatrowa to urządzenie techniki wiatrowej służące do konwersji energii kinetycznej wiatru na pracę mechaniczną w postaci ruchu obrotowego wirnika. Według kryterium zasady działania można wyróżnić (Sorko i Teleszewski, 2014):

- maszyny rotodynamiczne,
- maszyny naporowe.

Dokonuje się też podziału urządzeń ze względu

na położenie osi wirnika względem kierunku strumienia powietrza (Tytko, 2009):

- turbiny o osi pionowej,
- turbiny o osi poziomej.

Praca turbin rotodynamicznych zachodzi dzięki występowaniu siły nośnej. Wierzchnia część strugi powietrznej opływająca górną powierzchnię skrzydła musi przebyć większą drogę niż dolna część. Wobec tego, opływające wierzchni płat powietrze porusza się szybciej, generując w ten sposób obszar obniżonego ciśnienia względem dolnej części płata. Różnica ciśnienia między dolną częścią skrzydła a górną pomnożona przez pole powierzchni jest siłą nośną (Sorko i Teleszewski, 2014). Wykorzystanie turbin wiatrowych do produkcji energii elektrycznej niesie szereg korzyści. Eksploatacja energii wiatru nie zanieczyszcza środowiska naturalnego, a jej zasoby są bezpłatne oraz powszechnie dostępne. Produkcja energii elektrycznej z energii wiatru redukuje ilość energii elektrycznej wytworzonej z jej konwencjonalnych źródeł. Przekłada się to między innymi na zmniejszenie zjawiska smogu czy występowania kwaśnych deszczy, a także redukcję efektu cieplarnianego (Boczar, 2008). Ponadto zaletą jest możliwość lokalizowania instalacji wiatrowych na obszarach uznawanych za nieużytki, jak pustynie, obszary skaliste czy wybrzeża (Gronowicz, 2010).

3. Badanie charakterystyk turbiny wiatrowej

W ramach przeprowadzonych laboratoryjnie badań wyznaczone zostały dwie charakterystyki modelowej turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu:

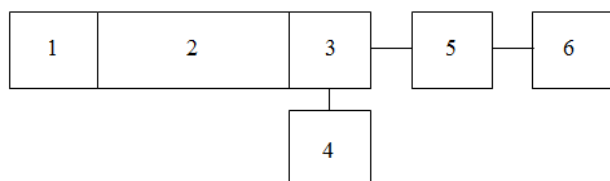
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mariusz.adamski@pb.edu.pl

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: p.bara@wp.pl

- charakterystyka mocy turbiny wiatrowej P w funkcji prędkości strumienia przepływającego powietrza v ,
- charakterystyka mocy turbiny wiatrowej P dla różnych kątów nachylenia łopat wirnika.

3.1. Stanowisko badawcze

Najistotniejszymi elementami stanowiska badawczego (rys. 1) są: zintegrowana konstrukcja tworzona przez wentylator (1), tunel aerodynamiczny wyposażony w rurkę Pitota (2), modelowa turbina wiatrowa (3) oraz jednostka INIT1 (4), a także jednostka sterująca (5) i komputer (6).



Rys. 1. Schemat powiązań poszczególnych elementów stanowiska badawczego, gdzie: 1 – wentylator, 2 – tunel aerodynamiczny z rurką Pitota, 3 – modelowa turbina wiatrowa, 4 – jednostka INIT1, 5 – jednostka sterująca, 6 – komputer

3.2. Wyznaczenie charakterystyki mocy turbiny w funkcji prędkości wiatru

Charakterystyka mocy turbiny wiatrowej w funkcji prędkości wiatru to jedna z ważniejszych charakterystyk elektrowni wiatrowych. Do jej wyznaczenia w tunelu aerodynamicznym przyjęto stały kąt nachylenia łopat wirnika względem osi strumienia napływającego powietrza, wynoszący 60° . W ramach przeprowadzonego eksperymentu wyznaczona została także zależność prędkości obrotowej turbiny od prędkości strumienia powietrza.

3.3. Prezentacja i analiza wyników

Przedstawione poniżej wielkości wyznaczono z następujących wzorów:

- moc modelowej turbiny wiatrowej (Osiowski i Szabatin, 1992):

$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad (1)$$

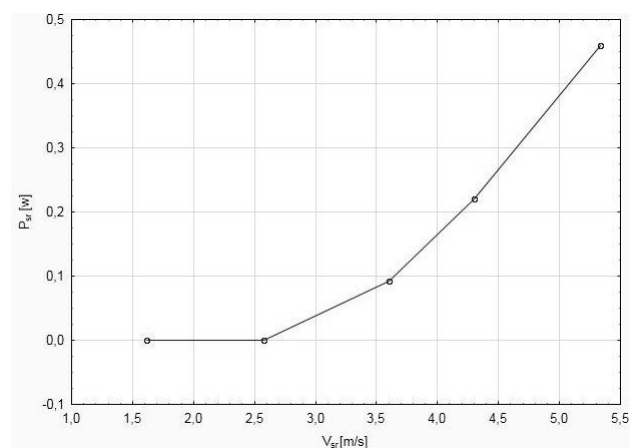
gdzie: U jest napięciem w V, a I jest natężeniem prądu w A.

Uzyskane wyniki pomiarów zaprezentowano w tabeli 1 oraz na rysunkach 2 i 3.

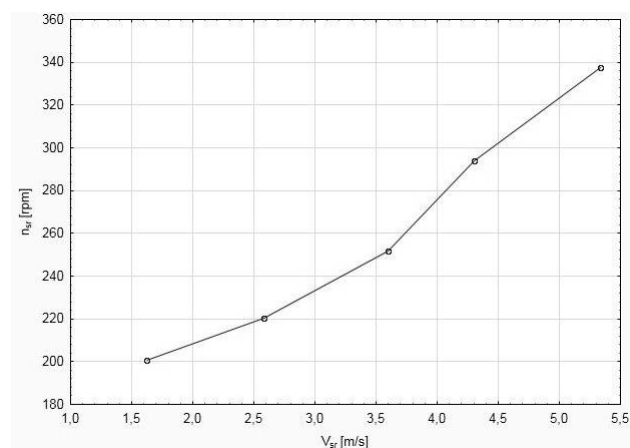
Na wykresie charakterystyki $P=f(v)$ (rys. 2) widać, że moc modelowej turbiny wyraźnie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości zadanego strumienia powietrza. W badanym zakresie prędkości zadanego strumienia powietrza, to jest 1,62-5,34 m/s osiągnięte zostało maksimum dla $P_{(5,34)} = 0,46$ W. Niższe zadane prędkości strumienia powietrza mieszczące się w zakresie 1,62-2,58 m/s skutkowały brakiem napięcia elektrycznego. Należy stwierdzić, że w warunkach przeprowadzanego doświadczenia nie została ustalona maksymalna moc badanej turbiny oraz optymalna

Tab. 1. Zestawienie pomiarów oraz wyników obliczeń

kąt nachylenia łopaty do osi turbiny $\alpha = 60^\circ$					
n_{wentMAX} %	V_{sr} m/s	n_{sr} obr/min	U_{sr} V	I_{sr} A	P_{sr} W
10	1,62	200,8	0	0,11	0
20	2,58	220,4	0	0,13	0
30	3,60	251,8	0,62	0,15	0,093
50	4,30	294,0	1,30	0,17	0,221
70	5,34	337,6	2,42	0,19	0,460



Rys. 2. Charakterystyka mocy turbiny P w funkcji prędkości strumienia powietrza v



Rys. 3. Charakterystyka prędkości obrotowej turbiny n w funkcji prędkości strumienia powietrza v

prędkość strumienia powietrza. Należy rozszerzyć zakres zadanego prędkości strumienia powietrza i wyznaczyć charakterystyczny punkt przegięcia krzywej, po przekroczeniu którego moc turbiny pozostaje na maksymalnym poziomie i nie zmienia się mimo wzrostu prędkości strumienia powietrza. Zaobserwowaną zależność mocy turbiny $P = f(v)$ można wyrazić równaniem:

$$P = 0,0366 v^2 - 0,2056 v + 0,0689; R^2 = 0,9981 \quad (2)$$

Prędkość obrotowa turbiny wzrasta wraz z wzrostem prędkości strumienia powietrza. Dla zakresu prędkości przepływu powietrza 1,62-5,34 m/s liczba obrotów wirnika mieściła się w przedziale 200,8-337,6 rpm (rys. 3). Ciągły wzrost prędkości obrotowej wywołany wzrostem prędkości przepływającego strumienia powietrza świadczy, iż nie zostały przekroczone wartości krytyczne. Zależność prędkości obrotowej $n = f(v)$ opisuje równanie:

$$n = 4,2v^2 + 9,52v + 186,16; R^2 = 0,999 \quad (3)$$

4. Wyznaczenie charakterystyki mocy turbiny dla różnych kątów nachylenia łopatek wirnika

Zmiana kąta nachylenia łopatek wirnika (kąta natarcia) powoduje zmianę siły nośnej profilu. Odchylenie płata turbiny do tyłu powoduje zwiększenie kąta natarcia, co skutkuje wzrostem prędkości strumienia powietrza opływającego górną część profilu oraz zwiększeniem siły nośnej. Po przekroczeniu wartości kąta krytycznego obserwuje się oderwanie strugi powietrza na górnej części profilu, co powoduje zanik siły nośnej. Zjawisko to nosi nazwę „przeciągnięcia”.

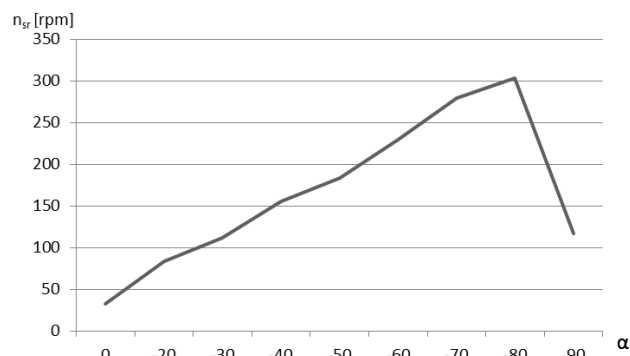
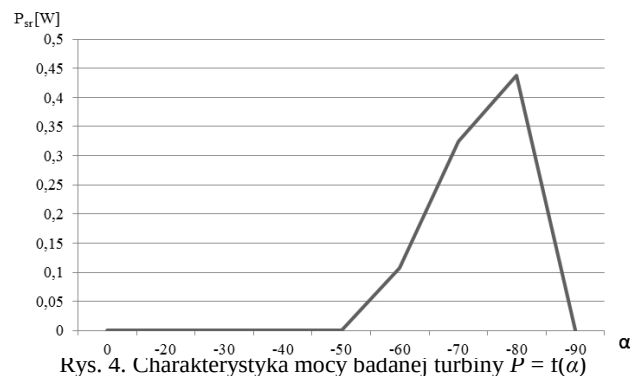
Charakterystyka mocy modelowej turbiny wiatrowej w funkcji kąta natarcia oraz zależność prędkości obrotowej turbiny od kąta natarcia zostały wyznaczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym przy stałej nastawie (30%) prędkości strumienia powietrza oraz zmiennej wartości kąta natarcia strumienia powietrza (tab. 2). Prędkość strumienia powietrza wynosiła około 3,3 m/s.

Tab. 2. Zestawienie pomiarów oraz wyników obliczeń

α st	V_{sr} m/s	n_{sr} obr/min	U_{sr} V	I_{sr} A	P_{sr} W
0	3,4	32,8	0	0	0
-20	3,3	83,4	0	0	0
-30	3,3	112,0	0	0	0
-40	3,2	155,0	0	0,06	0
-50	3,4	183,8	0	0,12	0
-60	3,3	229,6	0,72	0,15	0,108
-70	3,2	279,4	1,80	0,18	0,324
-80	3,2	302,8	2,30	0,19	0,437
-90	3,2	117,2	0,0	0,03	0

4.1. Prezentacja i analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wielkości charakterystycznych wyznaczone zostały charakterystyki $P = f(\alpha)$ (rys. 4) oraz $n = f(\alpha)$ (rys. 5). Do obliczeń użyto wzoru (1).



Rys. 5. Charakterystyka prędkości obrotowej badanej turbiny $n = f(\alpha)$

W przeprowadzonym doświadczeniu turbina wiatrowa uzyskała największą moc dla kąta $\alpha = (-80^\circ)$ wynoszącą $P_{(-80^\circ)} = 0,437$ W, a pierwszy dodatni odczyt mocy turbiny P uzyskano przy kącie natarcia $\alpha = (-60^\circ)$. Skutkiem zmiany kąta natarcia jest wzrost szybkości strumienia powietrza na górnej części profilu i zwiększenie siły nośnej. Kąt $\alpha = (-80^\circ)$ należy uznać za kąt krytyczny, po przekroczeniu którego obserwuje się zanik siły nośnej spowodowany odrywaniem strug powietrza na górnej części łopatki wirnika.

Stopniowa zmiana kąta nachylenia łopatek w zakresie kątów α 0° - (-80°) skutkowałą wzrostem prędkości obrotowej od 32,8 do 117,2 rpm (rys. 5). Zmiana kąta natarcia wywoływała wzrost wartości siły nośnej, aż do momentu przekroczenia wartości kąta krytycznego $\alpha = (-80^\circ)$, po którym nastąpiło opisanie wyżej zjawisko „przeciągnięcia”.

5. Podsumowanie

Moc turbiny wiatrowej wzrasta wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza i w badanym przypadku wyrażona jest równaniem (2).

Potrzebna jest pewna minimalna prędkość strumienia przepływającego powietrza, aby możliwe było odnotowanie napięcia w układzie, w doświadczeniu – $U = 0,62$ V dla $v = 3,6$ m/s.

Prędkość obrotowa wirnika wzrasta wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza i dla analizowanego przypadku może być wyrażona równaniem (3).

Moc oraz prędkość obrotowa turbiny wiatrowej zależne są od kąta natarcia α . Wzrost odchylenia profilu

do tyłu skutkuje wzrostem siły nośnej uzyskanym dzięki wzrostowi prędkości strumienia powietrza na górnej części profilu.

Wzrost siły nośnej przekłada się na zwiększenie uzyskanej mocy badanej turbiny do momentu przekroczenia wartości krytycznej kąta natarcia, gdzie charakterystyki mocy turbiny i prędkości obrotowej turbiny ulegają gwałtownemu załamaniu.

Literatura

- Boczar T. (2008). Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania. *Wydawnictwo Pomiary Automatyka Kontrola*, Warszawa.
- Gronowicz J. (2010). Niekonwencjonalne źródła energii. *Wydawnictwo Technologii Eksploatacji – PIB*, Radom-Poznań.
- Korban Z. (2010). Wybrane aspekty wykorzystania energetyki wiatrowej w Polsce., *Górnictwo i Geologia*, Tom 5, Zeszyt 2, 79-90.
- Napieraj K., Stańczak M. (2013). Zalety i bariery rozwoju energetyki wiatrowej. *Ekologia i Technika*, R. 21, Nr 5, 215-221.
- Osiowski J., Szabatin J. (1992). Podstawy teorii obwodów, t. 1. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
- Sorko A.S., Teleszewski J.T. (2014). Modelowanie parametrów aerodynamicznych urządzeń energetyki wiatrowej. I. Aerodynamiczna analiza profili wirników turbin i rotorów wiatrowych, *Symulacja w badaniach i rozwoju*, Vol. 5, Nr 1, 43-55.
- Soliński I. (1999). Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej. *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami i Energią PAN*, Kraków.
- Soliński I., Soliński B., Solińska M. (2008). Rola i znaczenie energetyki wiatrowej w sektorze energetyki odnawialnej. *Polityka Energetyczna*, t. 11, Zeszyt 1, 451-464.
- Tytko R. (2009). Odnawialne źródła energii. *OWG*, Warszawa.

RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF THE WIND TUBINE

Abstract: The paper concerns the topic of using wind turbines to produce electricity. Main attention was focused on showing the method of researching the basic characteristics of the model wind turbine: power characteristic as a power of the device to the wind speed ratio and power characteristic as a power of the device to the inclination of blade angle ratio. In addition, some dependencies have been defined: dependence of rotational speed of the wind turbine on a speed of flowing air, and dependence of rotational speed of the wind turbine on an inclination of the blade angle. The measurements required for this purpose were carried out in an aerodynamic tunnel at the Laboratory of Renewable Energy Sources of the Białystok University of Technology.

Opracowanie wykonano w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/4/14 Katedry Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej i sfinansowano ze środków na naukę MNiSW.

DWA OBLICZA SELENU. WYBRANE ASPEKTY AKTYWNOŚCI BIOLOGICZNEJ SELENU

Aleksandra GOŁONKO, Marzena MATEJCZYK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Badania ostatnich lat wskazują na bardzo cenne pod względem medycznym właściwości selenu. Zainteresowanie selenem wzrosło odkąd poznano metody jego oznaczania w materiale biologicznym i jego rolę w organizmach żywych. Selen w zależności od stężenia wykazuje właściwości antyoksydacyjne i prooksydacyjne. Ponadto w badaniach na zwierzętach oraz ludzkich i zwierzęcych liniach komórkowych wykazuje właściwości antynowotworowe. W dobie wzrostu zachorowalności na choroby nowotworowe, selen cieszy się dużym zainteresowaniem naukowców na całym świecie. Obecne wyniki badań wskazują na bardzo różnorodną aktywność biologiczną selenu. Jednym z głównych mechanizmów działania tego pierwiastka jest czynny udział w ochronie komórek przed skutkami stresu oksydacyjnego. W prezentowanej pracy przeglądowej omówiono ogólne właściwości selenu, zaprezentowano jego aktywność biologiczną i obecny stan wiedzy o jego potencjalnym działaniu antynowotworowym. Przedstawiono mechanizmy działania selenu na poziomie molekularnym.

Słowa kluczowe: selen, aktywność biologiczna, działanie antynowotworowe.

1. Wprowadzenie

Rośliny w diecie człowieka są dobrym źródłem selenu, ważnego pierwiastka śladowego, niezbędnego między innymi w prawidłowym rozwoju i funkcjonowaniu mózgu (Solovyev, 2015). Liczne eksperymenty naukowe przeprowadzone na ludzkich liniach komórkowych wykazały antyoksydacyjne i cytoprotekcyjne działanie selenu. Ponadto udowodniono antyoksydacyjną oraz przeciwnowotworową aktywność związków selenu w multimodalnych terapiach ze znanymi chemioterapeutykami, na przykład temozolomidem, cyklofosfamidem i cisplatyną (Aribi i in., 2015)

Ze względu na wzrastające farmakologiczne i medyczne zainteresowanie związkami selenu jako substancji o potencjalnych właściwościach terapeutycznych w prezentowanej pracy dokonano opisu aktywności biologicznej oraz możliwości aplikacyjnych selenu we współczesnej medycynie.

2. Selen w środowisku i organizmie człowieka

Selen to pierwiastek śladowy, który po raz pierwszy został wyizolowany przez Jacoba Berzeliusa Jönsa w 1817 roku. Główne formy organiczne występujące w przyrodzie to selenometionina (SeMet) i selenocysteina (SeCys), zaś wśród form nieorganicznych wyróżnia się selenian (IV) (SeO_3^{2-}), selenian (IV) (SeO_4^{2-}), selenek (Se^{2-}) oraz

selen pierwiastkowy (Se). W warunkach naturalnych znajduje się w pirytach miedzi i żelaza, w rudach siarczkowych miedzi, ołowiu, niklu, złota i srebra. Stężenie selenu w danym środowisku jest warunkowane przez zachodzące procesy chemiczne, fizyczne i biologiczne pH, warunki redoks, zawartość materii organicznej i jonów konkurencyjnych, sorpcja gleb i osadów oraz procesy katalizowane przez różne szczepy bakterii: alkilowanie i utlenianie (Sharma i in., 2014). Formy anionowe, obecne w glebie są dobrze rozpuszczalne, mobilne, biodostępne i potencjalnie toksyczne, natomiast naturalne związki organiczne są czynnikiem unieruchamiającym Se, przez co staje się on mniej dostępny biologicznie (Sharma i in., 2014; White, 2016). Gleby alkaliczne uwalniają więcej selenu niż gleby kwasowe. Dodatkowo w środowisku zasadowym selenian (IV) utlenia się do łatwo rozpuszczalnych selenianów (VI), które są łatwo asymilowane przez rośliny (Mehdi i in., 2013). Biorąc pod uwagę organiczne formy selenu, selenometionina jest szybciej asymilowana przez rośliny niż selenocysteina (Kikkert i Berkelaar, 2013). Zdolność asymilacji selenu jest cechą adaptacyjną roślin i istnieją gatunki gromadzące nawet 100 mg Se/kg suchej masy (White, 2016). Zboża, orzechy, mięso i owoce morza to najbogatsze źródło Se w diecie. Wśród produktów spożywczych, za najbogatsze źródło selenu uważa się orzechy brazylijskie (*Bertholletia excelsa*).

Selen w organizmie człowieka pełni wiele złożonych funkcji w reakcjach układu immunologicznego,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.matejczyk@pb.edu.pl

w prewencji otępień i zaburzeń poznawczych, chorobach układu sercowo-naczyniowego i w obronie oksydacyjnej (Berr i in., 2012; Salimian i in., 2014; Benstoen i in., 2015; Solovyev, 2015; Kryscio i in., 2017). Główną nieorganiczną formą dostarczania selenu wraz z pokarmem jest selenian sodu, zaś w formach organicznych przyjmowany jest pod postacią selenometioniny i selenocysteiny (Tinggi, 2008). Selen jest mikroelementem, którego zalecane spożycie mieści się w granicach 55 do 70 μg na dobę. Ilość ta jest niezbędna do nasycenia i utrzymania optymalnej aktywności peroksydazy glutationowej (GPX – *glutathione peroxidase*), zaś do nasycenia selenoproteiny P niezbędne są wyższe stężenia tego pierwiastka (Medicine, 2000). Uważa się więc, że stężenie selenoproteiny P (SEPP1) w osoczu jest lepszym markerem niż stężenie GPX (Scientific Opinion on Dietary Reference Values for selenium, 2014). Jednakże, selen w osoczu i w surowicy krwi odzwierciedla stan krótkotrwały, natomiast zawartość tego pierwiastka w erytrocytach jest markerem stanu długotrwałego, gdyż selen włączany jest w strukturę erytrocytów w trakcie ich syntezy (Thomson, 2004; Stefanowicz i in., 2013). Obecnie stan selenu jest powszechnie oceniany przez bezpośredni pomiar stężenia w osoczu lub pośrednio przez pomiar aktywności peroksydazy glutationowej (GPx), selenoproteiny w erytrocytach, w osoczu lub w całej krwi. Jednak określenie rzeczywistego stężenia selenu w osoczu jest trudne. Okazuje się, że wraz ze wzrostem ostrej odpowiedzi zapalnej, znacząco spada stężenie wielu mikroelementów w tym selenu, miedzi i cynku, szczególnie gdy stężenie białka C-reaktywnego (CRP) przekracza 80 mg/l (Duncan i in., 2012). Dlatego też, oznaczenie stężenia tych pierwiastków śladowych w erytrocytach (a nie w osoczu) zapewnia bardziej wiarygodny pomiar u pacjentów z przewlekłą ogólnoustrojową odpowiedzią zapalną. Stwierdzono, że stężenia selenu w osoczu są na ogół niskie u pacjentów z niewydolnością narządową czy infekcją (Sakr i in., 2007; de Oliveira Iglesias i in., 2014). Takie zjawisko może być spowodowane redystrybucją selenu z układu krążenia do tkanek, gdzie pełni rolę w reakcjach immunologicznych. Ponadto, reakcja ostrej fazy charakteryzuje się upośledzonym metabolizmem selenu, za co może odpowiadać zaburzona biosynteza selenoproteiny P w hepatocytach (Renko i in., 2009).

3. Selen w diecie człowieka

Zalecane przez agencję FDA dobowe spożycie selenu wynosi 55 μg i przy normalnej diecie nie istnieje obawa wystąpienia niedoborów. Selen w wysokich stężeniach jest toksyczny – objawy zatrucia określane są mianem „selenozy”. Zawartość selenu w wybranych produktach spożywczych przedstawiono w tabeli 1. Badania wskazują, że próg toksyczności wywoływanej przez selen może być uzależniony od uwarunkowań genetycznych i środowiskowych. Dieta mieszkańców brazylijskiej Amazonii charakteryzuje się spożyciem wysokiej ilości

produktów bogatych w selen, na przykład dziczyzny czy orzechów brazylijskich. Mimo podwyższonego stężenia tego mikroelementu w osoczu i we krwi, w badanej populacji nie wykazano jakichkolwiek objawów selenozy. Obserwacje te potwierdzają potrzebę ponownej oceny toksyczności selenu, z uwzględnieniem takich czynników jak chemiczna forma Se oraz droga wchłaniania i stopień ekspozycji (Lemire i in., 2012). Mimo to, wiele obserwacji potwierdza, że przekroczenie bezpiecznej dawki selenu zawartego w produktach żywnościowych może wywołać silne objawy zatrucia. Opisano przypadek, w którym w wyniku zwiększonego spożycia orzechów *Lecythis ollaria* doszło do wystąpienia objawów ostrej toksyczności, co objawiało się wymiotami, bólem głowy, brzochem, gorączką oraz nadmiernym łysieniem. Poziom selenu w osoczu pacjenta wynosił 512 mg/l przy normie 74-139 mg/l . W tak wysokim stężeniu, selen spowodował zaburzenia w sieci białek strukturalnych między innymi keratyny, co wpłynęło na pogorszenie stanu skóry, włosów i paznokci (Senthilkumaran i in., 2012). Znaczne przekroczenie zalecanej dawki selenu powoduje również biegunkę, zmęczenie, wypadanie włosów, ból stawów oraz przebarwienie, kruchość paznokci i zmęczenie (MacFarquhar i in., 2010a).

Tab. 1. Wybrane źródła selenu w diecie człowieka (na podstawie USDA Food Composition Databases)

Źródła selenu w żywności	
Suszone orzechy brazylijskie (nieblanszowane)	1917,0
Mielone ziarna gorczycy	208,10
Tuńczyk żółtopłetwy	108,20
Semolina	89,40
Surowa wątroba gęsia	68,10
Świeże żółtko jaja	56,00
Surowa makrela	44,10

W opublikowanych doniesieniach przyjęte stężenia selenu w surowicy wynoszą odpowiednio: 400-30000 $\mu\text{g/L}$ dla ostrej toksyczności, 500-1400 $\mu\text{g/L}$ dla toksyczności przewlekłej oraz <1400 $\mu\text{g/L}$ bez wykazanej toksyczności. Autorzy raportu wskazują, że wartość <1400 $\mu\text{g/L}$ można określić jako „wartość podwyższoną”, jednak nasilenie objawów zatrucia zależy od wielu innych parametrów klinicznych (Nuttall, 2006). Większość przypadków opisujących ostre zatrucie selenem obejmuje spożycie związków nieorganicznych takich jak: kwas selenowy czy selenian sodu. Toksyczny wpływ selenu w modelach zwierzęcych obserwowany jest głównie w wątrobie, śledzionie, nerkach, sercu i trzustce, przy czym efekt ten zależy od stężenia pierwiastka, jego formy oraz gatunku organizmu modelowego i płci. Elementarny selen jest stosunkowo nietoksyczny, ponieważ jego wartość LD₀ podawany doustnie szczurom wynosi 6700 mg/kg masy ciała (Cummins i Kimura, 1971). Doświadczenia przeprowadzone przez Jaffe i Mondragon (1975) wskazują na istnienie mechanizmów adaptujących zwierzęta do chronicznej ekspozycji na selen. Zaobserwowali oni, że szczury posiadają mniejszą zdolność do kumulacji tego pierwiastka

w przypadku gdy ich matki były wcześniej narażone na działanie selenu.

Odpowiednia podaż tego pierwiastka w diecie człowieka, czyli około 55-400 µg/dzień, jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania organizmu, głównie układu immunologicznego i sercowo-naczyniowego (MacFarquhar i in., 2010b; Schomburg, 2016). Nawet jednorazowe spożycie do 50 g orzechów brazylijskich może pozytywnie wpłynąć na profil lipidowy – obniżenie poziomu LDL-c przy jednoczesnym wzroście stężenia HDL-c w surowicy krwi (Colpo i in., 2013).

Selen jest również niezbędnym elementem dejodynaz jodotyroninowych, gdzie znajduje się w postaci selenocysteiny. Dejonidazy biorą udział w aktywacji i dezaktywacji hormonów tarczycy poprzez przekształcenie tyroksyny (T₄) do aktywnej formy hormonu – 3,5,3'-trójiodotyroniny (T₃). Mimo dużego nakładu energetycznego, jaki wymagany jest do syntezy selenoprotein, to proces dejodynacji (odłączenia jodu) nie zachodzi przy substytucji selenoproteiny innym aminokwasem. Dodatkowo, grupa selenolowa jest wystarczająco elektroujemna (w porównaniu na przykład do grupy tiolowej-SH) do odłączenia jodu z pierścienia aromatycznego tyroksyny (Kuiper i in., 2005; Larsen i Zavacki, 2012).

Istnieje duża trudność w ocenie toksyczności selenu, ponieważ różne formy tego pierwiastka mają różny potencjał toksyczny (Nuttall, 2006) (tab. 2). Selen pierwiastkowy i większość selenków wykazuje zazwyczaj niską toksyczność z powodu słabej biodostępności, natomiast seleniany (IV) i seleniany (VI) działają oksydacyjnie, podobnie jak wysoce toksyczny trójtlenek arsenu. W wysokich stężeniach toksyczne są również łatwo przyswajalne organiczne formy selenu, na przykład w selenometionina, selenocysteina i metylo-selenocysteina (Wilber, 1980).

Tab. 2. Wartości LD₀ różnych form selenu w podaniu doustnym na podstawie (Painter, 1941)

Forma selenu	Wartość LD ₅₀ (podanie doustne) [mg/kg]	Organizm modelowy
Tlenek selenu(IV)	48	Szczur
	68	
Selen pierwiastkowy	6700	Szczur
Selenowódór	100	Szczur
Dimetyloselenian	1600	Szczur
Trimetylo-Se-Cl	50	Szczur
Disiarczek selenu	48	Mysz

Zależnie od położenia geograficznego, klimatu, charakteru gleby, występowanie selenu jest bardzo zróżnicowane, dlatego niektóre lokalne populacje cechują się zwiększoną lub zbyt małą podażą tego niezbędnego pierwiastka (Jones i in., 2017). Z tego powodu poszukuje się związku między zwiększoną zapadalnością na niektóre choroby wśród konkretnej populacji a składnikami lokalnej diety. W przypadku selenu zaobserwowano, że jego niski poziom w diecie mieszkańców prowincji

Shaanxi w Chinach koreluje ze zwiększonym ryzykiem występowania chorób tarczycy (Wu i in., 2015), zaś w populacji duńskiej, niskie stężenie selenoproteiny P wiąże się ze zwiększonym ryzykiem występowania raka prostaty (Outzen i in., 2016). W badaniach Sun i in. (2016) zaobserwowano, że ogólna śmiertelność populacji chińskiej i śmiertelność z powodu chorób sercowo-naczyniowych jest odwrotnie proporcjonalna do ilości spożywanego selenu. Wyniki badań pokazują, że utrzymywanie dostatecznego poziomu selenu może odpowiadać za zredukowanie zapadalności na wiele chorób w tym cukrzycy typu 2 gdy stężenie Se utrzymywane jest powyżej 120 µg/l. Zapewnienie wyższego stężenia Se wiąże się również ze zwiększoną odpornością układu immunologicznego wobec infekcji wirusowych w tym HIV (Rayman, 2002, 2012). Należy jednak zaznaczyć, że praktyka przyjmowania suplementów selenu bez wiedzy o jego stężeniu w organizmie jest powszechna, jednak bardzo niebezpieczna. W raportach opublikowanych przez FDA wykazano, że produkty Total Body Formula dedykowane sportowcom zawierały 235 razy większą dawkę selenu niż jego dzienne zapotrzebowanie (47000 µg na dawkę). Szacuje się, że ponad 200 osób w USA zostało narażonych na toksyczną ilość Se w wyniku suplementacji źle zbilansowanego preparatu multiwitaminowego. Część z pacjentów wykazywała typowe objawy związane z selenozą, w tym zmęczenie, utratę włosów, ból stawów, mięśni, łamliwość paznokci, nudności, wysypkę, wymioty, gorączkę i biegunkę (Morris i Crane, 2013).

4. Wpływ selenu na układ immunologiczny

Przy wpływie selenu na układ immunologiczny, mówi się najczęściej w kontekście selenoprotein, które zaangażowane są w reakcje stresu oksydacyjnego, we wszystkich typach komórek (Hoffmann i Berry, 2008). Rodzina selenoprotein obejmuje peroksydazy glutationowe, katalizujące reakcje redukcji nadtlenu wodoru i nadtlenu organicznych, dejonidazy jodotreoninowe, biorące udział w metabolizmie hormonów tarczycy oraz reduktazy tioredoksyny, chroniące komórki przed stresem oksydacyjnym (Burk i in., 2003). W ludzkim proteomie znajduje się 25 selenoprotein, których połowa odpowiedzialna jest za ochronę komórek przed stresem oksydacyjnym (Gonzalez-Flores i in., 2013). Selen wpływa na efektorowe funkcje leukocytów, w tym przyleganie, migrację, fagocytozę i wydzielanie cytokin. Zaobserwowano, że limfocyty T pochodzące zarówno od myszy i ludzi, których dieta była bogata w Se charakteryzują się wyższą aktywnością peroksydazy glutationowej 1, peroksydazy glutationowej 4 i reduktazy tioredoksyny 1 (Broome i in., 2004; Hoffmann i in., 2010). Istotną właściwością selenu jest aktywność antyoksydacyjna. W układzie odpornościowym ROS są wytwarzane przez makrofagi i neutrofile w celu niszczenia fagocytowanych patogenów oraz pełnią ważne funkcje w sygnalizacji komórek odpornościowych, więc

Se może potencjalnie wpływać na przebieg szlaków zależnych od ROS (Hoffmann, 2007).

Stężenie ROS utrzymywane na odpowiednim poziomie pełni rolę protekcyjną w chorobach autoimmunologicznych (Hultqvist i in., 2009), wpływa na przekazywanie sygnału w szlakach immunologicznych (Biller-Takahashi i in., 2015) oraz moduluje efektorowe funkcje komórek odpornościowych w tym proliferację podczas zakażeń wirusowych (Lee i in., 2017). Podanie niskiej dawki 5 ng/ml selenu gryzoniom zakażonym *Staphylococcus aureus* powoduje widoczny spadek produkcji NO w makrofagach przy jednoczesnym wzroście poziomu nadtlenu wodoru H_2O_2 , natomiast dawka 20 ng/ml Se znacząco hamuje wzrost bakterii. Badania te wskazują, że odpowiednia suplementacja selenem może wzmocnić odpowiedź immunologiczną skierowaną przeciw zakażeniom bakteryjnym (Aribi i in., 2015). Se działa jako modulator odpowiedzi zapalnych i odpornościowych, wspomagając kontrolę stężenia nadtlenu wodoru w miejscu stanu zapalnego oraz poprzez obniżanie stężenia leukotrienów i stymulowanie odporności komórkowej (Aribi i in., 2015). Ponadto selen odgrywa ważną rolę w regulacji ekspresji genów prozapalnych i cytokin – obniża ekspresję cyklooksygenazy 2 (COX-2), prostaglandyny E2 (PGE2), czynnika regulującego interferon (IFN) 3 (IRF3) i czynnika martwicy nowotworów (TNF α) (Youn i in., 2009).

Wiele zespołów badawczych prowadzi dyskusje na temat terapeutycznego efektu suplementacji selenem wśród pacjentów zakażonych wirusem HIV (Stone i in., 2010). Podobnie jak w przypadku innych reakcji układu immunologicznego, w zakażeniach wirusem HIV dużą rolę odgrywają selenoproteiny, głównie peroksydaza glutationowa. Zakażenie wirusem HIV indukuje stres oksydacyjny, co z kolei aktywuje systemy obrony antyoksydacyjnej, w tym systemy enzymatyczne angażujące selenoproteiny, głównie peroksydazę glutationową (GPX). To zjawisko może tłumaczyć niższy poziom selenu w osoczu u osób zakażonych wirusem HIV (Stephensen i in., 2007). Okazuje się, że zwiększona apoptoza komórek CD4, nie wynika z samej patogenezы zakażenia HIV, ale w dużej mierze jest skutkiem zaburzeń oksydacyjnych w organizmie chorego (Di Bella i in., 2010). Zaproponowano również, że inną możliwą przyczyną obniżenia poziomu selenu w osoczu osób z HIV jest wytwarzanie własnych selenoenzymów przez wirus (Di Bella i in., 2010).

5. Selen w terapii nowotworów

Selen jest śladowym mikroelementem, który przykuwa dużą uwagę ze względu na jego potencjalne zastosowanie w profilaktyce i leczeniu nowotworów. Dane epidemiologiczne wskazują na odwrotną korelację między spożyciem selenu a ryzykiem wystąpienia takich nowotworów jak rak prostaty (Brinkman i in., 2006; Cui i in., 2017), rak jajnika (Terry i in., 2017) rak trzustki (Fan i in., 2015), rak pęcherza moczowego (Amaral i in., 2010)

czy rak płuc (Zhuo i in., 2004). Jednak wśród pacjentów z gruczolakami jelita grubego nie zaobserwowano widocznych korzyści wynikających z suplementacji tym pierwiastkiem (Thompson i in., 2016). Co ciekawe, opisano że w tkankach nowotworowych piersi stwierdza się wyższy poziom selenu niż w otaczających zdrowych komórkach (Charalabopoulos i in., 2006), zaś poziom selenu jest niższy w tkance raka piersi niż w fibroadenomie (Alatise i in., 2013). Mimo, że metaanaliza danych wskazuje na odwrotny związek między stężeniem selenu a ryzykiem raka piersi (Babaknejad i in., 2014), to badania prowadzone przez innych naukowców nie potwierdziły istnienia takiej zależności (Ekoue i in., 2017).

Pomimo przeprowadzonych wielu badań, terapeutyczny efekt selenu jest nadal dyskusyjny. Generalnie, mechanizmy śmierci komórek nowotworowych indukowane selenem zależą od formy (selen organiczny lub nieorganiczny) tego pierwiastka, stosowanej dawki, czasu ekspozycji oraz typu komórek nowotworowych. Selen często w literaturze naukowej określany jest jako „pierwiastek o dwóch obliczach”. Związane jest to z faktem zależności od stosowanego stężenia aktywności biologicznej selenu. Wykazano, że w małych dawkach działa on jak antyoksydant a w wyższych jak prooksydant. Mechanizm cytotoksyczności selenu przypisuje się głównie generowaniem ROS, jednak pośrednie metabolity reakcji redoks również mogą modulować funkcjonalność wielu cząsteczek sygnałowych, szczególnie enzymów i czynników transkrypcyjnych zawierających reszty cysteiny. Inne molekularne mechanizmy aktywności cytotoksycznej selenu przypisuje się między innymi indukcji stresu w siateczce śródplazmatycznej oraz indukcji apoptozy za pośrednictwem TRAIL (Wallenberg i in., 2014). W warunkach fizjologicznych niskie stężenia selenu chronią przed cyto- i genotoksycznością wywołaną stresem oksydacyjnym oraz stymulują naprawę DNA (De Rosa i in., 2012). W małych dawkach, selen działa jako antyoksydant zarówno w komórkach zdrowych, jak i rakowych. Komórki nowotworowe są więc chronione przed skutkami kumulacji uszkodzeń DNA, które gromadzą się w fazie inicjacji rozwoju guza (Misra i in., 2015). Z drugiej strony suplementacja selenem może wywierać korzystne działanie w ograniczeniu częstości występowania adduktów DNA i przerw chromosomalnych, zmniejsza więc ryzyko powstania mutacji i kancerogenezy.

Udowodniono, że selen wpływa na modulację wielu szlaków sygnałowych w tym szlaku PI3K/Akt (PI3K –kinaza 3-fosfatydilinozytolu – *phosphoinositide 3-kinase*). Szlak ten jest kluczowym regulatorem przeżycia komórek narażonych na stres, a jego nadaktywność zaobserwowano w wielu typach nowotworów, na przykład w raku piersi czy niedrobnokomórkowym raku płuc (Paplomata i O'regan, 2014; Porta i in., 2014; Yip, 2015). Selen zmniejsza fosforylację Akt, głównie w miejscu Thr308 oraz redukuje aktywność PI3K o 30% w linii PC-3. Dowiedziono również, że selen powoduje uwalnianie

wapnia z ER, zwiększając w ten sposób stężenie wolnego wapnia w cytozolu (Xia i in., 2004). Uwolniony wapń aktywuje kalcineurynę, która obniża aktywność p-Akt w procesie defosforylacji (Park i in., 2008; Wu, 2006). Ponadto, działanie selenem na komórki raka okrężnicy HT-29 hamuje szlak mTOR na drodze Akt-zależnej i Akt-niezależnej (Lee i in., 2010). Selen jako silny modulator procesów redoks może także powodować globalną wymianę tiolowo-disiarczkową białek, prowadzącą do zmian w ich aktywności (Park i in., 2005).

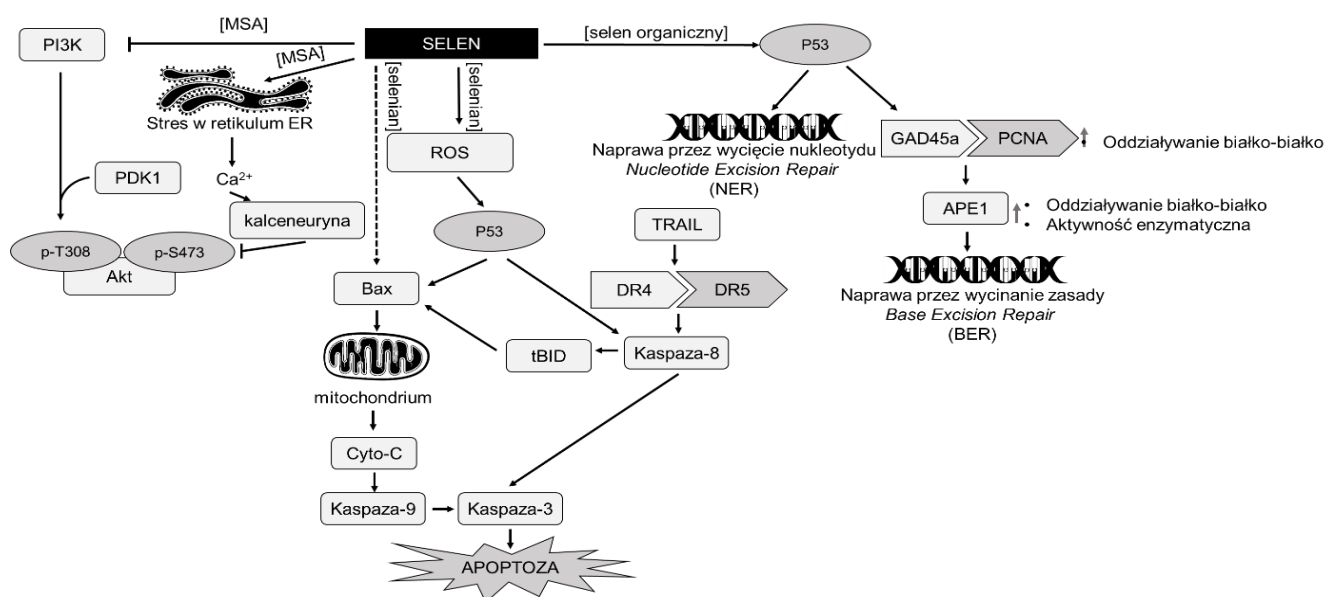
Ogólnie, Se wpływa na ekspresję wielu genów, istotnych w odpowiedziach zapalnych, reorganizacji cytoszkieletu – procesach związanych z ryzykiem zachorowania na nowotwory. Ekspresja ponad 60 genów, w tym selenoprotein W1 i K zagazowanych w przebudowę cytoszkieletu i sygnalizację zależną od czynnika transkrypcyjnego NFκB (czynnik jądrowy κB – *nuclear factor* κB) istotnie koreluje ze stężeniem Se. Wśród genów, których ekspresja wyraźnie zależy od poziomu tego pierwiastka wyróżnia się geny uczestniczące w odpowiedzi immunologicznej (HLA-A28, HLA-DRB1), geny kodujące czynniki wzrostu oraz cytokiny (BMP4, CCL19, CCL12, IL1B i IL8) (Méplan i in., 2016).

Selen może stanowić także potencjalny czynnik synergistyczny lub sensybilizujący. Nieorganiczne formy selenu uwrażliwiają komórki TRAIL-oporne raka prostaty na apoptozę na drodze szlaku mitochondrialnego p53/Bax (p53 – czynnik transkrypcyjny o własnościach supresora nowotworowego). Wywnioskowano, że indukują one generowanie nadletku wodoru, fosforylację p53 oraz translokację Bax do mitochondrium. Wyniki tych badań wskazują, że związki selenu mogą zwiększać skuteczność terapeutyczną TRAIL u pacjentów z rakiem gruczołu krokowego z p53 typu dzikiego (Hu i in., 2006) (rys. 1).

Za efekt proapoptotyczny selenu może odpowiadać też fakt wywoływania stresu oksydacyjnego (Nilsson i in., 2006). Badania wskazują, że specyficzność selenu wobec komórek nowotworowych wyjaśnia różnica w środowisku redoks. Okazuje się, że redukujące środowisko komórek nowotworowych sprzyja pobieraniu Se i jego akumulacji (Olm i in., 2009).

W odpowiedzi na organiczne związki selenu następuje modulacja interakcji białkowych między Gasd45 a białkami zaangażowanymi w naprawę typu BER jak również indukcja naprawy według mechanizmu NER, zależnego od p-53. Mechanizm aktywności nieorganicznych form selenu w tym selenianów i kwasu metyloselenowego obejmuje wywołanie stresu oksydacyjnego w obrębie siateczki śródplazmatycznej (ER) lub promowanie apoptozy za pośrednictwem szlaku mitochondrialnego. W komórkach nowotworowych selen uwrażliwia komórki na apoptozę indukowaną TRAIL (*tumor necrosis factor-related apoptosis-inducing ligand*) zwiększając skuteczność stosowanej terapii.

Organiczne formy selenu również wykazują potencjał antynowotworowy. Udowodniono, że selenometionina (SelMet) indukuje aktywność p53 bez wywoływania efektów genotoksycznych w tym apoptozy i zatrzymania cyklu komórkowego. SelMet promuje naprawę DNA poprzez wycinanie zasady (ang. *base excision repair*), zależną od p53 (Jung i in., 2013) (rys. 1). Ścieżka BER, główny szlak naprawy uszkodzeń generowanych przez ROS, pełni istotną rolę w zapobieganiu nowotworów i w procesach starzenia się. Chemoprewencyjny charakter SelMet opiera się na zapobieganiu mutagenzie wywołanej różnymi metabolitami oksydacyjnymi, powodującymi szkodliwe zmiany zasad DNA w normalnych komórkach.



Rys. 1. Wybrane mechanizmy aktywności antynowotworowej związków selenu Na podst. (Hu i in., 2006; Jung i in., 2013; Wu, 2006)

W przypadku nowotworów piersi, gruczołu krokowego, raka jelita grubego, włókniakomięśniaka, czerniaka, raka wątroby, płuc, raka płaskonabłkowego, glejaka, istnieją kliniczne dowody na istnienie korelacji między selenoproteinami, w tym reduktazą tioredoksyny-1 a przerzutami do węzłów chłonnych. Badania *in vitro* wskazują, że selenoproteiny hamują mobilność komórkową, migrację i działają antyangiogennie (Chen i in., 2013). Molekularne mechanizmy działania selenoprotein na rozwój przerzutów nie są do końca wyjaśnione. Do tej pory wiadomo, że tylko niektóre związki selenu wykazują działanie antymetastatyczne, dlatego konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy struktury molekularnej i aktywności biologicznej poszczególnych związków selenu (Chen i in., 2013). Zaobserwowano, że różne formy chemiczne selenu mogą również działać na poziomie epigenetycznym, regulując ekspresję DNMT1 i H3K9me3 (de Miranda i in., 2014).

Inną, korzystną cechą tego pierwiastka jest jego potencjał radioochronny. Wśród pacjentów ze zróżnicowanym rakiem tarczycy, selen widocznie zmniejszył uszkodzenia gruczołów ślinowych spowodowane promieniowaniem izotopu jodu-131 (Son i in., 2017). Zaobserwowano również, że suplementacja doustna selenem w dawce 200-500 µg poprawia ogólny stan pacjentów z rakiem głowy, szyi, szyjki macicy i macicy redukując lub eliminując skutki uboczne radioterapii nie wywołując przy tym efektów toksycznych (Puspitasari i in., 2014). Dodatkowo, Muecke i in. (2010) twierdzą, że pacjenci z wyższym poziomem selenu we krwi mają lepszą tolerancję na promieniowanie, dlatego obiecujące wydaje się stosowanie związków selenu w celach radioochronnych.

Przy omawianiu roli selenu w terapiach przeciwnowotworowych nie należy pomijać zasług polskich naukowców, w szczególności Piotra Suchockiego – wynalazcy Selolu – preparatu o silnych właściwościach przeciwrakowych. Związek ten powstał ze zmodyfikowanego oleju słonecznikowego zawierającego selen na IV stopniu utlenienia. Charakteryzuje się on wysoką aktywnością prooksydacyjną, czyli zdolnością do intensywnego generowania reaktywnych form tlenu. Co ważne, Selol jest mniej toksyczny niż na przykład selenian(IV) sodu, co pozwala na przyjmowanie go w większych dawkach (Suchocki i in., 2007).

6. Przeciwdrobnoustrojowe właściwości selenu

Bakterie posiadające zdolność do tworzenia biofilmów są dużo bardziej odporne na tradycyjne środki przeciwdrobnoustrojowe. Przypuszcza się, że nanocząstki selenu mogą być obiecującą metodą zapobiegającą powstawaniu biofilmu tworzonego przez patogeny pokarmowe – *Bacillus cereus*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* (Khiralla i El-Deeb, 2015). Tworzenie biofilmu przez szczepy *Staphylococcus aureus* stanowi duże zagrożenie szczególnie na biomateriałach medycznych w tym

protezach, soczewkach, protezowych zastawkach serca, cewnikach, gdzie bakterie te dostają się z powłok skórnych i błon śluzowych pacjentów, co w konsekwencji obserwuje się jako silne stany zapalne. Szczepy tej bakterii wykazują udokumentowaną oporność na antybiotyki. Tran i Webster (2011) oraz Tran i in. (2012) wykazali, że selen w formie nanocząstek ma zdolność do hamowania wzrostu i tworzenia się biofilmu *S. aureus*, a zastosowanie powłoki z organicznych form selenu na cewnikach zapobiega rozwojowi biofilmu *S. aureus*, przy tym nie wykazuje toksyczności na komórki ludzkie. W makrofagach zainfekowanych przez *S. aureus* selen działa przeciwwapalnie, moduluje szlaki reakcji zapalnej poprzez hamowanie czynnika jądrowego NF-κB i kinazy białkowej aktywowanej mitogenami (MAPK – *mitogen-activated protein kinases*) oraz znacząco obniża ekspresję TNF-α, interleukiny-1beta (IL-1β), interleukiny-6 (IL-6) (Bi i in., 2016). Biogeniczne nanocząstki selenu wydają się bezpiecznymi kandydatami w zastosowaniach medycznych, nawet w połączeniu z tradycyjnymi antybiotykami. Hamują one powstawanie biofilmu oraz prowadzą do rozkładu dojrzałego glikozyłu szczególnie *P. aeruginosa*, nie wywołując przy tym żadnych negatywnych skutków na ludzkie fibroblasty (Cremonini i in., 2016). Dotychczasowe badania potwierdzają antibakteryjny efekt różnych form selenu, głównie nanocząstek pochodzenia naturalnego na wiele chorobotwórczych szczepów bakterii, pozostając nietoksycznymi w stosunku do zdrowych komórek ssaków. Mechanizm działania nanocząstek selenu nie jest wyjaśniony, ale przypuszcza się, że wpływają one na zmniejszenie stężenia glutationu (GSH) – przeciwutleniacza niezbędnego do neutralizowania ROS u bakterii (Michelle i in., 2016).

7. Podsumowanie

Z przytoczonych danych wynika, że obecne doniesienia naukowe są niewystarczające do jednoznacznej oceny roli selenu w terapiach antynowotworowych. Wynika to z występowania wielu form chemicznych tego metaloidu, z których każda charakteryzuje się odmiennymi właściwościami biologicznymi. Zaobserwowano również różnice w efektach suplementacji między kobietami i mężczyznami. Do tej pory nie ma przekonujących dowodów na skuteczność suplementacji selenem w prewencji raka, a zgromadzone dane literaturowe są niespójne i wymagają dalszej analizy. Dodatkowo, sugeruje się, że suplementy selenu mogą wykazywać wiele skutków ubocznych, w tym toksyczność dermatologiczną i endokrynologiczną (Dennert i in., 2012; Whanger, 2004). Istnieją również badania wskazujące na kancerogenną i genotoksyczną aktywności tego pierwiastka (Vinceti i in., 2013). Potencjalne właściwości przeciwnowotworowe selenu przyjmowanego w dużych dawkach wynikają prawdopodobnie z jego właściwości prooksydacyjnych (Fernandes i Gandin, 2015).

Przyszłe kierunki badań powinny skupić się nad rolą i bezpieczeństwem stosowania selenu jak również nad jego biodostępnością w postaci różnych form chemicznych. W 2003 roku FDA zaklasyfikowało selen jako mikroelement, który może zmniejszać ryzyko zachorowalności na niektóre typy nowotworów (US Food and Drug Administration, 2003). Mimo to, wydane oświadczenia podkreślają konieczność dalszych badań w celu potwierdzenia związku między ryzykiem zachorowania na raka a suplementacją selenem, gdyż dotychczasowe dowody są niewystarczające. Dlatego też większość wydanych oświadczeń z wytycznymi żywieniowymi podkreśla, że „potrzeby żywieniowe powinny być zaspokajane przede wszystkim z żywności”. Dotyczy to w szczególności takich pierwiastków jak selen, które pomimo swojej kluczowej roli w biochemii komórek posiadają szereg właściwości toksycznych dla organizmu człowieka.

Literatura

- Alatise O.I., Babalola O.O., Omoniyi-Esan G.O., Lawal O.O., Adesunkanmi A.R., Agbakwuru E.A. (2013). Selenium levels in neoplastic breast lesions. *Nigerian Postgraduate Medical Journal*, Vol. 20, No. 2, 91-97.
- Amaral A.F.S., Cantor K.P., Silverman D.T., Malats N. (2010). Selenium and Bladder Cancer Risk: a Meta-analysis. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, Vol. 19, No. 9, 2407-2415.
- Aribi M., Meziane W., Habi S., Boulatika Y., Marchandin H., Aymeric J.L. (2015). Macrophage bactericidal activities against *Staphylococcus aureus* are enhanced in vivo by selenium supplementation in a dose-dependent manner. edited by Lenz, L.L. *PLoS ONE*, Vol. 10, No. 9, e0135515.
- Babaknejad N., Sayehmiri F., Sayehmiri K., Rahimifar P., Bahrami S., Delpesheh A., Hemati F., et al. (2014). The relationship between selenium levels and breast cancer: A systematic review and meta-analysis. *Biological Trace Element Research*, Vol. 159, No. 1-3, 1-7.
- Di Bella S., Grilli E., Cataldo M.A., Petrosillo N. (2010). Selenium deficiency and HIV infection. *Infectious Disease Reports*, PAGEPress, Vol. 2, No. 2, 56-63.
- Benstoem C., Goetzenich A., Kraemer S., Borosch S., Manzanares W., Hardy G., Stoppe C. (2015). Selenium and its supplementation in cardiovascular disease – what do we know? *Nutrients, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, Vol. 7 No. 5, 3094-3118.
- Berr C., Arnaud J., Akbaraly T.N. (2012). Selenium and cognitive impairment: A brief-review based on results from the EVA study. *BioFactors*, Vol. 38, No. 2, 139-144.
- Bi C.L., Wang H., Wang Y.J., Sun J., Dong J.S., Meng X., Li J.J. (2016). Selenium inhibits *Staphylococcus aureus*-induced inflammation by suppressing the activation of the NF- κ B and MAPK signalling pathways in RAW264.7 macrophages. *European Journal of Pharmacology*, Vol. 780, 159-165.
- Biller-Takahashi J.D., Takahashi L.S., Mingatto F.E., Urbinati E.C. (2015). The immune system is limited by oxidative stress: Dietary selenium promotes optimal antioxidative status and greatest immune defense in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *Fish and Shellfish Immunology*, Vol. 47, No. 1, 360-367.
- Brinkman M., Reulen R.C., Kellen E., Buntinx F., Zeegers M.P. (2006). Are men with low selenium levels at increased risk of prostate cancer? *European Journal of Cancer*, Vol. 42, No. 15, 2463-2471.
- Broome C.S., McArdle F., Kyle J.A.M., Andrews F., Lowe N.M., Hart C.A., Arthur J.R., et al. (2004). An increase in selenium intake improves immune function and poliovirus handling in adults with marginal selenium status. *American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 80, No. 1, 154-162.
- Burk R.F., Hill K.E., Motley A.K. (2003). Selenoprotein metabolism and function: evidence for more than one function for selenoprotein P. *The Journal of Nutrition*, Vol. 133, No. 5, Suppl 1, 1517S-20S.
- Charalabopoulos K., Kotsalos A., Batistatou A., Charalabopoulos A., Veziraki P., Peschos D., Kalfakakou V., et al. (2006). Selenium in serum and neoplastic tissue in breast cancer: Correlation with CEA. *British Journal of Cancer*, Vol. 95, No. 6, 674-676.
- Chen Y.-C., Prabhu K., Mastro A. (2013). Is Selenium a Potential Treatment for Cancer Metastasis? *Nutrients, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, Vol. 5, No. 4, 1149-1168.
- Colpo E., Vilanova C.D.D.A., Brenner Reetz L.G., Medeiros Frescura Duarte M.M., Farias I.L.G., Irineu Muller E., Muller A.L.H., et al. (2013). A single consumption of high amounts of the Brazil nuts improves lipid profile of healthy volunteers. *Journal of Nutrition and Metabolism*, Hindawi, Vol. 2013.
- Cremonini E., Zonaro E., Donini M., Lampis S., Boaretti M., Dusi S., Melotti P., et al. (2016). Biogenic selenium nanoparticles: characterization, antimicrobial activity and effects on human dendritic cells and fibroblasts. *Microbial Biotechnology*, Vol. 9, No. 6, 758-771.
- Cui Z., Liu D., Liu C., Liu G. (2017). Serum selenium levels and prostate cancer risk: A MOOSE-compliant meta-analysis. *Medicine*, Wolters Kluwer Health, Vol. 96, No. 5, e5944.
- Cummins L.M., Kimura E.T. (1971). Safety evaluation of selenium sulfide antidandruff shampoos. *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 20, No. 1, 89-96.
- Dennert G., Zwahlen M., Brinkman M., Vinceti M., Zeegers M.P.A., Horneber M. (2012). Selenium for preventing cancer. in Dennert G. (Ed.), *Sao Paulo Medical Journal*, Vol. 130, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 67.
- Duncan A., Talwar D., McMillan D.C., Stefanowicz F., O'Reilly D.S.J. (2012). Quantitative data on the magnitude of the systemic inflammatory response and its effect on micronutrient status based on plasma measurements. *American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 95, No. 1, 64-71.
- Ekoue D.N., Zaichick S., Valyi-Nagy K., Picklo M., Lacher C., Hoskins K., Warso M.A., et al. (2017). Selenium levels in human breast carcinoma tissue are associated with a common polymorphism in the gene for SELENOP (Selenoprotein P). *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Vol. 39, 227-233.
- Fan H., Kou J., Han D., Li P., Zhang D., Wu Q., He Q. (2015). Association between Vitamin C intake and the risk of pancreatic cancer: A meta-analysis of observational studies. *Scientific Reports*, Portland Press Ltd, Vol. 5, No. 5, 13973.
- Fernandes A.P., Gandin V. (2015). Selenium compounds as therapeutic agents in cancer. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, Vol. 1850, No. 8, 1642-1660.
- Gonzalez-Flores J.N., Shetty S.P., Dubey A., Copeland P.R. (2013). The molecular biology of selenocysteine. *Biomolecular Concepts*, NIH Public Access, Vol. 4, No. 4, 349-365.

- Hoffmann F.W., Hashimoto A.C., Shafer L.A., Dow S., Berry M.J., Hoffmann P.R. (2010). Dietary Selenium Modulates Activation and Differentiation of CD4⁺ T Cells in Mice through a Mechanism Involving Cellular Free Thiols. *Journal of Nutrition*, Vol. 140, No. 6, 1155-1161.
- Hoffmann P.R. (2007). Mechanisms by which selenium influences immune responses. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*, Birkhäuser-Verlag, Vol. 55, No. 5, 289-297.
- Hoffmann P.R., Berry M.J. (2008). The influence of selenium on immune responses. *Molecular Nutrition and Food Research*, NIH Public Access, Vol. 52, No. 11, 1273-1280.
- Hu H., Jiang C., Schuster T., Li G.-X., Daniel P.T., Lü J. (2006). Inorganic selenium sensitizes prostate cancer cells to TRAIL-induced apoptosis through superoxide/p53/Bax-mediated activation of mitochondrial pathway. *Molecular Cancer Therapeutics*, Vol. 5, No. 7, 1873-1882.
- Hultqvist M., Olsson L.M., Gelderman K.A., Holmdahl R. (2009). The protective role of ROS in autoimmune disease. *Trends in Immunology*, Elsevier, Vol. 30, No. 5, 201-208.
- Jaffe W.G., Mondragon C. (1975). Effects of ingestion of organic selenium in adapted and non-adapted rats. *The British Journal of Nutrition*, Vol. 33, No. 3, 387-397.
- Jones G.D., Droz B., Greve P., Gottschalk P., Poffet D., McGrath S.P., Seneviratne S.I., et al. (2017). Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, National Academy of Sciences, Vol. 114, No. 11, 2848-2853.
- Jung H.J., Kim H.L., Kim Y.J., Weon J. Il, Seo Y.R. (2013). A novel chemopreventive mechanism of selenomethionine: Enhancement of APE1 enzyme activity via a Gadd45a, PCNA and APE1 protein complex that regulates p53-mediated base excision repair. *Oncology Reports*, Vol. 30, No. 4, 1581-1586.
- Khiralla G.M., El-Deeb B.A. (2015). Antimicrobial and antibiofilm effects of selenium nanoparticles on some foodborne pathogens. *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 63, No. 2, 1001-1007.
- Kikkert J., Berkelaar E. (2013). Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 65, No. 3, 458-465.
- Kryscio R.J., Abner E.L., Caban-Holt A., Lovell M., Goodman P., Darke A.K., Yee M., et al. (2017). Association of antioxidant supplement use and dementia in the prevention of Alzheimer's disease by Vitamin E and selenium trial (PREADViSE). *JAMA Neurology*, Vol. 74, No. 5, 567-573.
- Kuiper G.G.J.M., Kester M.H.A., Peeters R.P., Visser, T.J. (2005). Biochemical Mechanisms of Thyroid Hormone Deiodination. *Thyroid*, Vol. 15, No. 8, 787-798.
- Larsen P.R., Zavacki A.M. (2012). The role of the iodothyronine deiodinases in the physiology and pathophysiology of thyroid hormone action. *European Thyroid Journal*, Karger Publishers, Vol. 1, No. 4, 232-242.
- Lee S.-H., Almutairi S., Ali A.K. (2017). Reactive oxygen species modulate immune cell effector function. *The Journal of Immunology*, Vol. 198, No. 1 Supplement.
- Lee Y.K., Park S.Y., Kim Y.M., Kim D.C., Lee W.S., Surh Y.J., Park O.J. (2010). Suppression of mTOR via Akt-dependent and -independent mechanisms in selenium-treated colon cancer cells: Involvement of AMPK α 1. *Carcinogenesis*, Vol. 31, No. 6, 1092-1099.
- Lemire M., Philibert A., Fillion M., Passos C.J.S., Guimarães J.R.D., Barbosa F., Mergler D. (2012). No evidence of selenosis from a selenium-rich diet in the Brazilian Amazon. *Environment International*, Vol. 40, No. 1, 128-136.
- MacFarquhar J.K., Broussard D.L., Melstrom P., Hutchinson R., Wolkin A., Martin C., Burk R.F., i in. (2010a). Acute selenium toxicity associated with a dietary supplement. *Archives of Internal Medicine*, Vol. 170, No. 3, 256-261.
- MacFarquhar J.K., Broussard D.L., Melstrom P., Hutchinson R., Wolkin A., Martin C., Burk R.F., i in. (2010b). Acute selenium toxicity associated with a dietary supplement. *Archives of Internal Medicine*, NIH Public Access, Vol. 170, No. 3, 256-61.
- Medicine I. (2000). Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids: A Report of the Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds, Subcommittees on Upper Reference Levels of Nutrients and Interpretation and Uses of Dietary Reference Intake. *National Academy Press*.
- Mehdi Y., Hornick J.L., Istasse L., Dufrasne I. (2013). Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*, Vol. 18, No. 3, 3292-3311.
- Méplan C., Johnson I.T., Polley A.C.J., Cockell S., Bradburn D.M., Commane D.M., Arasaratnam R.P., i in. (2016)/ Transcriptomics and proteomics show that selenium affects inflammation, cytoskeleton, and cancer pathways in human rectal biopsies. *FASEB Journal*, Vol. 30, No. 8, 2812-2825.
- Michelle S., Steve W., Thomas W. (2016). Efficacy and mechanism of selenium nanoparticles as antibacterial agents. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 4.
- de Miranda J.X., Andrade F. de O., Conti A. de, Dagli M.L.Z., Moreno F.S., Ong T.P. (2014). Effects of selenium compounds on proliferation and epigenetic marks of breast cancer cells. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Vol. 28, No. 4, 486-491.
- Misra S., Boylan M., Selvam A., Spallholz J.E., Björnstedt M. (2015). Redox-active selenium compounds – from toxicity and cell death to cancer treatment. *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 7, No. 5, 3536-3556.
- Morris J.S., Crane S.B. (2013). Selenium toxicity from a misformulated dietary supplement, adverse health effects, and the temporal response in the nail biologic monitor. *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 5, No. 4, 1024-1057.
- Muecke R., Schomburg L., Glatzel M., Berndt-Skorka R., Baaske D., Reichl B., Buentzel J., et al. (2010). Multicenter, phase 3 trial comparing selenium supplementation with observation in gynecologic radiation oncology. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, Vol. 78, No. 3, 828-835.
- Nilsson, G., Sun, X., Nyström, C., Rundlöf, A.K., Potamitou Fernandes, A., Björnstedt, M. and Dobra, K. (2006), "Selenite induces apoptosis in sarcomatoid malignant mesothelioma cells through oxidative stress", *Free Radical Biology and Medicine*, Vol. 41 No. 6, 874-885.
- Nuttall K.L. (2006). Evaluating selenium poisoning. *Annals of Clinical and Laboratory Science*, Vol. 36, No. 4, 409-420.
- de Oliveira Iglesias S., Leite H., Paes Â., de Oliveira S., Sarni R. (2014). Low plasma selenium concentrations in critically ill children: the interaction effect between inflammation and selenium deficiency. *Critical Care*, BioMed Central, Vol. 18, No. 3, R101.
- Olm E., Fernandes A.P., Hebert C., Rundlöf A.-K., Larsen E.H., Danielsson O., Björnstedt M. (2009). Extracellular thiol-assisted selenium uptake dependent on the xc- cystine transporter explains the cancer-specific cytotoxicity

- of selenite. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, No. 27, 11400-11405.
- Outzen M., Tjønneland A., Larsen E.H., Friis S., Larsen S.B., Christensen J., Overvad K., et al. (2016). Selenium status and risk of prostate cancer in a Danish population. *British Journal of Nutrition*, Vol. 115, No. 9, 1669-1677.
- Painter E.P. (1941). The Chemistry and Toxicity of Selenium Compounds, with Special Reference to the Selenium Problem. *Chemical Reviews*, American Chemical Society, Vol. 28, No. 2, 179-213.
- Paplomata E., O'regan R. (2014). The PI3K/AKT/mTOR pathway in breast cancer: Targets, trials and biomarkers. *Therapeutic Advances in Medical Oncology*, SAGE Publications, Vol. 6, No. 4, 154-166.
- Park C.H., Kim Y.S., Kim Y.H., Choi M.Y., Yoo J.M., Kang S.S., Choi W.S., et al. (2008). Calcineurin mediates AKT dephosphorylation in the ischemic rat retina. *Brain Research*, Vol. 1234, 148-157.
- Park E.M., Choi K.S., Park S.Y., Kong E.S., Zu K., Wu Y., Zhang H., et al. (2005). A display thiol-proteomics approach to characterize global redox modification of proteins by selenium: Implications for the anticancer action of selenium. *Cancer Genomics and Proteomics*, Vol. 2, No. 1, 25-35.
- Porta C., Paglino C., Mosca A. (2014). Targeting PI3K/Akt/mTOR Signaling in Cancer. *Frontiers in Oncology*, Frontiers Media SA, Vol. 4, 64.
- Puspitasari I.M., Abdulah R., Yamazaki C., Kameo S., Nakano T., Koyama H. (2014). Updates on clinical studies of selenium supplementation in radiotherapy. *Radiation Oncology*, BioMed Central, Vol. 9, No. 1, 125.
- Rayman M.P. (2002). The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society*, Vol. 61, No. 2, 203-215.
- Rayman M.P. (2012). Selenium and human health. *The Lancet*, Vol. 379, No. 9822, 1256-1268.
- Renko K., Hofmann P.J., Stoedter M., Hollenbach B., Behrends T., Köhrle J., Schweizer U., et al. (2009). Down-regulation of the hepatic selenoprotein biosynthesis machinery impairs selenium metabolism during the acute phase response in mice. *The FASEB Journal*, Vol. 23, No. 6, 1758-1765.
- De Rosa V., Erkekoğlu P., Forestier A., Favier A., Hincal F., Diamond A.M., Douki T., et al. (2012). Low doses of selenium specifically stimulate the repair of oxidative DNA damage in LNCaP prostate cancer cells. *Free Radical Research*, Vol. 46, No. 2, 105-115.
- Sakr Y., Reinhart K., Bloos F., Marx G., Russwurm S., Bauer M., Brunkhorst F. (2007). Time course and relationship between plasma selenium concentrations, systemic inflammatory response, sepsis, and multiorgan failure. *British Journal of Anaesthesia*, Vol. 98, No. 6, 775-784.
- Salimian J., Arefpour M.A., Riazipour M., Poursasan N. (2014). Immunomodulatory effects of selenium and vitamin E on alterations in T lymphocyte subsets induced by T-2 toxin. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, Vol. 36, No. 4, 275-281.
- Schomburg L. (2016). Dietary Selenium and Human Health. *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 9, No. 1, 22.
- Scientific Opinion on Dietary Reference Values for selenium (2014). *EFSA Journal*, Vol. 12 No. 10, 3846.
- Senthilkumaran S., Balamurugan N., Vohra R., Thirumalaikolundusubramanian P. (2012). Paradise Nut Paradox: Alopecia Due to Selenosis from a Nutritional Therapy. *International Journal of Trichology*, Wolters Kluwer - Medknow Publications, Vol. 4, No. 4, 283.
- Sharma V.K., McDonald T.J., Sohn M., Anquandah G.A.K., Pettine M., Zboril R. (2014). Biogeochemistry of selenium. A review. *Environmental Chemistry Letters*, Springer International Publishing, Vol. 13, No. 1, 49-58.
- Solovyev N.D. (2015). Importance of selenium and selenoprotein for brain function: From antioxidant protection to neuronal signalling. *Journal of Inorganic Biochemistry*, Vol. 153, 1-12.
- Son H., Lee S.M., Yoon R.G., Lee H., Lee I., Kim S., Chung W.Y., et al. (2017). Effect of selenium supplementation for protection of salivary glands from iodine-131 radiation damage in patients with differentiated thyroid cancer. *Hellenic Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 20, No. 1, 62-70.
- Stefanowicz F.A., Talwar D., O'Reilly D.S.J., Dickinson N., Atkinson J., Hursthouse A.S., Rankin J., et al. (2013). Erythrocyte selenium concentration as a marker of selenium status. *Clinical Nutrition*, Vol. 32, No. 5, 837-842.
- Stephensen C.B., Marquis G.S., Douglas S.D., Kruzich L.A., Wilson C.M. (2007). Glutathione, glutathione peroxidase, and selenium status in HIV-positive and HIV-negative adolescents and young adults. *American Journal Clinical Nutrition*, Vol. 85, No. 1, 173-181.
- Stone C.A., Kawai K., Kupka R., Fawzi W.W. (2010). Role of selenium in HIV infection. *Nutrition Reviews*, Vol. 68, No. 11, 671-681.
- Suchocki P., Misiewicz I., Skupinska K., Waclawek K., Fijalek Z., Kasprzycka-Guttman T. (2007). The activity of Selol in multidrug-resistant and sensitive human leukemia cells. *Oncology Reports*, Vol. 18, No. 4, 893-899.
- Sun J.-W., Shu X.-O., Li H.-L., Zhang W., Gao J., Zhao L.-G., Zheng W., et al. (2016). Dietary selenium intake and mortality in two population-based cohort studies of 133 957 Chinese men and women. *Public Health Nutrition*, Vol. 19, No. 16, 2991-2998.
- Terry P.D., Qin B., Camacho F., Moorman P.G., Alberg A.J., Barnholtz-Sloan J.S., Bondy M., et al. (2017). Supplemental Selenium May Decrease Ovarian Cancer Risk in African-American Women. *The Journal of Nutrition*, Vol. 147, No. 4, 621-627.
- Thompson P.A., Ashbeck E.L., Roe D.J., Fales L., Buckmeier J., Wang F., Bhattacharyya A., et al. (2016). Selenium supplementation for prevention of colorectal adenomas and risk of associated type 2 diabetes. *Journal of the National Cancer Institute*, Vol. 108, No. 12, 152.
- Thomson C.D. (2004). Assessment of requirements for selenium and adequacy of selenium status: A review. *European Journal of Clinical Nutrition*, Nature Publishing Group, Vol. 58, No. 3, 391-402.
- Tinggi U. (2008). Selenium: Its role as antioxidant in human health. *Environmental Health and Preventive Medicine*, Springer, Vol. 13, No. 2, 102-108.
- Tran P.A., Webster T.J. (2011). Selenium nanoparticles inhibit *Staphylococcus aureus* growth. *International Journal of Nanomedicine*, Dove Press, Vol. 6, 1553-1558.
- Tran P.L., Lowry N., Campbell T., Reid T.W., Webster D.R., Tobin E., Aslani A., et al. (2012). An organoselenium compound inhibits *Staphylococcus aureus* biofilms on hemodialysis catheters in vivo. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, American Society for Microbiology, Vol. 56, No. 2, 972-978.
- US Food and Drug Administration (2003). Labeling Nutrition - Qualified Health Claim: Final Decision Letter on Selenium and Certain Cancers (Docket No. 02P-0457). *Center for Food Safety and Applied Nutrition*.
- Vinceti M., Crespi C.M., Malagoli C., Del Giovane C., Krogh V. (2013). Friend or foe? The current epidemiologic

- evidence on selenium and human cancer risk. *Journal of Environmental Science and Health - Part C Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, Taylor & Francis, Vol. 31, No. 4, 305-341.
- Wallenberg M., Misra S., Björnstedt M. (2014). Selenium cytotoxicity in cancer. *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, Vol. 114, No. 5, 377-386.
- Whanger P.D. (2004). Selenium and its relationship to cancer: an update. *British Journal of Nutrition*, Vol. 91, No. 1, 11.
- White P.J. (2016). Selenium accumulation by plants. *Annals of Botany*, Vol. 117, No. 2, 217-235.
- Wilber C.G. (1980). Toxicology of selenium: A review. *Clinical Toxicology*, Taylor & Francis, Vol. 17, No. 2, 171-230.
- Wu Q., Rayman M.P., Lv H., Schomburg L., Cui B., Gao C., Chen P., et al. (2015). Low Population Selenium Status Is Associated With Increased Prevalence of Thyroid Disease. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, Vol. 100, No. 11, 4037-4047.
- Wu Y. (2006). Delineating the mechanism by which selenium deactivates Akt in prostate cancer cells. *Molecular Cancer Therapeutics*, Vol. 5, No. 2, 246-252.
- Xia R., Ganther H.E., Egge A., Abramson J.J. (2004). Selenium compounds modulate the calcium release channel/ryanodine receptor of rabbit skeletal muscle by oxidizing functional thiols. *Biochemical Pharmacology*, Vol. 67, No. 11, 2071-2079.
- Yip P.Y. (2015). Phosphatidylinositol 3-kinase-AKT-mammalian target of rapamycin (PI3K-Akt-mTOR) signaling pathway in non-small cell lung cancer. *Translational Lung Cancer Research*, AME Publications, Vol. 4, No. 2, 165-176.
- Youn H.S., Ahn S.I., Lee B.Y. (2009). Guggulsterone suppresses the activation of transcription factor IRF3 induced by TLR3 or TLR4 agonists. *International Immunopharmacology*, Vol. 9, No. 1, 108-112.
- Zhuo H., Smith A.H., Steinmaus C. (2004). Selenium and lung cancer: A quantitative analysis of heterogeneity in the current epidemiological literature. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, Vol. 13, No. 5, 771-778.

TWO FACES OF SELENIUM. SELECTED ASPECTS OF SELENIUM BIOLOGICAL ACTIVITY

Abstract: Studies of recent years indicate the very valuable properties of selenium in medical field. The interest in selenium has increased since we learned the methods of its determination in biological samples and its role in living organisms. Selenium, depending on the concentration, has antioxidant and prooxidative properties. In addition, in animal studies and human and animal cell lines, it exhibits anti-cancer properties. In the era of increased incidence of human and animal cancer, selenium is very popular among scientists around the world due to its high biological activity. Current research results highlight the various effects of selenium molecular activity. One of the main mechanisms of action of this element is active participation in the protection of cells against the effects of oxidative stress. The review presents the general properties of selenium, its biological activity and the current state of knowledge about its potential anticancer activity. Also, known molecular mechanisms of selenium activity in a living cell are mentioned.

Praca została zrealizowana w ramach pracy S/WBiŚ/3/2015 i sfinansowana ze środków na naukę MNiSW.

ROLA BAKTERII UREOLITYCZNYCH W PROCESACH BIOCEMENTACJI GRUNTÓW – AKTUALNY STAN BADAŃ

Katarzyna MISIOLEK*

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie mikrobiologicznego procesu otrzymywania osadu wapnia (MICP, z ang. *Microbially Induced Calcite Precipitation*). Podstawą technologii MICP jest aktywność komórek bakterii, które są w stanie zmagazynować produkt metaboliczny CO_3^{2-} , który następnie reaguje z jonami wapnia w środowisku naturalnym, w wyniku czego uzyskiwana jest struktura minerału. Bakterie ureolityczne, prowadzące proces hydrolizy mocznika przy udziale enzymu ureazy, okazały się najefektywniejsze przy tworzeniu osadu węglanu wapnia, a tym samym najbardziej odpowiednie do celów biocementacji gruntów. Artykuł przedstawia przegląd metod hodowli bakterii oraz prac eksperymentalnych mających na celu osiągnięcie najlepszych parametrów wytrzymałościowych badanego materiału.

Słowa kluczowe: bakterie ureolityczne, biocementacja, ureaza, MICP.

1. Wprowadzenie

Bakterie należą do organizmów prokariotycznych, charakteryzują się niewielkimi rozmiarami od dziesiątych części do kilkunastu mikronów. Podstawowymi formami morfologicznymi są formy kuliste, cylindryczne i spiralne (Kańska i in., 2006). Bakterie izolowane są z każdego środowiska. Można je zaobserwować w glebie, wodzie i powietrzu. Dodatkowo, występują w bardzo dużym przedziale stref temperaturowych, od Antarktydy po Afrykę, a nawet na terenach radioaktywnych. Komórki bakterii, oprócz prostej budowy, charakteryzują się również częstymi podziałami, co umożliwia otrzymanie wielu organizmów w krótkim czasie i przy niskich kosztach. W nauce, tak jak w środowisku, bakterie pełnią ważną rolę, cały czas znajdując nowe zastosowania.

Pod wpływem działania określonych typów bakterii zauważono polepszenie właściwości geotechnicznych gruntów, to jest współczynnika filtracji, wilgotności, wytrzymałości na ścinanie, modułu ścisłości i stopnia zagęszczenia. Aplikowanie mikroorganizmów w miejsca, gdzie planowana jest budowa, może pozwolić na uniknięcie osuwisk, nadmiernej filtracji i nadmiernego osiadania. Standardowe metody stosowane w celu wzmacniania gruntów z użyciem betonu czy zawiesziny twardniejącej, to jest metoda wgłębnego mieszania gruntu, ścianki szczelne, ściany szczelinowe trwale modyfikują środowisko oraz są kosztowne (Furstenberg i in., 1983; Koda i in., 1988; Hapton i Edil, 1998; Yang i in., 1998; Jelisc i Leppanen, 1999; Edil, 2003; Celik i Canakci, 2011).

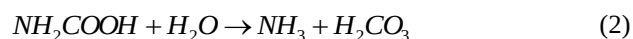
Celem artykułu jest przedstawienie mikrobiologicznego procesu otrzymywania osadu wapnia (MICP, z ang. *Microbially Induced Calcite Precipitation*) w celu polepszenia podstawowych fizycznych i mechanicznych parametrów podłoża: wytrzymałości na ścinanie, filtracji i modułu ścisłości.

2. Mikrobiologiczne uzyskiwanie węglanu wapnia

Proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia jest coraz powszechniejszą metodą powstawania ekologicznego materiału budowlanego, stwarzającą nowe perspektywy w zakresie ekologicznego wzmacniania gruntów. Ekologicznego, ponieważ bez użycia chemii budowlanej, a jedynie z wykorzystaniem dostępnych w środowisku naturalnym związków. Predyspozycje do wykorzystania zjawiska wytwarzania ureazy w celu pozyskiwania węglanu wapnia w procesach mikrobiologicznych są badane od lat osiemdziesiątych XX wieku (Hammes i in., 2003). Wiele źródeł potwierdziło, że proces mikrobiologicznego uzyskiwania procesu węglanu wapnia jest bardzo skuteczny, powoduje wzrost parametru naprężenia ścinającego oraz spadek parametru przepuszczalności w gruntach żwirowych i piaszczystych (Van Paassen i in., 2010a). Należy jednak pamiętać, że proces MICP nadal jest w fazie badawczej i nie był jeszcze aplikowany na skalę techniczną (przemysłową). Dlatego wskazane są dalsze badania nad tą metodą w celu jej dopracowania i wprowadzenia na rynek budowlany.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: katarzyna_misiolek@is.pw.edu.pl

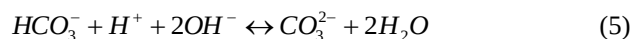
Proces MICP opiera się na naturalnej metodzie wytwarzania minerałów w środowisku naturalnym. Metoda tworzenia osadu węglanu wapnia przez mikroorganizmy jest nieskomplikowany i szybko prowadzi do uzyskania wysokich zawartości CaCO_3 . W reakcji hydrolizy bakterie poprzez rozkład jednego jona mocznika uzyskują jeden jon kwasu karbaminowego i jeden jon amoniaku (1), po czym wskutek ponownej reakcji hydrolizy kwasu karbaminowego powstaje jeden jon kwasu węglowego i jeden jon amoniaku (2):



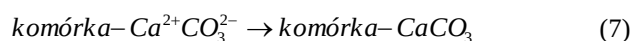
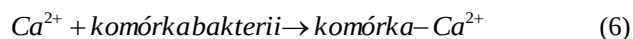
Uzyskane produkty (to jest NH_3 i H_2CO_3) w dalszym procesie są równoważone w wodzie, co prowadzi do uzyskania wodorowęglanu (3), dwóch jonów amonowych i dwóch wodorotlenkowych (4):



Jony wodorotlenkowe powodują wzrost pH, co może zmienić stan równowagi dwuwęglanów, w wyniku czego powstaje jon węglanowy (5). To powoduje wytrącenie jonów wapnia. Związki NH_4^+ lokalnie podnoszą odczyn pH, co prowadzi do nagłego tworzenia węglanu wapnia:



Przy wystarczającym stężeniu Ca^{2+} i CO_3^{2-} na powierzchni komórki bakterii tworzy się osad CaCO_3 (6, 7):



Obecność komórek bakterii odgrywa istotną rolę w produkcji osadu CaCO_3 , ponieważ stanowią miejsce zarodkowania i wpływają na typ formowanego minerału (Jimenez-Lopez i in., 2007).

3. Bakterie wykorzystywane w procesie mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia

Mikrobiologiczne uzyskiwanie osadu węglanu wapnia, będące podstawą technologii MICP opiera się na aktywności komórek bakterii. W procesie MICP wybrane mikroorganizmy magazynują produkt metaboliczny CO_3^{2-} , który następnie reaguje z jonami wapnia w warunkach naturalnych, dzięki czemu powstaje struktura minerału. Opisaną sekwencję można z łatwością odtworzyć w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem takich elementów metabolizmu drobnoustrojów jak fotosynteza, hydroliza mocznika, redukcja siarczanów i wiele innych. Najskuteczniejsza okazała się metoda tworzenia węglanu wapnia przy udziale bakterii prowadzących proces hydrolizy mocznika

przy udziale enzymu ureazy (De Muynck i in., 2010).

Jednym z najważniejszych punktów badań podczas pracy nad procesem biocementacji gruntów jest znalezienie bakterii, które produkują dużą ilość enzymu ureazy, dzięki czemu powstaje środowisko zasadowe korzystne dla tworzenia osadu (Douglas i Beveridge, 1998; Ciurli i in., 1999; Warthmann i in., 2000; Roden i in., 2002; Karatas i in., 2008; Dejong i in., 2010; Van Passen i in., 2010b; Hamdan i in., 2011; Weaver i in., 2011).

W wielu badaniach nad biocementacją wykorzystano bakterie *Bacillus pasteurii*, które są bardzo aktywne przy rozkładzie mocznika, a tym samym idealnie nadają się do procesu mikrobiologicznego uzyskiwania węglanu wapnia (Bang i in., 2001; Dejong i in., 2006; Dejong i in., 2010). Według nowej taksonomii nazwa bakterii *Bacillus pasteurii* została zmieniona na *Sporosarcina pasteurii* (Welland, 19/07/2010). W tabeli 1 przedstawiono najbardziej aktywne kultury bakterii pod względem wytwarzania ureazy.

Tab. 1. Kultury bakterii wytwarzające enzym ureazy (Sarda i in., 2009)

Kultury bakterii	Ilość wytwarzanej ureazy (urea/ml*)
<i>Bacillus pasteurii</i>	17,5
<i>Brevibacterium ammoniagenes</i>	12,5
<i>Bacillus lentus</i>	0,0

Objaśnienia: * – jedna jednostka ureazy jest zdefiniowana jako ilość enzymu hydrolizującego 1 mikromol mocznika/min/ml (Smith i in., 1999).

3.1. Metody laboratoryjne izolacji i hodowli bakterii wykorzystywanych w procesie MICP

Pozyskanie opisanych szczepów bakterii nie jest trudne i można tego dokonać na dwa sposoby. Pierwszy z nich, zdecydowanie kosztowniejszy, to zakup szczepów komercyjnych (na przykład z kolekcji DSMZ – Deutsche Sammlung von Mikroorganismen Und Zellkulturen lub ATCC – American Type Culture Collection). Drugim sposobem jest samodzielna izolacja szczepów ze środowiska naturalnego. Bakterie przydatne w procesach biocementacji najłatwiej znaleźć przy wapiennych kamieniach, w glebach, w mułach lub osadach (Dick i in., 2006; De Muynck i in., 2010). Źródła literaturowe podają różne lokalizacje, gdzie udało się wyizolować szczepy o wysokiej wydajności węglanowej, na przykład region Sakarya w Turcji (Canakci i in., 2015), czy region Bhuj w północnozachodnich Indiach (Welland, 2009).

W Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechniki Warszawskiej wyizolowano szczepy produkujące enzym ureazy, z okolic miejsc prowadzonych prac budowlanych lub z okolic składowisk materiałów budowlanych w Warszawie i Mińsku Mazowieckim. Próbkę gruntu zebrano

do jałowych pojemników, około 100 g każdy, i szczelnie zamykano. Pojemniki przechowywano w warunkach chłodniczych (+8°C) do momentu wykonania posiewów.

Z każdej próbki wykonano izolację szczepów bakterii. Izolacje przeprowadzono metodą płytkową Kocha na podłoże agarowe (Wzbogacony LAB-AGAR firmy BIOCOPRP). Bakterie wysiewano stosując posiew powierzchniowy w postaci zawiesiny w wodzie jałowej, następnie inkubowano przez 24 h w temperaturze 37°C. Dominujące szczepy przesiano metodą posiewu redukcyjnego na podłoże agarowe według Christensena (Podłoże z mocznikiem według Christensena firmy BTL sp z o.o.). Posiewy inkubowano przez 24 h w 20°C i 26°C. Zmiana zabarwienia podłoża na kolor różowy świadczyła o wytwarzaniu enzymu ureazy przez szczepy bakterii (rys. 1).



Rys. 1. Podłoże agarowe według Christensena zabarwione na kolor różowy wskutek posiewu bakterii charakteryzujących się zdolnością wytwarzania enzymu ureazy

Ze względu na brak opisów w literaturze warunków izolacji i inkubacji szczepów bakterii, w artykule zamieszczono jeden konkretny przykład warunków hodowli.

4. Przygotowanie próbek

4.1. Przygotowanie podłoża namnażającego

W celu wprowadzenia wybranych szczepów do próbek gruntu, bakterie należy namnożyć. Przygotowano podłoże namnażające składające się z bulionu 3 g/l, NaHCO_3 i moczniku 10 g/l (Canakci i in. 2015). Do podłoża wprowadzono szczepy bakterii i pozostawiono na wytrąsarsce przez 48 h w temperaturze pokojowej.

4.2. Przebieg doświadczenia biocementacji próbek

Według źródeł literaturowych proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia najlepiej jest przeprowadzić w piaskach i żwirach (Van Paassen i in., 2010a; Canakci i in., 2015). W ramach badań analizowano cztery próbki piasku pod kątem wytrzymałości na ścinanie oraz cztery próbki pod kątem oceny zjawiska konsolidacji.

Wykonano próbki o wymiarach 60×60×20 mm do badań wytrzymałości na ścinanie, gdzie do trzech wprowadzono trzy różne szczepy bakterii, natomiast czwarta próbka była próbką testową. Do pomiaru konsolidacji wykonano próbki cylindryczne o średnicy 75 mm i grubości 20 mm. Podobnie jak do poprzedniego badania, do trzech próbek piasku dodano trzy różne szczepy bakterii, natomiast czwartą próbkę pozostawiono jako kontrolną. Wszystkie próbki inkubowano w temperaturze 80°C przez 30 minut w celu zniszczenia mikroorganizmów, które mogły by mieć wpływ na doświadczenie. Po tym czasie do sześciu próbek wprowadzono szczep bakterii *Bacillus pasteurii*, mocznik oraz CaCl_2 i pozostawiono je na 12 h w temperaturze 28°C w celu przyłączenia się do cząstek piasku. W przenośni można to wytłumaczyć jako budowanie szkieletu przez bakterie na cząstkach piasku, dlatego bardzo ważne jest pozostawienie próbek w nienaruszonym stanie. Przez kolejne cztery doby co 6 h do próbek wprowadzano podłoże do zestawienia. Podłoże zestawiające zawierało bulion 3 g/l, NaHCO_3 2,12 g/l, NH_4Cl 10 g/l oraz mocznik 20 g/l. Przez cały czas próbki pozostawały w temperaturze 28°C, bez mieszania czy naruszania piasku. Następnie próbki przechowywano w temperaturze 25°C przez kolejne pięć dni. Po tym czasie próbki były gotowe do pomiaru konsolidacji oraz do badania wytrzymałości na ścinanie.

5. Skuteczność MICP w zwiększaniu parametrów wytrzymałościowych gruntu wg dotychczasowych prac badawczych

Skuteczność MICP w zwiększaniu parametrów wytrzymałościowych gruntu zależy głównie od poziomu pH, temperatury w środowisku, typu bakterii i intensywności przeprowadzania hydrolizy mocznika. W formie tabelarycznej przedstawiono zestawienie dotychczasowych prac badawczych nad procesem MICP (tab. 2). Natomiast w dalszej części artykułu szczegółowo opisano osiągnięte wyniki badaczy Canakci i in. (2015).

5.1. Zmiany pH

Canakci i in. (2015) przeprowadzili analizy pH próbek ze szczepami bakterii oraz na próbce zerowej. Początkowy poziom pH próbek mieścił się w przedziale od 7,5 do 8,0, a po 12 h od wprowadzenia szczepów bakterii, mocznika oraz CaCl_2 , wartość pH w zaszczepionych próbkach wynosiła około 9,3. Osiągnięty wynik daje bardzo obiecujący rezultat, ponieważ podwyższony poziom pH jest kluczowym parametrem do tworzenia się osadu węglanu wapnia (Hammes i Verstraete, 2002). Autorzy dokładnie wyjaśnili przyczyny lokalnego podwyższenia parametru pH. W środowisku silnie zasadowym komórki bakterii stanowią miejsce zarodkowania i wpływają na typ formowanego minerału.

Tab. 2. Zestawienie prac badawczych nad procesem MICP

Autorzy	Szczep bakterii	Osiągnięte efekty
Gorospe i in. (2013)	<i>Sporosarcina pasteurii</i> (<i>Bacillus pasteurii</i>)	powstanie scementowanych bloczków piasku, które po czasie uległy zniszczeniu ze względu na użycie martwych komórek bakterii. W rezultacie bakterie zestaliły próbkę, jednak nietrwale, na bardzo krótki okres czasu.
Anbu i in. (2016)	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	zagęszczenie ziarenek piasku na skutek działania podłoża zestalającego, brak dokładniejszych badań
Canakci i in. (2015)	<i>Sporosarcina pasteurii</i> (<i>Bacillus pasteurii</i>)	uzyskanie zestalonych bloczków piasku; zbadanie wytrzymałości na ścinanie oraz pomiar konsolidacji próbek piasku (opis w artykule)

5.2. Badania wytrzymałości na ścinanie

Wytrzymałość na ścinanie określa się na podstawie dwóch parametrów, to jest spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Canakci i in. (2015) w celu porównania próbek ze szczepami bakterii z próbką testową, przebadali je wszystkie w aparacie skrzynkowym. Próbkę została poddana trzem wartościom naprężenia 13,6 kPa, 20,4 kPa oraz 27,2 kPa. Najlepsze wyniki zaobserwowano przy naprężeniu 13,6 kPa oraz przemieszczeniu poziomym 2 mm. Maksymalne przemieszczenie osiągnięte w badaniach to 6 mm. Autorzy zauważyli przyrost kohezji oraz kąta tarcia wewnętrznego w próbkach mikrobiologicznych w porównaniu do próbki testowej. Próbkę ze szczepami bakterii osiągnęły wartość kohezji o 23% większą od próbki testowej, natomiast kąt tarcia wewnętrznego był o 21% większy w próbkach mikrobiologicznych. Wyniki dowodzą, że bakterie *Bacillus pasteurii* swoją aktywnością spowodowały wzrost wytrzymałości gruntu na ścinanie.

5.3. Pomiary konsolidacji próbek piasku

Pomiary konsolidacji próbek piasku przeprowadzono (Canakci i in., 2015) na próbkach ze szczepami bakterii (mikrobiologicznych) oraz na próbce kontrolnej w celu porównania wyniku. Podczas badań przy małej wartości naprężenia (między 10 a 50 kPa) wyraźnie widać różnice między próbkami mikrobiologicznymi a próbką testową. Dla próbek mikrobiologicznych w zakresie naprężenia między 10 a 50 kPa różnica wskaźnika porowatości jest mniejsza niż dla próbki kontrolnej i wynosi 0,2 (maleje z poziomu 2,2 do 2,0). Różnica wskaźnika porowatości dla próbki testowej w zakresie od 10 do 50 kPa wynosi 0,4 (maleje z poziomu 2,5 do 2,1). Przy naprężeniu powyżej 50 kPa wskaźnik porowatości maleje w podobny sposób we wszystkich próbkach.

6. Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie stanu wiedzy dotyczącej wykorzystania procesu mikrobiologicznego do uzyskiwania osadu wapnia w celu zwiększenia parametrów wytrzymałościowych gruntów. Przegląd literatury został wykonany w celu opracowania założeń pracy dotyczącej wykorzystania MICP w polskich warunkach. Przedstawiono proces przygotowywania

próbek piasku do badań, inkubacji z bakteriami oraz wyniki badań wytrzymałościowych. Uzyskane wyniki wskazują, że metoda MICP korzystnie wpływa na parametry wytrzymałościowe gruntów. Proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu wapnia może mieć zastosowanie w przyszłości ze względu na aspekty ekologiczne. Stwarza on perspektywę dla innowacyjnej biocementacji gruntów. Metoda ta odnajdzie zastosowanie w budownictwie wyłącznie, gdy stanie się łatwo dostępna, wydajna i wygodna, a proponowane metodyki zostaną udoskonalone w badaniach iniekcyjnych w skali technicznej.

Literatura

- Anbu P., Kang Ch.-H., Shin Y.-J., So J.-S. (2016). Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus. Springer Open Journal*, Vol. 5, Issue 250, DOI 10.1186/s40064-016-1869-2.
- Bang S.S., Galian J.K., Ramakrishnan V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, Issues 4-5, 404-409.
- Canakci H., Sidik W., Kilic I.H. (2015). Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. *Soils and Foundations*, Vol. 55, Issue 5, 1211-1221.
- Celik F., Canakci H. (2011). Shear strength properties of organic soil with Sand column. W: *Proceedings of the International Balkan Conference on Challenges of Civil Engineering*, EPOKA University Tirane, Albania.
- Ciurli S., Benini S., Rypniewski W.R., Wilson K.S., Miletti S., Mangani S. (1999). Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms. *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 190, 331-355.
- Dejong J.T., Fritzges M.B., Nusslein K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, Issue 11, 1381-1392.
- Dejong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 197-210.
- De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. (2010). Microbial carbonate precipitation In construction materials: a review. *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 118-136.
- Dick J., De Windt W., De Graef B., Saveyn H., Van der Meeren P., De Belie N., Verstraete W. (2006). Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone

- by *Bacillus* species. *Biodegradation*, Vol. 17, No. 4, 357-367.
- Douglas S., Beveridge T.J. (1998). Mineral formation by bacteria in natural communities. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 26, No. 2, 79-88.
- Edil T.B. (2003). Recent advances in geotechnical characterization and construction over peats and organic soils. W: *Proceedings of the 2nd International Conference in Soft Soil Engineering and Technology*, Putrajaya, Malaysia, 1-6.
- Furstenberg A., Lechowicz Z., Szymanski A., Wolski W. (1983). Effectiveness of vertical drains in organic soils. W: *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, Vol. 2, 611-616.
- Gorospa C.M., Han S.H., Kim S.G., Park J.Y., Kang C.H., Jeong J.H., So J.S. (2013). Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 18, No. 5, 903-908.
- Hamdan N., Kavazanjian E. Jr., Ritmann B.E., Karatas I. (2011). Carbonate mineral precipitation for soil improvements through microbial denitrification. W: *Proceedings of the GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, TX, ASCE Geotechnical Special Publication 211, 3925-3934.
- Hammes F., Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 1, No. 1, 3-7.
- Hammes F., Saka A., Hege K.V., de Wiele T.V., Vanderdeelen J., Siciliano S.D., Verstraete W. (2003). Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic CaCO_3 precipitation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, Vol. 78, No. 6, 670-677.
- Hampton M.B., Edil T.B. (1998). Strength gain of organic ground with cement-type binders. W: *Soil Improvement for Big Digs*, 135-148.
- Jelšić N., Leppänen M. (1999). Mass stabilization of peat in road and railway construction. W: *Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm, Sweden, 59-66.
- Jimenez-Lopez C., Rodriguez-Navarro C., Pinar G., Carrillo-Rousua F.J., Rodriguez-Gallego M., Gonzalez-Munoz M.T. (2007). Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. *Chemosphere*, Vol. 68, Issue 10, 1929-1936.
- Kańska Z., Grabińska-Łoniewska A., Łebkowska M., Rzechowska E. (2006). Ćwiczenia laboratoryjne z biologii sanitarnej. Część I. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Karatas I., Kavazanjian E. Jr., Ritmann B.E. (2008). Microbially induced precipitation of calcite using *Pseudomonas* denitrificans. W: *Proceedings of the 1st International Conference on Biotechnical Engineering*, Delft, The Netherlands (CDROM).
- Koda E., Szymanski A., Wolski W. (1989). Behaviour of geodrains in organic subsoil. W: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 1377-1380.
- Roden E.E., Leonardo M.R., Ferris F.G. (2002). Immobilization of strontium during iron biomineralization coupled to dissimilatory hydrous ferric oxide reduction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, Issue 16, 2823-2839.
- Sarda D., Choonia H.S., Sarode D. D., Lele S. S. (2009). Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: a novel application. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Vol. 36, Issue 8, 1111-1115.
- Smith K., Ferry J.G. (1999). A plant type (L class) carbonic anhydrase from the thermophilic methanoeubacterium *Methanobacterium thermoautotrophicum*. *Journal of Bacteriology*, Vol. 181, Issue 20, 6247-6253.
- Van Paassen L.A., Daza M.C., Staal M., Sorokin D.Y., Van der Zon W., Van Loosdrecht M.C. (2010a). Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecological Engineering*, Vol. 36, Issue 2, 168-175.
- Van Paassen L.A., Ghose R., Van der Linden T.J.M., Van der Star W.R.L., Van Loosdrecht M.C.M. (2010b). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 12, 1721-1728.
- Warthmann R., Van Lith Y., Vasconcelos C., McKenzie J.A., Karpoff A.M. (2000). Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments. *Geology*, Vol. 28, No. 12, 1091-1094.
- Welland M., throughthesandglass.typepad.com., post z dnia 19/07/2010.
- Yang D.S., Yagihashi J.N., Yoshizawa S.S. (1998). Stabilization of very soft soils and organic soils. W: *Soil Improvement for Big Digs*, 96-110.

ROLE OF UREASE ACTIVE BACTERIA IN THE PROCESSES OF SOIL BIOCEMENTATION

Abstract: The aim of the paper is to present and describe the use of microbially induced calcite precipitation process (MICP). The basis of MICP process is bacterial metabolic activity which thereby promotes the precipitation of calcium carbonate in the form of calcite. Ureolytic bacteria that hydrolyze urea, proved to be the most effective to perform precipitation of calcium carbonate. Therefore their application seems to be beneficial in the processes biocementation of soils. The paper presents the methods of obtaining the urease active bacteria and describes laboratory methods in order to achieve the best strength parameters of tested soil.

Praca powstała pod opieką promotorów dr. hab. inż. Pawła Popielskiego, profesora PW, oraz dr Katarzyny Affek na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

ZMNIEJSZENIE EMISJI CO₂ W PROCESIE PRODUKCJI CEMENTU

Jakub SIEMIENUK, Ewa SZATYŁOWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

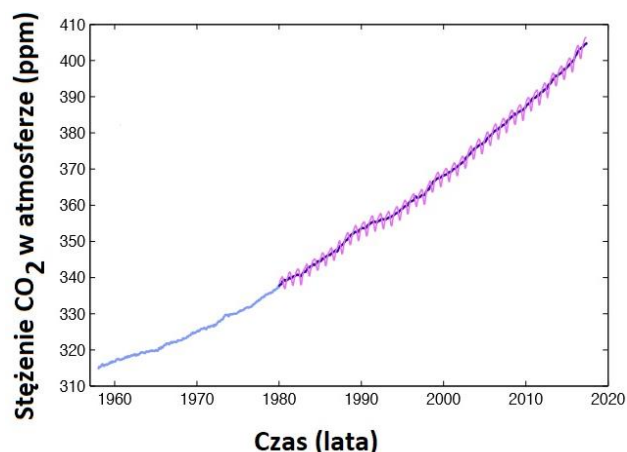
Streszczenie: Emisje dwutlenku węgla (CO₂) z paliw kopalnych i przemysłu stanowią około 90% wszystkich emisji CO₂ z działalności człowieka. Przez ostatnie trzy lata globalna emisja CO₂ utrzymywała się na stabilnym poziomie, pomimo stałego wzrostu w gospodarce światowej. Prognozy dla 2017 roku wskazują na wzrost emisji o 2,0% od poziomu z 2016 roku i osiągnięcie rekordowego poziomu 36,8±2 Gt emisji CO₂. Dalsze symulacje ekonomiczne potwierdzają dalszy wzrost emisji w 2018 roku (Jackson i in., 2017). Biorąc pod uwagę fakt, że ponad 5% globalnej emisji CO₂ stanowi emisja z przemysłu, celem pracy było określenie korzyści paliwowych i ekologicznych wynikających z używania paliw alternatywnych w przemyśle cementowym. W artykule omówiono właściwości wybranych paliw alternatywnych, wykorzystywanych w piecach cementowych jako źródło ciepła przy współspalaniu z węglem. Zastosowanie palnych frakcji odpadów jako paliw alternatywnych powoduje zmniejszenie ich ilości na składowiskach, co w rezultacie powoduje zmniejszenie emisji CO₂, ponieważ przy spalaniu odpadów w cementowniach nie zwiększa się ilość emitowanego CO₂.

Słowa kluczowe: emisja CO₂, produkcja cementu, zrównoważony cement, recykling.

1. Wprowadzenie

Dwutlenek węgla jest silnym gazem cieplarnianym, a wzrost jego ilości w atmosferze prowadzi do zmiany klimatu Ziemi. Spalanie węgla, ropy i gazu, wprowadza do atmosfery coraz większe ilości dwutlenku węgla. Trwająca już od pokoleń emisja dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych rośnie wykładniczo, czyli o stały procent co roku. Pierwsze pomiary wskazywały stężenie CO₂ na poziomie zaledwie 315 ppm. Łącznie, od czasów rewolucji przemysłowej, zawartość dwutlenku węgla w atmosferze wzrosła o ponad 40% – do roku 1800 koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze utrzymywała się na praktycznie niezmiennym poziomie 280 ppm (CDIAC, 2017). Na rysunku 1 przedstawiono stężenie CO₂ w atmosferze w latach 1958-2017.

Wzrost koncentracji CO₂ w atmosferze powoduje globalny wzrost temperatury powierzchni Ziemi i oceanów. Zjawisko to powszechnie określa się mianem ocieplenia klimatu (Siemiątkowski, 2013). Raporty Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) przewidują, że jeśli nie powstrzyma się emisji CO₂ do atmosfery to konsekwencje dla klimatu będą dość poważne. Jedną z najważniejszych będzie zaburzenie poziomu opadów deszczu w poszczególnych strefach klimatycznych, co wpłynie na zmniejszenie produkcji żywności (Pawłowski i Pawłowski, 2016). Według naukowców zajmujących się obserwacją emisji i kumulacji dwutlenku węgla, przemysł i spalanie paliw

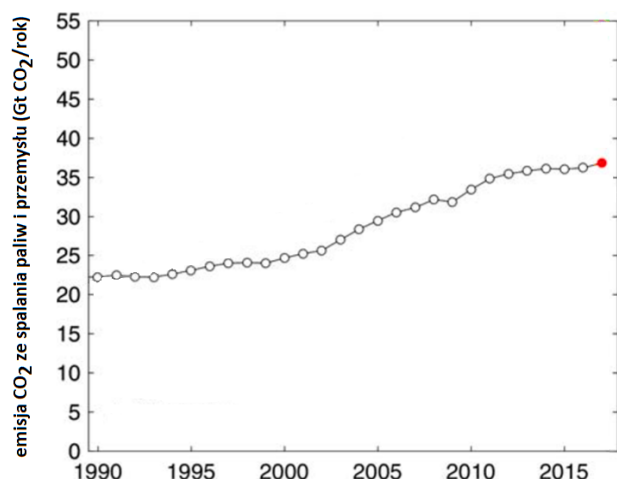


Rys. 1. Trend zmian stężenia CO₂ w atmosferze w okresie od 1958 do 2017 (Dlugokencky i Tans, 2017)

kopalnych stanowią około 90% wszystkich emisji CO₂ do atmosfery z działalności człowieka. Dwutlenek węgla może pozostać w atmosferze przez dziesiątki lat, zaś jego naturalne sposoby absorpcji są ograniczone. Na rysunku 2 przedstawiono globalną ilość w gigatonach emitowanego CO₂ do atmosfery ze spalania paliw i przemysłu. Ostatni punkt oznacza rok 2017, w którym emisja CO₂ z sektora paliw kopalnych i cementu wyniosła 36,8 Gt CO₂, co w stosunku do 2016 było o 2% wyższe (Jackson i in., 2017). Obecnie spośród 214 krajów trzy z nich i jedna organizacja międzynarodowa odpowiadają za 61% całkowitych globalnych emisji CO₂ (Olivier i in.,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: e.szatyłowicz@pb.edu.pl

2014). Podział światowej emisji dwutlenku węgla według państw wygląda następująco: Chiny generują aż 29% Gt CO₂, Stany Zjednoczone 15%, Unia Europejska 10% a Indie 7%. Pozostałe 39% to reszta świata (CDIAC, 2017; Jackson i in., 2017).



Rys. 2. Emisja CO₂ w Gt/rok (CDIAC, 2017; Jackson i in., 2017)

Zmniejszenie emisji CO₂ od dłuższego czasu jest jednym z priorytetowych zagadnień inżynierii i ochrony środowiska. Szczególnie jest to ważny problem dla tych gałęzi przemysłu, które są znaczącymi emiterami dwutlenku węgla, jak: energetyka zawodowa czy przemysł cementowy. Produkcja i wykorzystanie betonu, najszerzej stosowanego materiału budowlanego na całym świecie, pociąga za sobą konsekwencje środowiskowe w postaci emisji dużych ilości gazów cieplarnianych do atmosfery (Mobasher, 2008; Henry i Kato, 2014; Jin i in., 2015). Zwłaszcza produkcja cementu portlandzkiego przyczynia się do emisji CO₂ (Bentz, 2010; Bondar i in., 2011).

W ostatnich latach pojawiła się koncepcja cementu zrównoważonego, którą często określa się jako cement o mniejszym wpływie na środowisko i gospodarkę (Susilorini i in., 2014; Jin i in., 2015), co można osiągnąć poprzez (Tomasiak i Duda, 2015; Duda i in., 2017):

- zwiększenie efektywności energetycznej dzięki nowoczesnej technologii suchego procesu;
- wykorzystaniu paliw alternatywnych (w tym biomasy) do zastąpienia węgla i koksu w procesie ogrzewania pieca cementowego;
- wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla;
- zastąpienie klinkieru innymi składnikami mineralnymi w cemencie.

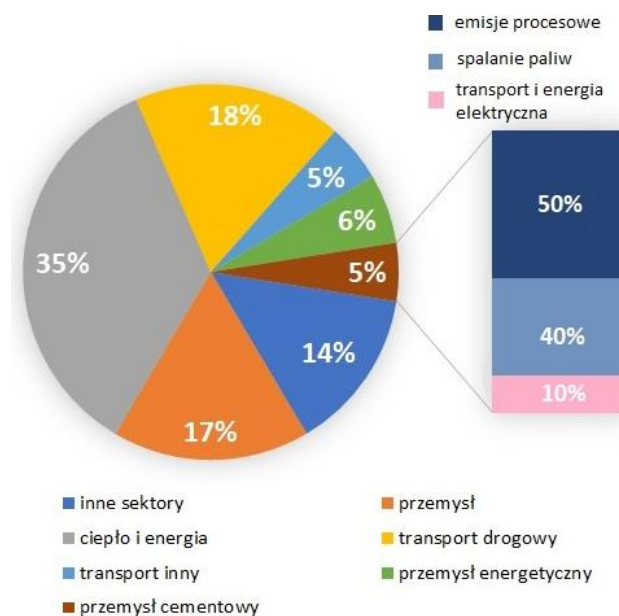
Według Mannana i Ganapathy (2004), zastosowanie materiałów odpadowych rolniczych i przemysłowych jako materiałów zastępczych w cemencie ma podwójne zalety: obniża koszty i stanowi dobry sposób ich unieszkodliwiania. Użycie materiałów po przekształceniu tych odpadów w użyteczne materiały jest korzystne dla środowiska i pozwala zachować zasoby naturalne (Jin i in., 2015).

W artykule omówiono właściwości wybranych paliw alternatywnych, wykorzystywanych w piecach cementowych jako źródło ciepła przy współspalaniu

z węglem i ich wpływ na emisję CO₂ do atmosfery. Stosowanie odpadowych paliw alternatywnych ogranicza wydobycie paliw naturalnych, przez co poprawia bilans emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji klinkieru, który jest głównym składnikiem cementu.

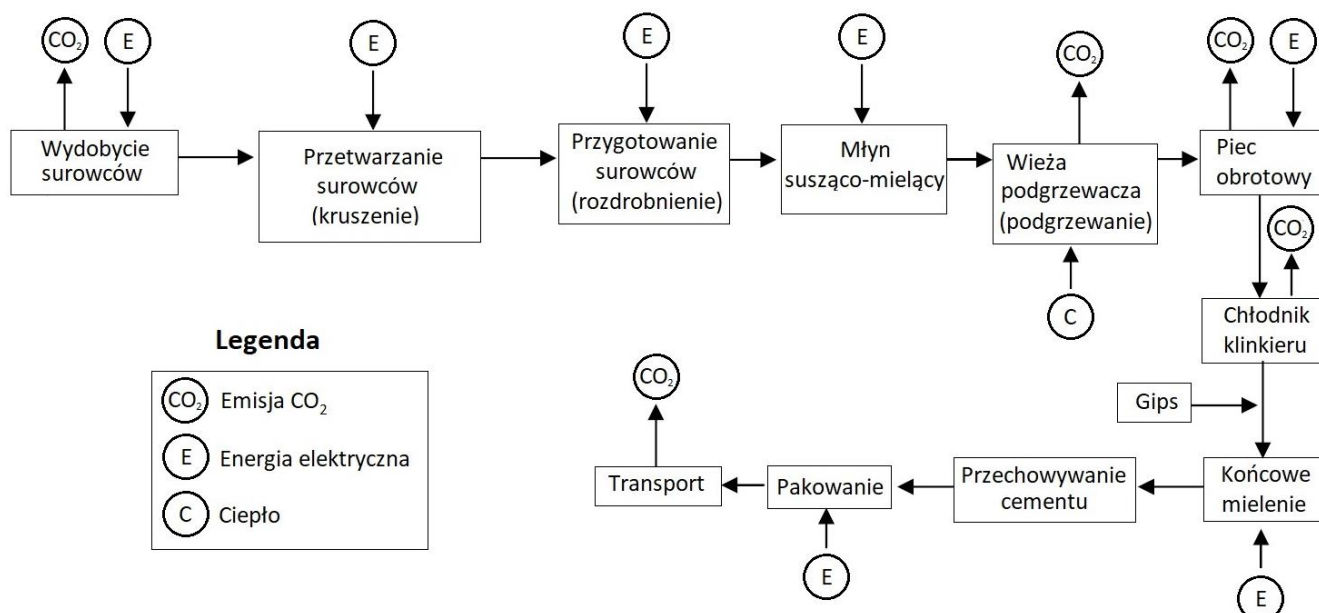
2. Emisja CO₂ w procesie produkcji cementu

Produkcja cementu powoduje około 5% globalnej emisji CO₂ spowodowanej działalnością człowieka. Z tego 50% ogólnej emisji to emisje procesowe, które zachodzą podczas produkcji klinkieru, 40% pochodzi ze spalania paliw w celu ogrzania pieca cementowego, a około 10% pochodzi z wykorzystania energii elektrycznej i transportu. Zapotrzebowanie na cement będzie nadal rosło na całym świecie, szczególnie w gospodarkach wschodzących, w których bardzo potrzebne są mieszkania i infrastruktura, które stymulują rozwój. Zmniejszenie emisji CO₂ z produkcji cementu jest zatem ważnym i pilnym zadaniem dla sektora przemysłu cementowego (Benhelal i in., 2012). Na rysunku 3 przedstawiono udział przemysłu cementowego w globalnej emisji dwutlenku węgla oraz podział emisji CO₂ z przemysłu cementowego według udziałów na poszczególne źródła.



Rys. 3. Udział przemysłu cementowego w globalnej emisji CO₂ (Benhelal i in., 2012)

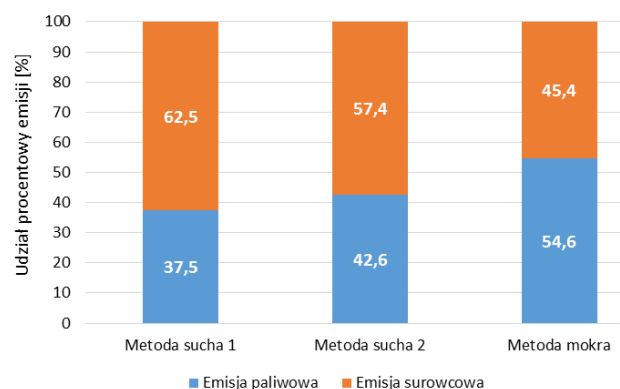
Dwutlenek węgla w procesach produkcji cementu jest emitowany z dwóch podstawowych źródeł bezpośrednich: procesu dekarbonizacji węglanu wapnia i spalania paliw oraz dwóch źródeł pośrednich: produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej w cementowni i transportu. Duża emisja CO₂ przez przemysł cementowy wymusiła wypracowanie strategii ograniczenia tej emisji poprzez: udoskonalenie procesów produkcyjnych, modernizację urządzeń, zastępowanie paliw pierwotnych paliwami alternatywnymi z odpadów, optymalizację składu cementu, odzyskiwanie energii cieplnej z procesów produkcyjnych. Na rysunku 4 przedstawiono proces



Rys. 4. Schemat procesu produkcji cementu (Huntzinger i Eatmon, 2009)

produkcji cementu, zaznaczono etapy, w których wykorzystywana jest energia elektryczna, energia cieplna oraz gdzie w ciągu produkcyjnym zachodzi emisja CO₂ do otoczenia.

Proces produkcji cementu rozpoczyna się od wydobycia surowców (kamień wapienny, margiel lub kreda, które wydobywa się w kopalniach odkrywkowych). Następnie następuje kruszenie i mielenie surowców. Potem wytwarza się klinkier (główny składnik cementu) w piecu o temperaturze gazów sięgającej 2000°C, w której surowce, takie jak kamień wapienny (węglan wapnia) z niewielką ilością innych materiałów (na przykład gliny) ogrzewa się do temperatury 1450°C. W czasie tego procesu, zwanego kalcynacją, węglan wapnia przekształca się w tlenek wapnia (wapno), który następnie reaguje z pozostałymi składnikami surowca, tworząc nowe minerały zwane łącznie klinkierem. Ten prawie stopiony materiał schładza się następnie szybko do temperatury 100-200°C. Następnie klinkier miele się wraz z gipsem i innymi materiałami na szary pył znany jako cement (Huntzinger i Eatmon, 2009; ECAC, 2014). W związku z tym, przemysł cementowy dąży do ograniczenia zużycia energii, a zarazem zmniejszenia emisji CO₂ poprzez poprawę wydajności piecy cementowych oraz zastąpienia energochłonnej metody mokrej, metodami suchą i półsuchą. Jednakże poprawa procesji technologicznej to nie wszystko, bo znaczna część emisji CO₂ z produkcji klinkieru, głównego składnika cementu jest to emisja paliwowa. Na rysunku 5 przedstawiono procentowe udziały rodzaju emisji CO₂. Z rysunku 4 wynika, że od 54,6 do 37,5% całkowitej emisji CO₂ z produkcji klinkieru głównego składnika cementu jest emisją paliwową. W wyniku modernizacji przemysłu cementowego wyeliminowana została praktycznie energochłonna metoda mokra, która obecnie stanowi niecałe 2% produkcji w Polsce. Natomiast średnia emisja CO₂ w warunkach krajowych w roku 2008, związana z wyprodukowaniem 1 Mg klinkieru

Rys. 5. Wskaźniki procentowe emisji CO₂ paliwowej i surowcowej w zależności od metody wytwarzania klinkieru (Tomasiak i Duda, 2015)

cementowego, wyniosła około 856 kg CO₂, z tego około 60% stanowi emisja z surowca (535 kg CO₂/Mg klinkieru). Uwzględniając aktualną zdolność produkcyjną cementowni w Polsce, emisja w skali roku wynosi około 11 mln Mg CO₂ (Tomasiak i Duda, 2015).

Zasadne staje się stosowanie paliw alternatywnych na rzecz paliw kopalnianych, ponieważ frakcja biogenna zawarta w stałych paliwach wtórnych oraz biomasa (w tym osady ściekowe i inne odpady z procesów technologicznych) uważane są za neutralne w kontekście emisji CO₂. Oznacza to, że w rozliczeniach emisji CO₂ wskaźnik emisji jest zerowy. Zjawisko to jest obserwowane w przemyśle cementowym w Polsce, gdzie w ostatnich kilku latach znacznie wzrosło zużycie paliw alternatywnych, co przełożyło się na zmniejszenie średniego wskaźnika emisji dwutlenku węgla i w 2016 roku wyniósł on 816 kg CO₂/Mg klinkieru. Zgodnie z unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji ustalany jest dopuszczalny limit emisji dla przemysłu cementowego, który obecnie wynosi 766 kg CO₂/Mg klinkieru (Głodek-Bucyk i in., 2016).

3. Paliwa alternatywne w produkcji „cementu zrównoważonego”

Proces technologiczny wytwarzania cementu, ze względu na wielkotonażową produkcję i wysoką energochłonność, należy do procesów uciążliwych dla środowiska. Wynika to między innymi z dużego zużycia surowców wapiennych (kopalnie surowców) oraz paliw – węgla kamiennego. Wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru cementowego stwarza naturalne warunki do wykorzystania palnych odpadów jako substytutu węgla kamiennego (Duczkowska-Kądziel i Duda, 2014). Problemem, przed którym stoi obecnie przemysł cementowy, jest konieczność dalszego ograniczenia energochłonności i emisji CO₂.

Zastosowanie palnych frakcji odpadów jako paliw alternatywnych powoduje zmniejszenie ich ilości deponowanych na składowiskach oraz spalanych w spalarniach, a w rezultacie redukcję emisji CO₂ zarówno ze składowisk, jak i ze spalarni, ponieważ przy spalaniu odpadów w cementowniach nie zwiększa się ilość emitowanego CO₂. Redukcja CO₂ związana jest również z ograniczeniem wydobycia paliw naturalnych (Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki, 2004).

Produkcja cementu jest procesem technologicznym, w którym w sposób użyteczny można wykorzystać odpad w całości. Część organiczna jest źródłem ciepła w piecu a część mineralna staje się wartościowym dodatkiem do wsadu materiałowego. Cementownie w jednym procesie mogą realizować jednocześnie recykling materiałowy i odzysk energetyczny paliwa alternatywnego. Składa się ono z wody w postaci wilgoci, która zostanie odparowana w piecu, substancji organicznych, które dostarczą ciepło w wyniku spalania i części mineralnej, która po spaleniu zostanie skutecznie wbudowana w strukturę klinkieru cementowego.

Wykorzystywanie paliw alternatywnych z odpadów nie może wpływać negatywnie na pracę pieca ani na jakość produkowanego klinkieru oraz nie może powodować zwiększenia zanieczyszczenia składu gazów emitowanych do atmosfery. Paliwa alternatywne są wolnymi od zanieczyszczeń, obojętnymi emisyjnie paliwami z biomasy, czyli odpowiednio wysortowanymi palnymi odpadami posiadającymi wartość opałową. W skład ich wchodzi (Rahman i in., 2015; Mikulcic i in., 2016):

- wysegregowane i rozdrobnione frakcje palne z odpadów komunalnych i przemysłowych nienadające się do recyklingu (RDF);
- zużyte opony w całości i rozdrobnione;
- wysuszone komunalne osady ściekowe;
- biomasa;
- mączka mięsno-kostna;
- odpady ciekłe (na przykład mieszaniny zużytych olejów, rozpuszczalników).

Należy dodać, iż największą pojedynczą grupę spośród wszystkich rodzajów odpadów w Europie, pod względem ilości, stanowią odpady budowlane i rozbiórkowe, które w istotnej części składają się z betonu. Produkcja cementu może zapewnić rozwiązanie problemu, jaki stanowią

te odpady, poprzez ponowne wprowadzenie do procesu rozdrobnionego lub w inny sposób przetworzonego betonu jako zamiennika kamienia wapiennego (Kozłowski i Sawicki, 2004).

Jednocześnie trzeba podkreślić, że cały wytworzony cement musi być bezpieczny i trwały, ponieważ zostanie wykorzystany w budowlach, które mają przetrwać przynajmniej 50 lat, a czasem więcej. Z tego względu duża trwałość produktu końcowego – betonu – stanowi cechę kluczową dla zrównoważonego budownictwa.

3.1. Odpady, odpady ciekłe

Proces technologiczny polega na doborze określonych odpadów w postaci stałej (innych niż niebezpieczne), posiadających odpowiednią wartość energetyczną oraz określone parametry fizykochemiczne, na przykład tworzywa sztuczne, guma, opakowania, tekstylia, drewno i tym podobne. Odpady te poddawane są obróbce mechanicznej, polegającej na rozdrabnianiu, mieszaniu, homogenizacji oraz separacji zanieczyszczeń. Tak przygotowany przemiał jest kontrolowany i gotowy do odbioru, jako pełnowartościowe paliwo zastępcze o parametrach zgodnych z wymaganiami odbiorców. (Sobolewski i in., 2006; Ulewicz i Siwka, 2010). W piecach cementowniczych, gdzie temperatura gazów waha się od 1550°C do 1800°C, a materiału wsadowego w okolicach około 1400°C, następuje spalanie i bezpieczne ich wykorzystanie, jako odpadów palnych w procesie odzysku energii. Poziom temperatur, długie przebywanie w komorze pieca, konieczność utrzymywania nadmiaru tlenu w piecu, brak produktów spalania, powodują, że współspalanie paliw zastępczych w piecach obrotowych jest najbardziej efektywnym wykorzystaniem energii zawartej w odpadach i zgodnym z przepisami prawa ich zagospodarowaniem (Ulewicz i Maciejewski, 2011).

Odpady olejowe są niebezpiecznymi odpadami pochodzącymi ze źródeł motoryzacyjnych, kolejowych, morskich, rolniczych i przemysłowych. W Unii Europejskiej około 1 milion ton zużytego oleju jest wykorzystywana w piecach cementowych jako paliwo alternatywne. Rozpuszczalniki i zużyty olej z różnych gałęzi przemysłu mają wysoką wartość opałową i mogą być stosowane w piecu cementowym jako paliwo alternatywne przy minimalnych kosztach przetwarzania. Zakres wartości grzewczych rozpuszczalnika i zużytego oleju wynosi od 29 MJ/kg do 36 MJ/kg, a zmiany zachodzą ze względu na stosunek różnych substancji chemicznych. Zasadniczo obróbka wstępna nie jest wymagana dla zużytego rozpuszczalnika i zużytego oleju. Oba rodzaje paliwa mogą być podawane przez główny palnik lub kalcynator za pomocą układu opalania olejem opałowym. Nierozcieńczony olej odpadowy można również wykorzystać do uruchomienia procesu głównego palnika (Rahman i in., 2015; Mikulcic i in., 2016).

3.2. Zużyte opony

W trakcie spalania całej lub rozdrobnionej zużytej opony

wytwarza się ciepło, które jest wykorzystywane w procesie technologicznym wypalania klinkieru w piecach cementowych. Dzięki spalaniu opon cementownie uzyskują znaczne oszczędności wynikające z ograniczenia zużycia węgla. Równolegle inicjatywa ta posiada wiele zalet w porównaniu do wykorzystania węgla, na przykład: zmniejszona zostaje emisja do powietrza dwutlenku siarki i dwutlenku węgla, przy spalaniu opon nie powstaje popiół, zostaje polepszona jakość wypalanego klinkieru oraz zwiększona zostaje produktywność procesu. Kaloryczność opon to około 26-30 MJ/kg, a więc wartość zbliżona lub nawet wyższa od kaloryczności węgla kamiennego. Warto dodać, że spalanie w piecu cementowni jest w pełni bezpieczne, a wręcz korzystne dla środowiska, głównie dzięki temu, że jest procesem bezodpadowym. Pozostałości po spalonej oponie zostają wbudowane w struktury cementu. Efektem ekologicznym, oprócz bezodpadowej utylizacji kłopotliwego odpadu jest również ograniczenie zużycia nieodnawialnego źródła, czyli węgla, a także redukcja emisji gazów cieplarnianych – CO₂ (Duda i Wasilewski, 2014).

3.3. Osady ściekowe

Osady ściekowe (produkt uboczny oczyszczania ścieków) można również traktować jako źródło zarówno paliw alternatywnych, jak i surowca w wysokotemperaturowym procesie wytwarzania klinkieru (ECAC, 2014). Ze względu na wysokotemperaturowy proces wypalania klinkieru, cementowy piec obrotowy stwarza szczególnie korzystne warunki do współspalania komunalnych osadów ściekowych z paliwem technologicznym – pyłem węglowym. Udział masowy paliwa z osadów ściekowych w tym procesie nie przekracza zwykle 10% (Niemiec i Zamorska, 2006; Borowski, 2011). Warunki panujące w piecu powodują prawie całkowity rozkład oraz spalanie organicznych substancji palnych wprowadzonych do pieca. Ważną zaletą cementowego pieca obrotowego w stosunku do spalarni osadów lub innego urządzenia jest bezodpadowa utylizacja. Powstający produkt spalania – popiół jest całkowicie zaabsorbowany i trwale związany w klinkierze, nie stwarzając zagrożenia dla środowiska. Należy zwrócić uwagę, że osady ściekowe występują obecnie w nadmiarze, więc również potrzeba znalezienia alternatywnych sposobów ich przetwarzania staje się coraz większa (Duda i Wasilewski, 2014).

3.4. Biomasa

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki (Dz. U. 2012 poz. 1229) biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego te produkty i części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji (Trembacz i Ślędecki, 2009).

Czyste, neutralne emisyjnie paliwa z biomasy wykorzystywane obecnie w przemyśle cementowym

to mączka zwierzęca, odpady drewniane, trociny i osady ściekowe. Poza tymi paliwami w światowym przemyśle cementowym spala się również wiele innych organicznych materiałów odpadowych, ale na mniejszą skalę. Odpady zawierające biomasę są głównie wstępnie przetworzonymi produktami przemysłowymi i komunalnymi – zawierającymi organiczne włókna, tkaniny i papier (ECAC, 2014; Mikulcic i in., 2016).

3.5. Mączka mięsno-kostna

Od roku 1994 w Unii Europejskiej ustanowiono zakaz stosowania mączki mięsno-kostnej jako składnika pasz dla bydła oraz zakazano składowania jej na składowiskach. Zaczęto, więc stosować mączkę mięsno-kostną jako paliwo w przemyśle cementowym. Dostępność mączki jest znacznie wyższa niż innych paliw alternatywnych, stąd na przykład we Francji około 45% rocznej produkcji mączki jest spalana w cementowniach. Jedną z wad stosowania MM-K w przemyśle cementowym jako paliwa jest zawartość wilgoci, która wynosi około 70% objętościowo a także dość niska wartość opałowa 14,47 MJ/kg. MM-K jest zwykle podawana w piecu palnikowym i może być wymagana dodatkowa ilość powietrza, jeżeli jest ona wykorzystywana w kalcynatorze. W przypadku zasilania MM-K do spalania potrzebne jest około 5-10% więcej powietrza (Rahman i in., 2015; Mikulcic i in., 2016).

4. Podsumowanie

Zrównoważony rozwój jest obecnie jednym z największych wyzwań stojących przed firmami na całym świecie, szczególnie dla tych z branży cementowej. Pod wpływem presji otoczenia zewnętrznego, firmy podejmują różne działania w tym kierunku. Oprócz poszukiwania innych metod technologicznego ograniczenia emisji CO₂ oraz poprawy efektywności energetycznej (wykorzystanie paliw alternatywnych), co jest najtańszym sposobem redukcji gazów cieplarnianych, podobnie jak w przypadku energetyki zawodowej uwzględniać nowe – wtórne metody, jak na przykład CCS (*Carbon Capture and Storage*), które polegają na wychwytywaniu i składowaniu dwutlenku węgla lub CCU (*Carbon Capture and Utility*) – wychwytywaniu i wykorzystaniu (Tomasiak i Duda, 2015).

Wynikiem stosowania w procesie produkcji cementu odpadów przemysłowych i komunalnych jest obniżenie energochłonności procesu i ograniczenie emisji szkodliwych gazów. W porównaniu z innymi metodami termicznej utylizacji, cementowy piec obrotowy posiada wiele zalet, które gwarantują bezpieczne dla środowiska spalanie różnych paliw alternatywnych. Spalanie w piecu obrotowym jest metodą bezodpadową, wszystkie produkty spalania (popiół i żużel) są absorbowane przez klinkier (Duczkowska-Kądziel i Duda 2014).

Wykorzystanie alternatywnych surowców może dawać wiele korzyści, w tym zmniejszyć potrzebę wydobywania

kamienia oraz zmniejszyć emisję CO₂, pod warunkiem, że materiały alternatywne zostały już zdekarbonizowane. Wykorzystując paliwa alternatywne do produkcji klinkieru, można zredukować emisję CO₂, czyli zmniejszyć oddziaływanie cementowni na środowisko, a także odciążyć lokalne składowiska i przyczynić się do ograniczenia ilości składowanych odpadów.

Oprócz korzyści ekonomicznych i środowiskowych, wynikających z wykorzystania w procesie produkcji cementu surowców odpadowych, dąży się do zmiany ciągle jeszcze panującego w społeczeństwie wizerunku cementowni jako zakładu szkodliwego dla środowiska naturalnego. Cementownie, które praktycznie nie wytwarzają odpadów, mogą spełniać ważną rolę w ochronie środowiska, wykorzystując odpady komunalne i odpady z innych procesów technologicznych (Duda, 2002).

Literatura

- Benhelal E., Zahedi G., Hashim H. (2012). A novel design for green and economical cement 14 manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 22, 60-66.
- Bentz D. P. (2010). Powder additions to mitigate retardation in high-volume fly ash mixtures. *ACI Materials Journal*, Vol. 107, Issue 5, 508-514.
- Bondar D., Lynsdale C. J., Milestone N. B., Hassani N., Ramezaniapour A. A. (2011). Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 108, Issue 1, 64-72.
- Borowski G. (2011). Przetwarzanie popiołu ze spalania osadów ściekowych na materiał budowlany. *Inżynieria Ekologiczna*, 25, 251-258.
- CDIAC (2017). Carbon Dioxide Information Analysis Center, [http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/]
- Blugokencky E., Tans P. (2017). Trends in atmospheric carbon dioxide. *National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory* (NOAA/ESRL), [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html]
- Duczkowska-Kądział A., Duda J. (2014). Odpady komunalne i przemysłowe alternatywnymi surowcami i paliwami w procesie produkcji cementu. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, Vol. 7, Nr 18, 172-187.
- Duda J. (2002). Produkcja cementu a ekologia. *Surowce i Maszyny Budowlane*, 2/2002, 4-6.
- Duda J., Kołosowski M., Tomasiak J. (2017). Ekologiczne i technologiczne uwarunkowania działalności Innowacyjnej w przemyśle materiałów budowlanych. *Modern Management Review*, Vol. 24, Nr 1, 7-19.
- Duda J., Wasilewski M. (2014). Innowacyjna technologia utylizacji osadów ściekowych. *Materiały z XVIII Konferencji „Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, Zakopane, Tom 1, 68-77.
- ECAC - European Cement Association Cembureau (2014). Rola cementu w niskoemisyjnej gospodarce do roku 2050, [www.polskicement.pl].
- Głodek-Bucyk E., Śląderek F., Kalinowski W., Dudkiewicz M. (2016). Wpływ wykorzystania osadów ściekowych w technologii produkcji klinkieru portlandzkiego na poziomie emisji CO₂. *Prace Instytutu Ceramiki i Techniki Budowlanej*, Vol. 6, Nr 26, 40-50.
- Henry M., Kato Y. (2014). Understanding the regional context of sustainable concrete in Asia: case studies in Mongolia and Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 82, 86-93.
- Huntzinger D.N., Eatmon T.D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, Issue 7, 668-675.
- Jackson R. B., Le Quere C., Andrew R. M., Canadell J. G., Peters G. P., Roy J., Wu L. (2017). Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions. *Environmental Research Letters*, Vol. 12, No. 11, 110202.
- Jin R., Chen Q., Soboyejo A. (2015). Survey of the current status of sustainable concrete production in the U.S.. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 105, 148-159.
- Kozłowski M., Sawicki M. (2004). Recykling materiałów budowlanych rozbiórkowych. *Recykling*, 11/2004, 40-41.
- Mannan M. A., Ganapathy C. (2004). Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Building and Environment*, Vol. 39, 441-448.
- Mikulcic H., Jaromír Klemeš J. J., Vujanović M., Urbaniec K., Dui N. (2016). Reducing greenhouse gases emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 136, 119-132.
- Mobasher B. (2008). USA-concrete construction industry-cement based materials and civil infrastructure, in: *CBM-CI International Workshop*, Karachi, Pakistan, 73-90.
- Niemiec W., Zamorska J. (2006). Zarys technologii zagospodarowania niebezpiecznych odpadów organicznych. *Ekologia i Technika*, 84/2006, 14-19.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. (2014). Trends in Global CO₂ Emissions; 2014 Report.
- Pawłowski A., Pawłowski L. (2016). Wpływ sposobów pozyskiwania energii na realizację paradygmatów zrównoważonego rozwoju. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Vol. 18, 19-37.
- Rahman A., Rasul M. G., Khan M. M. K., Sharma S. (2015). Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel*, Vol. 145, 84-99.
- Siemiątkowski G. (2013). Emisja antropogenicznych gazów cieplarnianych i ich wpływ na efekt cieplarniany. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, Vol. 6, Nr 15, 81-90.
- Sobolewski A., Wasilewski R., Dreszer K., Stelmach S. (2006). Technologie otrzymywania i kierunki zastosowań paliw alternatywnych otrzymanych z odpadów. *Przemysł Chemiczny*, 85/2006, 1080-1084.
- Susilorini M. I. R., Hardjasaputra H., Tudjono S., Hapsari G., Wahyu S. R., Hadikusumo G., Sucipto J. (2014). The advantage of natural polymer modified mortar with seaweed: green construction material innovation for sustainable concrete. *Procedia Engineering*, Vol. 95, 419-425.
- Tomasiak J., Duda J. (2015). Innowacyjne techniki w przemyśle cementowym. W: *Współczesne instrumenty innowacji. Prace Naukowe WWSZiP*, Vol. 36, 153-165.
- Ulewicz M., Maciejewski P. (2011). Ekologiczne korzyści ze spalania paliw alternatywnych. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, Nr 160, 384-402.
- Ulewicz M., Siwka J. (2010). Procesy odzysku i recyklingu wybranych materiałów. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Częstochowa.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E. (2004). Możliwości ograniczenia emisji CO₂ w przemyśle cementowym, *Polityka Energetyczna*, Tom 7, Wydawnictwo Instytut GSMiE PAN, Kraków, 555-564.

REDUCING CO₂ EMISSIONS IN THE PROCESS OF CEMENT PRODUCTION

Abstract: Emissions of carbon dioxide (CO₂) from fossil fuels and industry account for around 90% of all CO₂ emissions from human activities. Over the last three years, global CO₂ emissions have remained stable despite steady growth in the global economy. In 2017, Forecasts show an increase in emissions by 2.0% from the level of 2016, reaching a record level of 36.8 ± 2 Gt CO₂ emissions. Further economic simulations are likely to further increase emissions in 2018 (Jackson et al 2017). Considering the fact that over 5% of global CO₂ emissions are

emissions from the cement industry, the aim of the work was to determine the fuel and ecological benefits resulting from the use of alternative fuels in the cement industry. The article discusses the properties of selected alternative fuels used in cement kilns as a source of heat in co-firing with coal. The use of combustible waste fractions as alternative fuels causes a reduction in their quantity in landfills, which in turn results in a reduction of CO₂ emissions, as waste incineration in cement plants does not increase the amount of CO₂ emitted.

SPOSOBY OGRANICZENIA HAŁASU EMITOWANEGO DO ŚRODOWISKA PRZEZ TRANSPORT LOTNICZY

Aleksandra ŚLIWIŃSKA*

Wydział Zarządzania i Dowodzenia, Akademia Sztuki Wojennej, Al. gen. A. Chruściela „Montera”, 00-910 Warszawa

Streszczenie: Wykonywanie transportu lotniczego, jak również prowadzenie działalności na terenie portów lotniczych, odpowiada za zanieczyszczenie środowiska hałasem, który utrudnia funkcjonowanie i ma wpływ na życie ludzi i zwierząt. W artykule omówione zostały sposoby redukcji emisji wysokich dźwięków do środowiska, których źródłem są przede wszystkim statki powietrzne, a także funkcjonowanie lotnisk. Przeprowadzone badania wskazały, że stosowane są liczne rozwiązania, które ograniczają emisję hałasu. Wprowadzenie i wykorzystanie nowych technologii, a także rozwiązań technologicznych do walki ukierunkowanej na obniżenie hałasu zarówno w sposób czynny, jak i bierny, pociąga za sobą zmniejszenie negatywnego wpływu hałasu na środowisko.

Słowa kluczowe: transport lotniczy, lotnictwo, zanieczyszczenie środowiska, hałas, ograniczenie hałasu.

1. Wprowadzenie

Celem pracy było scharakteryzowanie sposobów, których zaimplementowanie zarówno na terenie portów lotniczych i ich otoczeniu, jak i na konstrukcjach lotniczych pozwala na ograniczenie hałasu emitowanego do środowiska przyrodniczego przez transport lotniczy. Artykuł jest odpowiedzią na problem badawczy dotyczący sposobów obniżenia negatywnego wpływu hałasu, emitowanego do środowiska przez transport lotniczy.

Obecnie można zauważyć znaczny wzrost w intensywności ruchu lotniczego. Duża mobilność społeczeństwa wymusza powstanie lotnisk, które są niezbędne do obsłużenia pasażerów, jak i wykonywania bezpiecznych operacji lotniczych, na ich płaszczyznach. W wyniku funkcjonowania portów lotniczych jak i samych przewozów lotniczych wytwarzany jest hałas, który wpływa w sposób niekorzystny na lokalne środowisko.

Hałas to nieprzyjemny, niepożądany dźwięk dochodzący z otoczenia, który utrudnia i ma wpływ na życie oraz funkcjonowanie człowieka, a także oddziałuje na zwierzęta. Jest negatywnym zjawiskiem dla lokalnego środowiska przyrodniczego. Nadmierna emisja hałasu i jego wysokie natężenie prowadzą do wielu szkód w organizmach żywych, w szczególności u człowieka. Zbyt wysokie dźwięki mogą powodować uszkodzenie lub nawet utratę słuchu, drgania organów wewnętrznych, co spowodować może liczne choroby, a nawet i śmierć. Z drugiej jednak strony świadomość zagrożenia wynikającego z negatywnego wpływu hałasu na środowisko sprawia, że podejmowane są liczne

inicjatywy, jak i implementowane są rozwiązania mające na celu obniżenie nadmiernej emisji dźwięków i zredukowanie ich szkodliwego wpływu. Działania te mogą obrać formę bierną, która skupia się na zminimalizowaniu skutków hałasu, jak i formę czynną, która przede wszystkim opiera się na zmianach u źródła hałasu. Najczęściej w przypadku transportu lotniczego prób obniżenia nadmiernej emisji niepożądanych dźwięków dokonuje się w obrębie układów napędowych, natomiast redukcja negatywnych skutków oddziaływania hałasu może zostać osiągnięta poprzez rozwiązania wprowadzone na terenie i w okolicy lotnisk. Sposobami na ograniczenie negatywnego wpływu są również odpowiednie planowanie i zarządzanie przestrzenią powietrzną, analiza procedur operacji startów i lądowań oraz ich ograniczenie. Rozwiązania te jednak głównie stosowane są w celu zwiększenia efektywności i ekonomiczności transportu lotniczego (Dz. U. 1959 poz. 212 z późn. zm.).

2. Ograniczenie emisji hałasu poprzez rozwiązania bierne

Prowadzona działalność w portach lotniczych poprzez emisję nadmiernej ilości hałasu wpływa negatywnie na zdrowie osób zamieszkujących w ich pobliżu. Zrównoważone podejście wymaga podjęcia kroków skierowanych na ograniczenie i zmniejszenie tego wpływu. Najprostszym i najchętniej implementowanym rozwiązaniem w tym zakresie jest ustawienie ekranów akustycznych pomiędzy lotniskiem, będącym źródłem

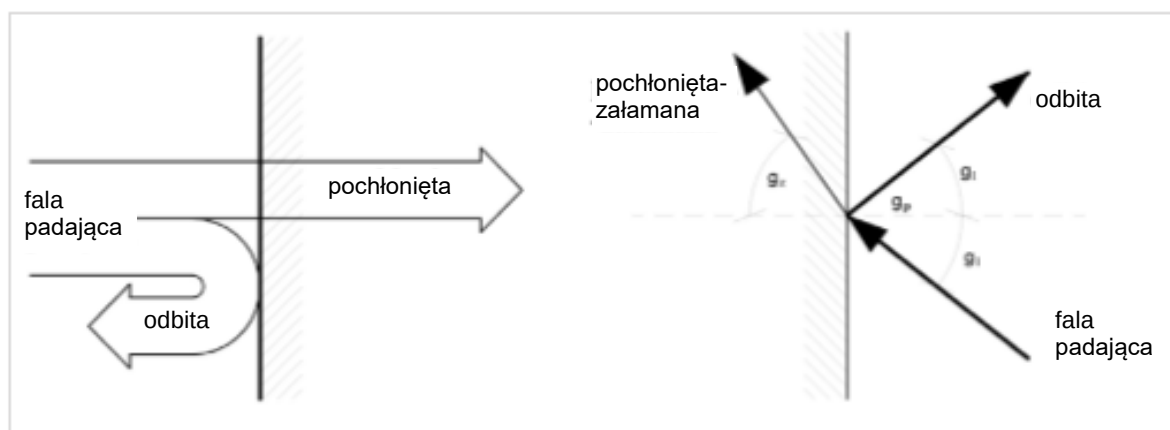
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: alesliw@gmail.com

hałasu, a terenami zamieszkałymi (Egel, 2001). Taki ekran jest przeszkodą dla fali dźwiękowej. Dodatkowo ma zdolność nie tylko do odbicia fal akustycznych, ale również częściowego ich pochłonięcia (rys. 1). Po zamontowaniu ekranów akustycznych nieopodal portu lotniczego we Wrocławiu-Strachowicach w 2010 roku, zauważono, że przeszkoda mierząca 6 m wysokości obniża hałas docierający do zaludnionych terenów o 12 dB (<http://dlapilota.pl>).

Kolejnym, bardzo prostym, tanim i równie często stosowanym rozwiązaniem, jest stworzenie przeszkód, dla emisji dźwięków, w formie wałów zieleni lub pasów zieleni, które zlokalizowane pomiędzy źródłem hałasu a ochranianym otoczeniem absorbują dźwięki. Jak zostało wyliczone, sam wał zieleni o szerokości 100 m może spowodować, że dźwięk obniżony zostanie o około 25-30 dB. Natomiast pas roślinny o szerokości 30 m przyczynić się może do jego obniżenia o 10-12 dB (Kijewski, 2002). Zagospodarowanie przestrzenne, w którym uwzględniono istnienie lotniska i zlokalizowano tereny przeznaczone do zamieszkania odpowiednio daleko, doprowadzić może do tego, że dźwięk wyemitowany na terenie portu lotniczego zostanie stłumiony oraz do tego, że będzie on z mniejszą intensywnością oddziaływać na lokalne środowisko przyrodnicze (Gradkowski, 2009). Jednakże, rozwiązanie to dla istniejących już lotnisk i pobliskich zaludnionych terenów nie może być brane pod uwagę. Istnieją jednak specjalistyczne mechanizmy tłumienia i rozpraszania hałasu, które mogą być wykorzystane w takim przypadku (Gradkowski, 2009).

Zagospodarowanie przestrzenne miejscowości/miasta może również mieć wpływ na między innymi ograniczenie szkodliwego oddziaływania hałasu na mieszkańców (Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2008). W takich projektach zazwyczaj określa się ramy dopuszczalnej wysokości dźwięków, które mogą zostać wyemitowane i wydzielone do środowiska na

konkretnym terenie (Tomaszewski, 2012). Istnienie lotniska rzadko brane jest pod uwagę w tworzeniu takich zagospodarowań przestrzennych, niemniej jednak władze, jak i projektanci inwestycji muszą uwzględniać lokalne ograniczenia w swoim projekcie, jak i oszacować wartość emitowanego hałasu do otoczenia. Rozwiązania ukierunkowane na ochronę lokalnego środowiska przed wysokimi dźwiękami powinny być uwzględniane już podczas projektowania i rozmieszczania poszczególnych płaszczyzn i obiektów na terenie lotniska. Co więcej, ochrona przeciwhałasowa może zostać zapewniona już w momencie wyboru elementów niezbędnych do budowy obiektów mieszkalnych, gospodarczych i usługowych na terenie przyszłych portów lotniczych. Wpływ na ochronę ma również wykorzystanie nowych technologii w tych konstrukcjach, ponieważ często charakteryzują się one wyższymi wskaźnikami izolacji dźwiękowej, w porównaniu do starszych modeli. Podobnie jak zamontowanie nowych okien o wysokiej izolacji sprawia, że dźwięk z zewnątrz dociera do osób przebywających wewnątrz obiektów z niższym natężeniem. Zaplanowanie budowy poszczególnych budynków infrastruktury lotniskowej również oddziaływać może w sposób pozytywny na istoty ludzkie. Wybudowanie hali przylotów/odlotów za innym na przykład wyższym budynkiem, który nie musi zostać objęty specjalną ochroną przed nadmierną emisją hałasu (na przykład hangarem), może sprawić, że wartość dźwięku, na którą narażone zostaną osoby przebywające na terenie terminala, zmaleje o wartość pomiędzy 5 a 25 dB (Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2008). Również odpowiednie zaprojektowanie i wybudowanie stanowisk postojowych dla statków powietrznych, które będą w najbliższej odległości od budynków usługowych usytuowane tak, aby wyloty silników były zwrócone w kierunku przeciwnym od tych obiektów, ma wpływ na obniżenie dostającego się hałasu do ich wnętrza (Kijewski, 2002).



Rys. 1. Schemat odbijania i pochłaniania fal dźwiękowych przez ekran akustyczny (Gradkowski, 2009)

Wykorzystanie do budowy dróg, płaszczyzn i stanowisk postojowych na terenie lotniska odpowiednich nawierzchni, na przykład niskoszumowych, pozwala na obniżenie wysokości dźwięku wytwarzanego podczas przemieszczania się pojazdów po tych powierzchniach. Kolejnym przykładowym rozwiązaniem na obniżenie dźwięku emitowanego przez przemieszczające się pojazdy jest eksploatacja tylko tych środków lokomocji, które są w dobrym stanie technicznym, a także tych, które posiadają napęd elektryczny bądź hybrydowy. Samochody i inne pojazdy, które posiadają opony homologowane również zaliczane są do cichszych środków lokomocji, przez co ich negatywne oddziaływanie na zanieczyszczenie lokalnego środowiska hałasem jest niższe (Jóźwiak, 2014). Te wspomniane rozwiązania, mogą obniżyć wartość dźwięku nawet o 7-10 dB (Kancelaria Senatu, 2012).

Rozwiązania ukierunkowane na ochronę osób przed uciążliwościami wynikającymi z emisji hałasu mogą również obrać formę narzucenia obowiązku stosowania ochronników narządu słuchu takich jak: wkładki, nauszники czy hełmy ochronne. Stosowanie antywibracyjnych, a także przeciwhałasowych zabezpieczeń również przyczynia się do obniżenia wartości dźwięku i jego wpływu na życie i zdrowie ludzi oraz zwierząt (Pyłka-Gutowska, 1996). Terminowe wykonywanie przeglądów, badań technicznych i kontroli silników są niezbędnymi czynnościami, do wykonywania bezpiecznych operacji lotniczych. Są one procesami, podczas których można przeprowadzić testy i sprawdzić czy dany element konstrukcyjny nie wydzielą zbyt wysokich dźwięków. W związku z tym, że takie sprawdzenia wiążą się z dużą ilością wytwarzanych wysokich dźwięków należy okresowo przeprowadzać takie testy w specjalnie przygotowanych do tego bazach technicznych (Kijewski, 2002).

3. Ograniczenie emisji hałasu poprzez rozwiązania czynne

Podczas lotu statku powietrznego, głównym źródłem hałasu emitowanego, który zarówno oddziałuje na osoby znajdujące się na powierzchni ziemi, jak i na te na pokładzie, jest silnik lotniczy. Elementy konstrukcyjne między innymi takie jak sprężarka, bądź wentylator w przypadku silnika dwuprzepływowego, podczas swojej pracy wydzielają niepożądany dźwięk do otoczenia. Samo pobieranie powietrza przez dyszę wlotu i wydzielanie przez dyszę wylotową produktów ubocznych powstałych na skutek reakcji spalania paliwa w komorze spalania również generuje hałas. Jego obniżenie w tych zakresach może zostać dokonane poprzez zastosowanie rozwiązań, które czynnie obniżają emisję hałasu. Zalicza się do nich odpowiednie skonstruowanie samego wlotu powietrza, tak aby gaz wlotowy był skierowany pod odpowiednim kątem oraz poprzez doprowadzenie do ingerencji w przepływie zassanego powietrza poprzez rozszerzenie dysz wlotu (<http://dlapilota.pl>). Dźwięk, który powstaje na skutek

mieszania się spalin wydostających się z wnętrza silnika z otaczającym konstrukcję lotniczą powietrzem, jest zaliczany do jednego z najgłośniejszych zjawisk. Wysokość powstałego hałasu jest zależna od różnicy prędkości pomiędzy nimi, dlatego jeśli prędkość samolotu jest wyższa, to powstający hałas jest teoretycznie mniejszy (Anderson, 1999). Zasada ta jednak nie ma zbyt dużego znaczenia dla mieszkańców bliskich lotnisku terenów, ponieważ w trakcie operacji startów i lądowań, czy też podczas ruchu naziemnego statków powietrznych i innych pojazdów po płaszczyznach lotniska, osiągnięta prędkość nie jest zbyt wysoka. Jednakże, istnieje rozwiązanie, które ma wpływ na obniżenie emitowanych dźwięków w tym zakresie. Może zostać to osiągnięte poprzez zmniejszenia prędkości wylotowej spalin, poprzez maksymalne rozchylenie regulowanej dyszy wylotowej silnika. Dla pozostałych silników, jednostajne natężenie przepływu gazów przyczyniło by się do spadku ciągu, a to mogłoby mieć negatywny wpływ na bezpieczeństwo wykonywanych operacji lotniczych. Istnieją jednak dwa rozwiązania zmniejszające prędkość wydzielanych spalin w silnikach dwuprzepływowych, które obejmują zastosowanie ejektorów dodatkowego strumienia powietrza (Głowacki, 2011). Doprowadzając powietrze do wnętrza silnika, gdzie jest ono kolejno mieszane z rozdzielonymi na mniejsze strumienie spalinami powstałymi na skutek reakcji spalania paliwa, potrzebnego do wytworzenia ciągu statku powietrznego, osiąga się obniżenie prędkości wydzielanych do otoczenia z silnika gazów (Anderson, 1999). Drugim możliwym rozwiązaniem w tym zakresie jest wyciszenie elementów napędowych statków powietrznych poprzez działania, takie jak: wykorzystanie drugiego strumienia powietrza i przepuszczenie go przez obudowę silnika. Kolejno za zadanie ma ono otoczenie szybszych, o wyższej temperaturze, pochodzących z komory spalania spalin. Oba wspomniane sposoby klasyfikuje się do mechanicznych tłumików hałasu, których zastosowanie ma wpływ na obniżenie prędkości wylotowej spalin, a tym samym oddziałuje na zmniejszenie wartości emitowanego przez strugi tych gazów hałasu. Implementacja któregośkolwiek ze wspomnianych rozwiązań może doprowadzić do obniżenia dźwięków powstałych w wyniku pracy silników lotniczych nawet o około 16 dB (Kijewski, 2002). Niestety, nie zawsze można zastosować te wspomniane rozwiązania, ponieważ są one zazwyczaj skuteczne tylko dla silników wbudowanych w nowszych modelach statków powietrznych. Dla starszych konstrukcji można jednak wykorzystać lotniskowe przewoźne tłumiki hałasu (Kijewski, 2002). W wyniku podstawienia tych urządzeń do wlotów i wylotów głównie silników odrzutowych, można osiągnąć obniżenie w sposób bierny powstałego i wyemitowanego w granicach lotniska hałasu.

Obniżenie wartości wyemitowanych wysokich dźwięków powstających na skutek pracy sprężarki i wentylatora w silnikach lotniczych może zostać osiągnięte poprzez obniżenie prędkości obrotowej pracy tych elementów. Samo wykorzystanie trójwinkowego silnika wentylatorowego, dla którego zmniejszenie

parametrów obrotowych jest możliwe podczas wykonywania operacji lądowania, przyczynia się do obniżenia hałasu nawet o 3-4 dB (Kijewski, 2002). Natomiast dla samolotów, które posiadają silniki tłokowego, obniżenie wartości emitowanego dźwięku przez jednostki napędowe może zostać osiągnięte poprzez zastosowanie dwufazowych wtrysków paliwa w komorach spalania. Wtrysk dawki pilotującej przed właściwym wtryskiem paliwa, powoduje obniżenie przyrostu ciśnienia, tym samym obniżając wartość powstałego przy tym dźwięku.

Głównym źródłem hałasu w przypadku śmigłowców, jak i samolotów turbośmigłowych jest praca śmigieł, a także brak ich synchronizacji (głównie w samolotach wielosilnikowych). Odpowiednio ustawione i nachylone śmigła oraz ich synchronizacja mogą obniżyć wartość powstałego na terenie lotniska hałasu, który dostaje się do lokalnego otoczenia wpływając tym samym na obniżenie jego walorów. Implementacja wspomnianych rozwiązań ma również wpływ na podwyższenie komfortu lotu pasażerów i osób pracujących na pokładach statków powietrznych. Jest to ważne, ponieważ jak udowodniły przeprowadzone badania, dźwięki wytwarzane przez śmigła są dużo gorzej znoszone przez narządy słuchu, aniżeli hałas wytwarzany na skutek pracy silników turboodrzutowych (Kijewski, 2002).

Zaimplementowanie rozwiązań na płatowcu konstrukcji lotniczej ukierunkowanych na wyciszenie powstających dźwięków, również oddziaływać może na obniżenie hałasu emitowanego w czasie wykonywania transportu lotniczego. Niestety, zmiany w tym obszarze są trudniejsze do realizacji, aniżeli samo wyciszenie w zakresie pracy układu napędowego (Kijewski, 2002). Jednak, postęp technologiczny pozwala na zastosowanie i doprowadzenie do ulepszenia i do wyciszenia pracy poszczególnych elementów np. poprzez wykorzystanie nowych rozwiązań i materiałów do ich konstrukcji. Może to powodować obniżenie dźwięku związanego między innymi z wypuszczaniem podwozia, otwieraniem klap, pokryw, lotek oraz innych elementów konstrukcyjnych skrzydła. Tak samo jak ingerencja i dążenie do interferencji fal akustycznych pochodzących ze statków powietrznych i ich wzajemne niwelowanie i pozbawianie się energii kinetycznej ma wpływ na zredukowanie wysokości wyemitowanego przez nie hałasu (<http://dlapilota.pl>).

4. Ograniczenie emisji hałasu poprzez środki prawne

Wpływanie na instytucje, organizacje i pojedyncze podmioty by podjęły kroki, działania w celu zmniejszenia problemu poprzez np. narzucenia na nie obowiązku prawnego, charakteryzuje się dużą skutecznością. Wszelkie odgórnie narzucone regulacje mogą odnosić się również do zastosowania oraz wymuszenia podjęcia kroków ukierunkowanych na obniżenie hałasu, który jest emitowany do środowiska na skutek prowadzonej działalności lotniczej. Można wyróżnić akty wydane na trzech różnych szczeblach – szczeblu prawa

międzynarodowego, szczeblu prawa Unii Europejskiej i szczeblu prawa krajowego. Wszystkie te dokumenty nie mogą się wykluczać, a jednostki świadczące usługi na rzecz sektora lotniczego na terenie krajów sygnatariuszy, muszą przestrzegać wszystkich zapisów. Na najwyższym szczeblu prawa, o zasięgu międzynarodowym, w sektorze lotnictwa cywilnego instytucją która odpowiedzialna jest za tworzenie i egzekwowanie przestrzegania prawa przez inne instytucje lotnicze i te, które świadczą swoje usługi na jego rzecz, jest Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego – ICAO (Zajas, 2013).

Wydana w 1944 roku Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (Dz. U 1959 poz. 212 z późn. zm.), która powołała do życia ICAO, powszechnie nazywana konwencją chicagowską, bezpośrednio odnosi się do zagadnień prawnych w obszarze lotnictwa cywilnego (Zajas, 2015). Stronami tej konwencji jest niemalże 200 państw. Wraz z rozwojem lotnictwa pojawia się potrzeba udoskonalania aktów prawnych regulujących funkcjonowanie tej gałęzi transportu. W odpowiedzi na wszystkie wyzwania ICAO do początkowo przyjętych dokumentów, to jest do Aktu końcowego i do układów – o Tranzycie Międzynarodowych Służb Powietrznych oraz o Międzynarodowym Transporcie Lotniczym (nazywanych kolejno układem o dwóch i o pięciu wolnościach) publikuje kolejne Załączniki do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (obecnie jest ich 19), które poruszają różną problematykę. Przestrzeganie zapisów wszystkich załączników w krajach sygnatariuszach jest obligatoryjne. Ochrona środowiska przyrodniczego bezpośrednio została opisana w Załączniku 16 do Konwencji chicagowskiej. Dokument ten składa się z dwóch tomów. Pierwszy z nich odnosi się do kwestii ochrony przed hałasem, który emitowany jest do środowiska przyrodniczego przez sektor transportu lotniczego, zaś drugi tom reguluje i nawiązuje do problematyki emisji z silników statków powietrznych. W obu tomach zostały określone progi wartości emisyjnej hałasu oraz zakaz przekraczania tych limitów (dotyczy to hałasu wyemitowanego zarówno przez silniki lotnicze, a także hałasu powstałego na skutek obsługi i wykonywania przewozów drogą powietrzną).

Niższy szczebel prawa tworzony jest przez dokumenty wydane przez instytucje Unii Europejskiej. Choć na obszarze wszystkich zrzeszonych europejskich krajów przyjęte zostały zapisy Konwencji chicagowskiej i jej załączników, to Instytucja ta postanowiła, w sposób bardziej rygorystyczny, poruszyć kwestie emisji hałasu do środowiska przyrodniczego. Najważniejszym dokumentem, wydanym przez Parlament Europejski i Radę, który porusza bezpośrednio kwestie emisji hałasu do środowiska jest Dyrektywa 2002/49/WE z dnia 25 czerwca 2002 r. (Dz. U. UE L 189 z 18.07.2002) i zmieniające je rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1137/2008 (Dz. U. UE L 311 z 21.11.2008). Zostały w niej poruszone kwestie oceny i zarządzania hałasem, który emitowany jest na terenie krajów Unii Europejskiej do lokalnego środowiska. Zarządzający portem lotniczym, jak i operatorzy statków

powietrznych i przewoźnicy lotniczy muszą bezwzględnie przestrzegać wytycznych określonych w tym dokumencie.

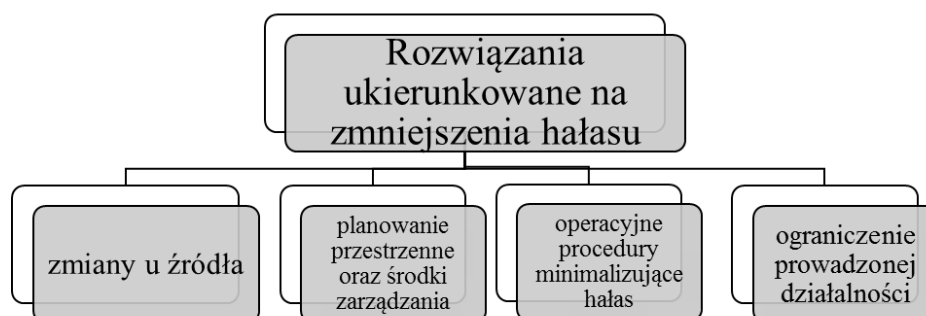
Kolejnym dokumentem wydanym na tym szczeblu jest odnosząca się do kwestii ochrony przed negatywnym wpływem hałasu powstałego na terenie portu lotniczego dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz. U. UE L 189 z 18.07.2002) ustalająca zasady i procedury wprowadzenia ograniczeń operacyjnych odnoszących się do poziomu hałasu w portach lotniczych. Głównym jej celem jest ustalenie jednolitych zasad i reguł obowiązujących na terenie wszystkich państwa członkowskich wspólnoty europejskiej. Wytyczne te pomóc mają w określeniu ograniczeń emitowanego hałasu na terenie portów lotniczych, a także przyczynić się do zwiększenia ich przepustowości. W dokumencie tym zostały wyodrębnione obszary, w których zaimplementowane rozwiązania doprowadzić powinny do zmniejszenia emisji hałasu (rys. 2).

Przez Unię Europejską są podejmowane, a także wspierane przez jej liczne instytucje inicjatywy pro środowiskowe. Kluczowym programem bezpośrednio skoncentrowanym na obniżeniu emisji hałasu jest program Clean Sky. Głównym założeniem przy jego tworzeniu było obniżenie wartości emisji niepożądanych dźwięków do środowiska o 50% (<http://www.cleansky.eu>). Konsekwentne wdrażanie wskazanych rozwiązań, poprawki i ulepszenia w określonych w tej inicjatywie obszarach, które ukierunkowane są na obniżenie emisji hałasu przynieść może, według jej autorów, założone obniżenie zanieczyszczenia środowiska wysokimi dźwiękami.

Na najniższym poziomie prawa, krajowym, również kwestie negatywnego wpływu hałasu na środowisko zostały poruszone. Polskie prawo reguluje te kwestie w ustawie Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. 2001 poz. 627). Głównym założeniem tego dokumentu jest uzyskanie bardzo dobrego stanu akustycznego w lokalnym środowisku. Osiągnięte to powinno zostać poprzez ograniczenie poziomu hałasu i niedopuszczeniu na emitowanie dźwięków wyższych od przyjętych progów, określonych w dokumentach opublikowanych na wyższych szczeblach prawa.

Kwestie emisji hałasu do środowiska przyrodniczego zostały poruszone również w ustawie z dnia 3 lipca 2002 r. Prawo lotnicze (Dz. U. 2002 poz. 1112). Na jej mocy Minister właściwy do spraw transportu, został zobowiązany do ustalenia i opublikowania w formie rozporządzenia wymagań w zakresie emisji hałasu, które muszą zostać spełnione przez statki powietrzne wykonujące loty w polskiej przestrzeni powietrznej. Dodatkowo, na mocy tej ustawy, Prezes Urzędu Lotnictwa Cywilnego został zobowiązany do przeprowadzania kontroli przestrzegania wymagań odnośnie ochrony środowiska akustycznego ustanowionych przez Ministra właściwego do spraw transportu. Co więcej, na mocy artykułu 119 Minister właściwy do spraw transportu, po uprzedniej konsultacji z Ministrem właściwym do spraw środowiska, poprzez wydanie stosownego rozporządzenia może wprowadzić ograniczenia lotów, lub zakazy lotów dla samolotów, które nie spełniają wymogów ochrony środowiska między innymi przed emisją hałasu.

Obniżenie negatywnego wpływu wysokich dźwięków na środowisko przyrodnicze może zostać osiągnięte również poprzez wydanie odpowiednich dokumentów, które odnoszą się tylko do konkretnego rejonu, bądź lotniska. Taka ochrona może obrać formę wyznaczenia obszarów dla których ruch powietrzny statków powietrznych jest zabroniony (na przykład podczas podejścia do lądowania). Wydzielanie i ściśle określanie limitów wykonywania operacji lotniczych w godzinach szczytu na konkretnych drogach startowych, zabranianie wykonywania operacji startów i/lub lądowań w nocy to przykładowe, i bardzo często stosowane rozwiązania problemu nadmiernego wpływu hałasu właśnie poprzez wykorzystanie norm i restrykcji prawnych (Łaski, 2000). Choć rozwiązania te mogą mieć wpływ na ograniczenie przepustowości portu lotniczego i oddziaływać na obniżenie jego konkurencyjności względem innych lotnisk, powodować wzmożenie ruchu po płaszczyznach manewrowych, itp. to regulacje te są rozwiązaniami, które przyczyniają się do ochrony i podwyższenia komfortu życia lokalnego społeczeństwa (Eccles, 2014).



Rys. 2. Obszary rozwiązań skierowanych na zmniejszenie hałasu

Określenie limitów na wysokość emisji dźwięków może odnosić się do terenów zamieszkałych, jak również może zostać narzucone na statki powietrzne poruszające się po płaszczyznach lotniska, a także podczas wykonywania operacji lotniczych i lotu we wszystkich częściach przestrzeni powietrznej. Zarządzający danym lotniskiem mając na uwadze między innymi restrykcje wynikające z ochrony lokalnego środowiska przed emisją hałasu zobowiązany jest zaprojektować procedury startu i lądowania, tak aby dźwięki emitowane przez pracujące elementy statków powietrznych nie zakłócały życia lokalnego społeczeństwa. Najczęściej osiągane to jest poprzez wyznaczenie statkom powietrznym toru lotu podczas fazy wznoszenia i/lub podejścia do lądowania, tak aby w momencie gdy znajduje się nad obszarem chronionym, jego wysokość była jak najwyższa. W sytuacji gdy istnieje możliwość zaprojektowania operacji lotniczych nad mało zabudowanymi obszarami, parkami, lasami itp. wyznacza się trasy minimalnego hałasu. Obejmują one zazwyczaj odcinek przelotowy pomiędzy lotniskiem a korytarzem powietrznym, w który odbywa się część przelotowa lotu, przez co nie są narażone na negatywny wpływ hałasu istoty żywe (Kijewski, 2002).

5. Podsumowanie

Wszystkie wspomniane rozwiązania ukierunkowane na obniżenie zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego hałasem przez transport lotniczy mają na celu zredukowanie negatywnych skutków nadmiernej emisji dźwięków do lokalnego otoczenia. Choć całkowite wyeliminowanie dźwięków powstałych na skutek wykonywania transportu lotniczego jest niemożliwe, to istnieje szereg sposobów, które mogą być zaimplementowane u źródła hałasu, czyli takie które obniżą jego wpływ w sposób czynny, jak i takie rozwiązania, które mogą obniżyć jego oddziaływanie w sposób bierny (Głowacki, 2011). Samo wprowadzenie i wykorzystanie nowoczesnych technologii do budowy konstrukcji lotniczych, a także innowacyjnych rozwiązań w walce przeciwko nadmiernej emisji hałasu do środowiska powstałego na skutek prowadzonej działalności przez sektor transportu lotniczego wpływa na jego znaczne obniżenie (Leśko i Pasek, 1997). Taki sam wpływ mają również restrykcje prawne. Bez wątpienia problem ten jest zauważalny, co potwierdza wydany przez ICAO Tom I załącznika 16 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym. Inne dokumenty, wydane na wszystkich trzech poziomach prawa również odnoszą się i poruszają tę problematykę. Choć organizacje i instytucje normatywne są świadome faktu, że emisja hałasu jest problemem lokalnym, to w aktach prawnych poruszone zostały kwestie limitów i narzucone zostały ogólnie wartości progowe na emisję dźwięków, które muszą być bezwzględnie przestrzegane przez wszystkie kraje członkowskie. Jest to istotne, ponieważ problem ten dotyczy i występuje na całym świecie. Unia Europejska szczególnie zauważa wagę tego

problemu, co zostało potwierdzone narzuceniem obowiązku przestrzegania limitów emisji hałasu wydzielonego między innymi przez transport lotniczy, w celu ochrony społeczeństwa przed jego negatywnym wpływem (Łukaszuk i Balcerzak, 2007).

Literatura

- Anderson J. (1999). Aircraft performance and design. Wydawnictwo WCB/McGraw-Hill, Boston.
- Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (2008). Ocena możliwości zastosowania aktywnych metod redukcji hałasu w transporcie drogowym. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku (Dz. U. UE L 189 z 18.07.2002).
- Eccles G. (2014). Aviação Verde - Noise Pollution & Local Air Quality. Prezentacja wygłoszona w ramach przedmiotu Aviação Verde, Uniwersytet Lusofona, Lizbona.
- Engel Z. (2001). Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem. PWN, Warszawa.
- Głowacki P. (2011). Zagrożenia ekologiczne wokół lotnisk i możliwości ich ograniczania. Prace Instytutu Lotnictwa, Warszawa.
- Gradkowski K. (2009). Sposoby częściowej redukcji hałasu transportu miejskiego. Transport miejski i regionalny. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Jóźwiak Z. (2014). Metody ograniczania hałasu komunikacyjnego w aglomeracjach miejskich. Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin.
- Kancelaria Senatu (2012). Zagrożenie hałasem Wybrane zagadnienia. Biuro analiz i dokumentacji, Warszawa.
- Kijewski T. (2002). Samolot a środowisko – hałas i emisja spalin. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, TK-2-TK-7.
- Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym. (Dz. U. z 1959 r. nr 35, poz. 212, z późn. zm.).
- Leśko M., Pasek M. (1997). Porty lotnicze: wybrane zagadnienia inżynierii ekologicznej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Łaski R. (2000). Zagrożenia i zapobieganie degradacji środowiska naturalnego na lotniskach. Warszawa.
- Łukaszuk L., Balcerzak T. (2007). Lotnictwo współczesne i jego problemy. AON, Warszawa.
- Pyłka-Gutowska E. (1996). Ekologia z ochroną środowiska. Wydawnictwo Oświata, Warszawa.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1137/2008 z dnia 22 października 2008 r. dostosowujące do decyzji Rady 1999/468/WE niektóre akty podlegające procedurze ustanowionej w art. 251 Traktatu, w zakresie procedury regulacyjnej połączonej z kontrolą – Dostosowanie do procedury regulacyjnej połączonej z kontrolą – Część pierwsza (Dz. U. UE L 311 z 21.11.2008).
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 598/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie ustanowienia zasad i procedur w odniesieniu do wprowadzenia ograniczeń operacyjnych odnoszących się do poziomu hałasu w portach lotniczych Unii w ramach zrównoważonego podejścia oraz uchylające dyrektywę 2002/30/WE (Dz. U. UE L 173 z 12.06.2014).

- Tomaszewski F. (2002). Oddziaływanie hałasu lotniczego na środowisko. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* (Dz. U. 2001 nr 62 poz. 627)
- Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. *Prawo lotnicze* (Dz. U. 2002 nr 130 poz. 1112).
- Zajas S. (2013). *Polityka lotnicza*. AON, Warszawa.
- Zajas S. (2015). *Międzynarodowe i krajowe organizacje lotnicze*. AON, Warszawa.
- <http://dlapilota.pl/wiadomosci/technologia/szum-skrzydel-i-ryk-silnika-o-halasi> [dostęp: 02.12.2015].
- <http://www.cleansky.eu/content/homepage/aviation-environment> [dostęp: 12.12.2015].

SOLUTIONS TO DECREASE THE NOISE EMITTED BY AIR TRANSPORT TO ENVIROMENT

Abstract: The air transport as well as the service provided at airports is responsible for noise emission to the local environment, which hinders the functioning and living, of both, people and animals. The paper shows the potential solutions aimed at reducing the emission of high sounds to the environment, which are primarily caused by aircraft, as well as the activities and functioning of airports. The conducted research has shown that there are numerous solutions which may lead to decrease of the noise emission. Just the introduction and use of new technologies, as well as technological solutions have an impact on the reduction of noise, both in an active and passive way. Undoubtedly both have an impact on its reduction and entails a reduction of its negative impact on the local environment. The aim of this study was to characterize the methods, the solutions which can be use either at airports, or in their surroundings or in aircraft's construction, which allows to reduce the noise emission to the local environment by air transport. The article is a response to the research problem, which was.

BADANIA DIAGNOSTYCZNE ZBROJENIA PRÓBEK BETONOWYCH W KONTEKŚCIE BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI WIELKOPLYTOWYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

Dariusz TOMASZEWICZ^{a*}, Jerzy OBOLEWICZ^b

^a Wydział Techniczny, Wyższa Szkoła Agrobiznesu w Łomży, ul. Studencka 19, 18-402 Łomża

^b Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono jeden z systemów diagnostyki obiektów budowlanych za pomocą profometrów. Przeprowadzono badania próbek trójwarstwowych, wykonanych w celu odwzorowania trójwarstwowych ścian zewnętrznych w budynkach wielkopłytowych, a także badania płyty podokiennej długiej w ścianie konstrukcyjnej budynku wielkopłytowego. Dokonano oceny grubości otuliny, średnicy prętów wieszaków oraz stopnia korozji zbrojenia. Zastosowanie wyników badań w praktyce pozwoli na dalszą bezpieczną eksploatację wielkopłytowych obiektów budowlanych.

Słowa kluczowe: eksploatacja, budynek wielkopłytowy, ściany zewnętrzne, diagnostyka.

1. Wprowadzenie

Proces inwestycyjny jest ciągiem skoordynowanych, bezpiecznych czynności o charakterze technicznym, prawnym, technologicznym, organizacyjnym i finansowym, obejmujących przygotowanie, realizację i eksploatację planowanej inwestycji budowlanej w określonym czasie przy ograniczonych zasobach finansowych (Obolewicz, 2014 i 2015). W trakcie okresu eksploatacji i w coraz bardziej zaawansowanym cyklu życia obiektu, pojawiają się usterki zagrażające jego trwałości. Przeprowadzana jest wówczas ocena wizualna uszkodzeń, a następnie przegląd techniczny, bądź ekspertyza techniczna danego obiektu. W zależności od stopnia „defektu” technicznego diagnostyka dokonywana jest metodami nieniszczącymi lub niszczącymi. Na rysunku 1 przedstawiono system diagnostyki obiektów budowlanych. Badania własne, przeprowadzone metodami nieniszczącymi, należy zakwalifikować do przeglądu technicznego elementu (próbki) i konstrukcji (obiektu).

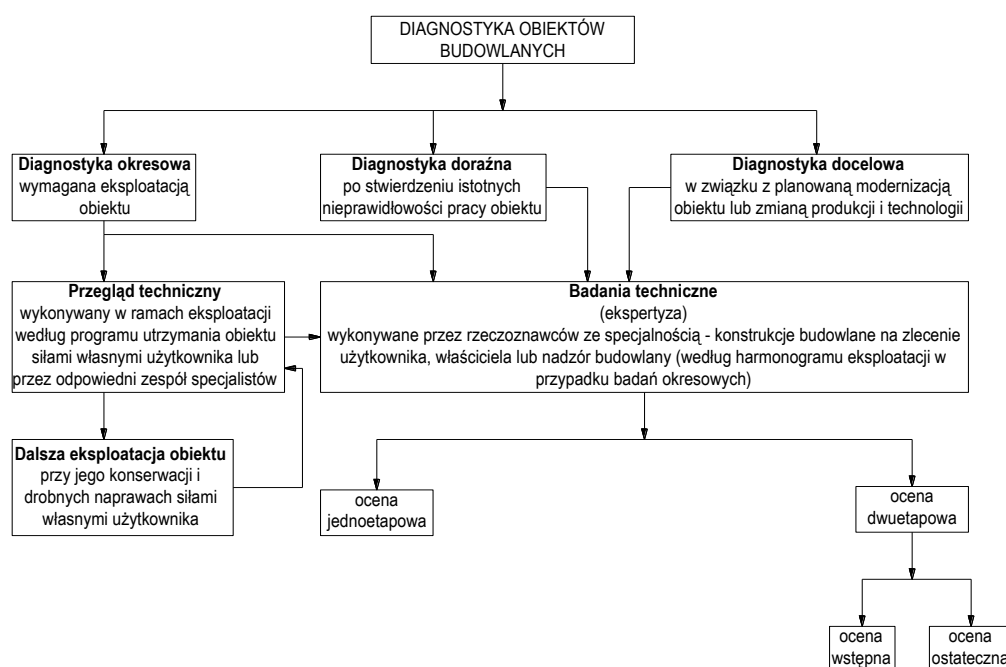
Obiekt budowlany należy użytkować w sposób zgodny z jego przeznaczeniem i wymaganiami ochrony środowiska oraz utrzymywać w należytych stanie technicznym i estetycznym, nie dopuszczając do nadmiernego pogorszenia się jego właściwości użytkowych i sprawności technicznej oraz zachowując bezpieczeństwo i ochronę zdrowia użytkowników. Należy przeprowadzać przeglądy okresowe elementów budynku szczególnie narażonych na szkodliwe wpływy atmosferyczne (Dz. U. 2018 poz. 1202). Obiekty budowane w trakcie eksploatacji należy diagnozować

(Baryłka i Baryłka, 2015 i 2016). Podczas eksploatacji obiektu budowlanego najczęściej ulegają zniszczeniu elementy zewnętrzne, w tym ściany zewnętrzne. Ściany zewnętrzne budynków wielkopłytowych są ścianami trójwarstwowymi z odpowiednim zbrojeniem. Zbrojenie to wraz z upływem czasu ulega korozji i tym samym stwarza zagrożenie dla bezpieczeństwa konstrukcji całego obiektu budowlanego (Obolewicz i Tomaszewicz, 2016).

Na temat korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu powstały obszerne prace Zybury i Jaśnioka (2006) oraz Zybury i in. (2011), a kompleksową metodologię badań diagnostycznych opisał Rojek (2011). Wśród metod nieniszczących należy wymienić metody: sklerometryczne, akustyczne, elektromagnetyczne, elektryczne, radiologiczne (Rojek, 2011; Sobczak-Piąstka i Podhorecki, 2013) oraz metodę polaryzacji (Andrade i Alonso, 2004; Błaszczyński i in., 2010). Badania diagnostyczne z wykorzystaniem urządzeń ferromagnetycznych także umożliwiają bezinwazyjną diagnostykę obiektów budowlanych (Urbanowicz i Warzocha, 2015).

Celem artykułu było określenie parametrów zbrojenia próbek żelbetonowych. Próbkę została wykonana na wzór ścian trójwarstwowych. Badania przeprowadzono w sposób niewymagający wykonywania odkrywek. Wyniki badań porównano z wynikami badań ścian istniejących w budynkach wielkopłytowych. Przeprowadzono porównanie parametrów zbrojenia i betonu (średnica i rozstaw zbrojenia, stopień korozji zbrojenia, grubość otuliny) w badanych próbkach i w zewnętrznej ścianie konstrukcyjnej budynku wielkopłytowego.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: dariusz-tomaszewicz@wp.pl



Rys. 1. System diagnostyki obiektów budowlanych (PN-B-01807:1988 *Antykorozyjne zabezpieczenia w budownictwie. Konstrukcje betonowe i żelbetowe. Zasady diagnostyki konstrukcji*)

2. Opis badań

2.1. Przygotowanie i badania próbek oraz elementów ściany budynku

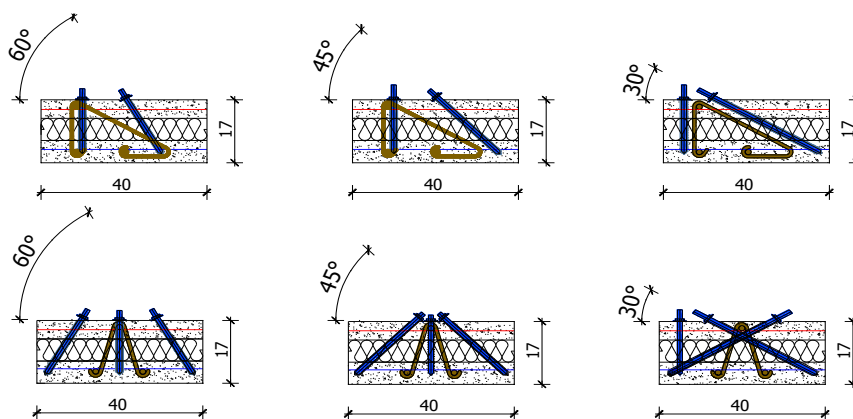
W celu zdiagnozowania stanu ścian zewnętrznych trójwarstwowych budynków wielopłytowych zaprojektowano próbki trójwarstwowe o wymiarach $40 \times 20 \times 17$ cm, na wzór konstrukcji ścian trójwarstwowych budynków wielopłytowych. Wykonano sześć próbek warstwowych (rys. 2): trzy próbki z wieszakiem w kształcie trójkąta prostokątnego oraz trzy próbki z wieszakiem jednogarnym o kształcie typu "V" zbliżonym do trójkąta równoramiennego.

Próbki zostały wykonane metodą produkcji „faktura do dołu”, w formach drewnianych skręcanych na śruby, z dnem z płyty wiórowej. Układ warstw w próbkach był następujący: warstwa fakturowa o grubości 6 cm, warstwa ocieplenia (ze styropianu o grubości 5 cm) i warstwa konstrukcyjna o grubości 6 cm. Z uwagi na wymiary próbek, zbrojenie zaprojektowano w odpowiednio

mniej skali. Zastosowano beton klasy C 12/15. Siatki zbrojeniowe w próbkach wykonano z drutu $\varnothing 3$ mm ze stali zwykłej, zaś wieszaki wykonano ze stali zwykłej o średnicy $\varnothing 6$ mm. Pręty kotwiące wieszaki z siatką zbrojeniową wykonane zostały ze stali zwykłej o średnicy $\varnothing 6$ mm i długości 15 cm. Projektowane parametry zbrojenia próbek i ścian zewnętrznych zestawiono w tabeli 1.

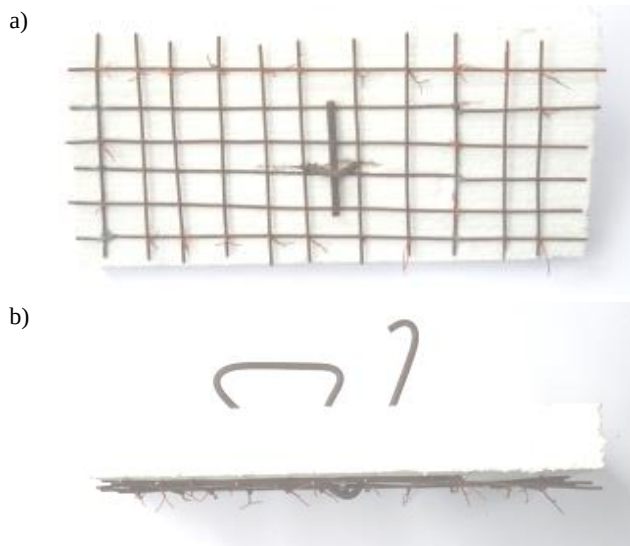
Tab. 1. Projektowane parametry zbrojenia próbek i ścian zewnętrznych

Elementy składowe próbek i ścian	Wymiary elementów składowych [mm]
rozstaw oczek siatek w próbce	50,0×50,0
średnica wieszaka w próbce	6,0
otulina wieszaka w próbce	8,0
rozstaw siatek w ścianie	200,0×200,0
średnica wieszaka w ścianie	12,0
otulina wieszaka w ścianie	15,0



Rys. 2. Przekroje próbek z kształtami wieszaków i kotwami wklejonymi

Na rysunku 3 widoczne jest zbrojenie pojedynczej próbki przygotowanej do etapu formowania.



Rys. 3. Widok zbrojenia przed wykonaniem próbek: a) przekrój poziomy, b) przekrój pionowy

Przygotowane i rozformowane próbki dojrzewały na otwartym terenie i były narażone na oddziaływania atmosferyczne. Po około dwóch miesiącach dojrzewania próbki zostały dodatkowo wzmocnione zakotwieniami wklejonymi (rys. 4).

Po etapie dojrzewania i po czasie przeznaczonym na „starzenie się” próbek na otwartym terenie, wprowadzono nowe zakotwienia wklejane, dodatkowo wzmacniające warstwę fakturową. Zakotwienia ukośnie montowano pod trzema różnymi kątami 30° , 45° i 60° (rys. 2).

W badanej ścianie konstrukcyjnej budynku wielopłytowego zbrojenie płyty podokiennej długiej składało się z siatki zbrojeniowej o oczkach 20×20 cm oraz z wieszaków o średnicy $\varnothing 12$ mm, łączących ze sobą przegrody trójwarstwowe. Wieszaki były zlokalizowane zgodnie z dokumentacją projektową według współrzędnych 57×29 cm. W rzeczywistości zlokalizowano je następująco: 26×30 cm; 59×32 cm; 65×28 cm; 54×35 cm; 30×30 cm oraz 39×24 cm; 36×30 cm; 38×32 cm i 30×35 cm. Zatem w pierwszym przypadku odchyłka lokalizacji wieszaka na odciętej wynosiła maksymalnie 31 cm, a na rzędnej 6 cm. Natomiast w drugim przypadku największa odchyłka na odciętej wynosiła 9 cm, zaś na rzędnej 6 cm.

2.2. Zastosowana aparatura badawcza

Badania elementów polegały na skanowaniu gładkiej powierzchni próbek wykorzystywanymi do badań specjalistycznych urządzeniami zwanymi profometrami (Instrukcja, 2017a, b, c).

Stosując Profometr PM-650 wykorzystano opcję skanowania pojedynczej linii „Single-line”, a następnie na skanowaniu krzyżowym „Cross-line”. Urządzenie to ma zakres pomiaru otuliny do 185 mm, przy dokładności od ± 1 do ± 4 mm. Rozdzielczość pomiaru jest zależna od ustawienia w urządzeniu spodziewanych w badanym elemencie: średnic pręta i grubości otuliny. Dokładność pomiaru na gładkiej powierzchni wynosi ± 3 mm. Średnie zakresy pomiarowe stosuje się do pomiarów otuliny o grubości do 63 mm, a do pomiarów średnicy pręta zbrojeniowego do 40 mm (w tym przypadku średnica wynosiła 12 mm). Dokładność pomiaru średnicy pojedynczego pręta wynosiła ± 1 mm.



Rys. 4. Widok próbek przeznaczonych do skanowania

W pierwszej serii badań skanowano zbrojenie w kierunku poziomym od prawej do lewej krawędzi próbki. W drugiej serii badań wykorzystano możliwość skanowania grubości otuliny zbrojenia w próbkach poprzez łączenie pomiarów w kierunku osi poziomej i osi pionowej (rys. 5).



Rys. 5. Sposób skanowania próbek

Miejsca występowania korozji zbrojenia w próbkach lokalizowano za pomocą Profometru Corrosion. Z profometrem połączona była elektroda jednopunktowa, którą przykładano w różnych punktach powierzchni próbek. Elektroda w postaci ampułki była wypełniona siarczanem miedzi (CuSO_4); alternatywnie można było zastosować kwas cytrynowy ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). Zakres temperatury pracy obu urządzeń wynosił od -10°C do $+50^\circ\text{C}$.

3. Rezultaty przeprowadzonej diagnostyki

Diagnostyka umożliwia odczytanie grubości otuliny prętów oraz wskazanie miejsc potencjalnej korozji.

Na rysunku 6 widoczny jest przykładowy odczyt wyników pomiarów uzyskany za pomocą Profometru PM 650 (widok pojedynczej linii skanowania „Single-line”) pierwszej próbki. Znajdują się na nim: odległości między prętami siatki zbrojenia, numer odczytu ekranu, mediana pomiaru grubości otuliny każdego pręta próbki, średnia ze wszystkich pomiarów grubości otuliny oraz odchylenie standardowe pomiarów grubości otuliny. W badanej próbce grubość otuliny zbrojenia kształtowała się w przedziale od 35 mm do 64 mm.

Rysunek 7 pokazuje wyniki badań próbki trójwarstwowej wzorowanej na konstrukcji ścian zewnętrznych budynków wielopłytowych. Jest to odczyt krzyżowy grubości otuliny prętów siatki zbrojeniowej w zakresie od 7 do 78 mm. Uzyskano widok skanowania krzyżowego „Cross-Line”, dzięki któremu otrzymano rzut siatki zbrojeniowej o oczkach 5×5 cm. Rysunek 8

przedstawia pomiary stopnia korozji za pomocą Profometru Corrosion z funkcją różnicy pól potencjałów. Pokazano odczyt różnicy potencjałów pomiaru korozji zbrojenia na poziomie najniższym o wartości -292 mV i najwyższym o wartości -189 mV.

Ryzyko wystąpienia korozji zbrojenia przyjmuje się na podstawie tabeli 2. W prezentowanym przypadku (rys. 8) ryzyko wystąpienia korozji waha się od 5% do 50%

Tab. 2. Interpretacja wartości różnic potencjału według ASTM C876-91 (1999)

Różnica potencjałów (mV)	Szansa na istnienie skorodowanego zbrojenia
< -500	Widoczne dowody korozji
-350 do -500	95%
-200 do -350	50%
> -200	5%

Analogicznie, również w trybie skanowania „Single-line” pokazano przykładowe pomiary grubości otuliny zbrojenia w ścianie konstrukcyjnej wykonane za pomocą Profometru PM-650 (rys. 9-12).

Na badanym obszarze płyty grubość otuliny zbrojenia pionowego kształtowała się w przedziale od 43 mm do 69 mm, a dla zbrojenia poziomego od 32 mm do 70 mm.

4. Analiza wyników badań

Wyniki badań próbek i elementów ścian zewnętrznych budynku zestawiono w tabeli 3. Na podstawie wyników skanowania próbek i wyznaczono potencjalne miejsca korozji zbrojenia (od najmniej do najbardziej narażonych na korozję). Współczynnik zmienności oraz odchylenie standardowe (Jóźwiak i Podgórski, 2009) zostały wyznaczone według wzorów:

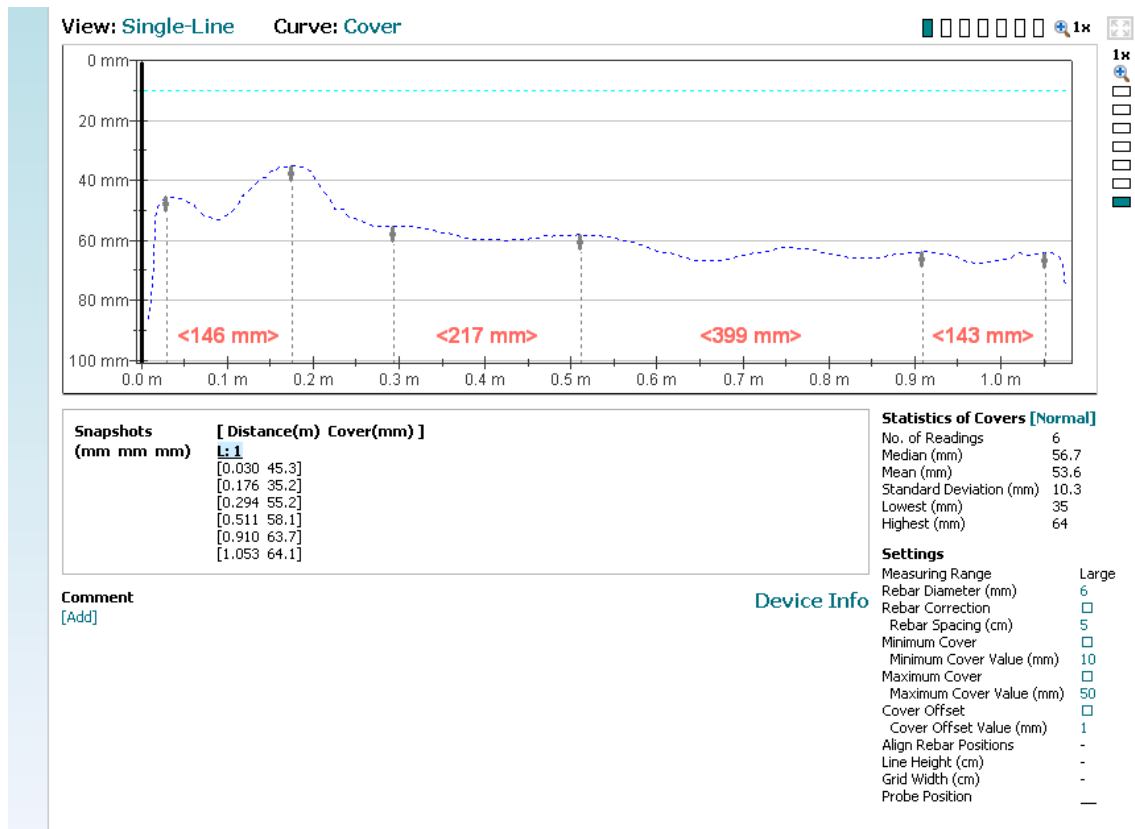
$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad \bar{x} > 0 \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

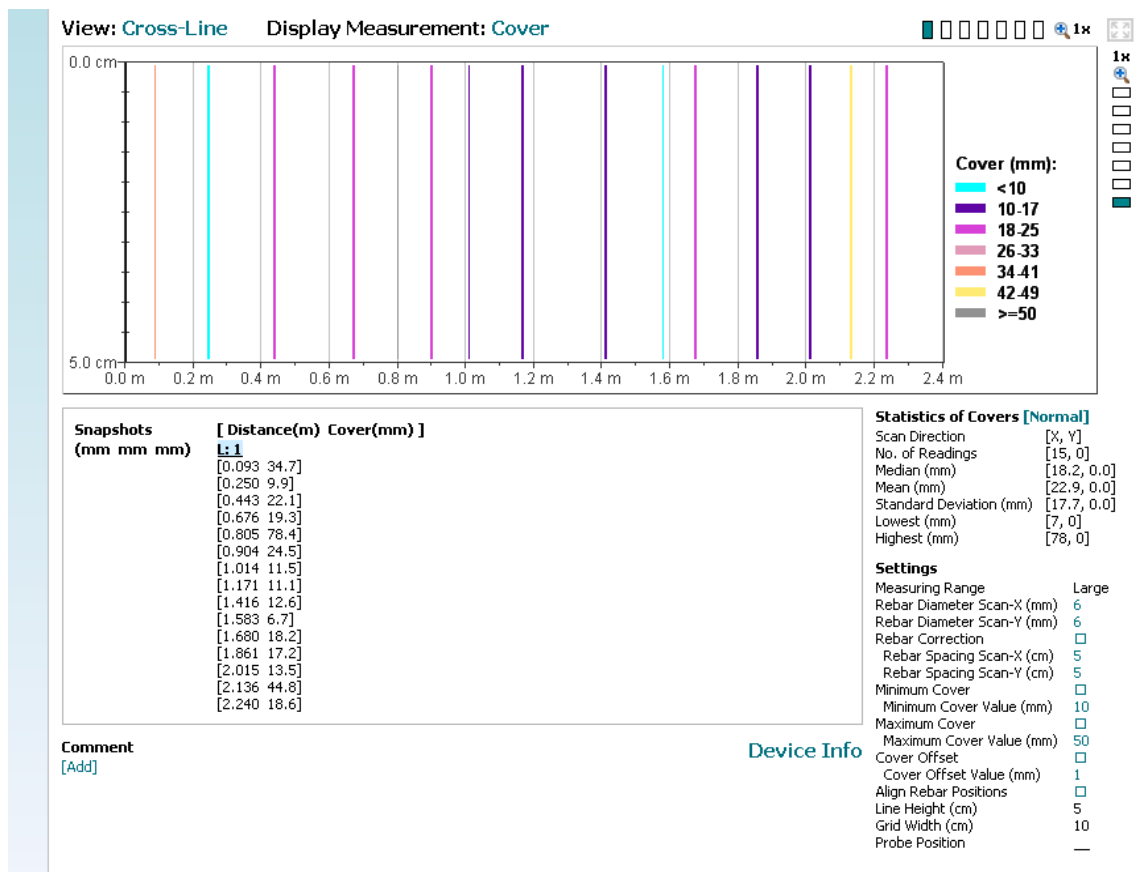
gdzie: v jest współczynnikiem zmienności, wyrażonym w %, s jest odchyleniem standardowym, $\bar{x}$ jest wartością średnią pomiarów w mm, x_i jest kolejnym wynikiem pomiarów w mm, a n jest liczbą badań.

Mediana – jest to wartość środkowa, powyżej i poniżej której znajduje się jednakowa liczba obserwacji, czyli po 50% odczytów wyników pomiaru grubości otuliny oraz potencjalnych miejsc korozji w badanych próbkach stanowiły wartości większe i mniejsze od mediany.

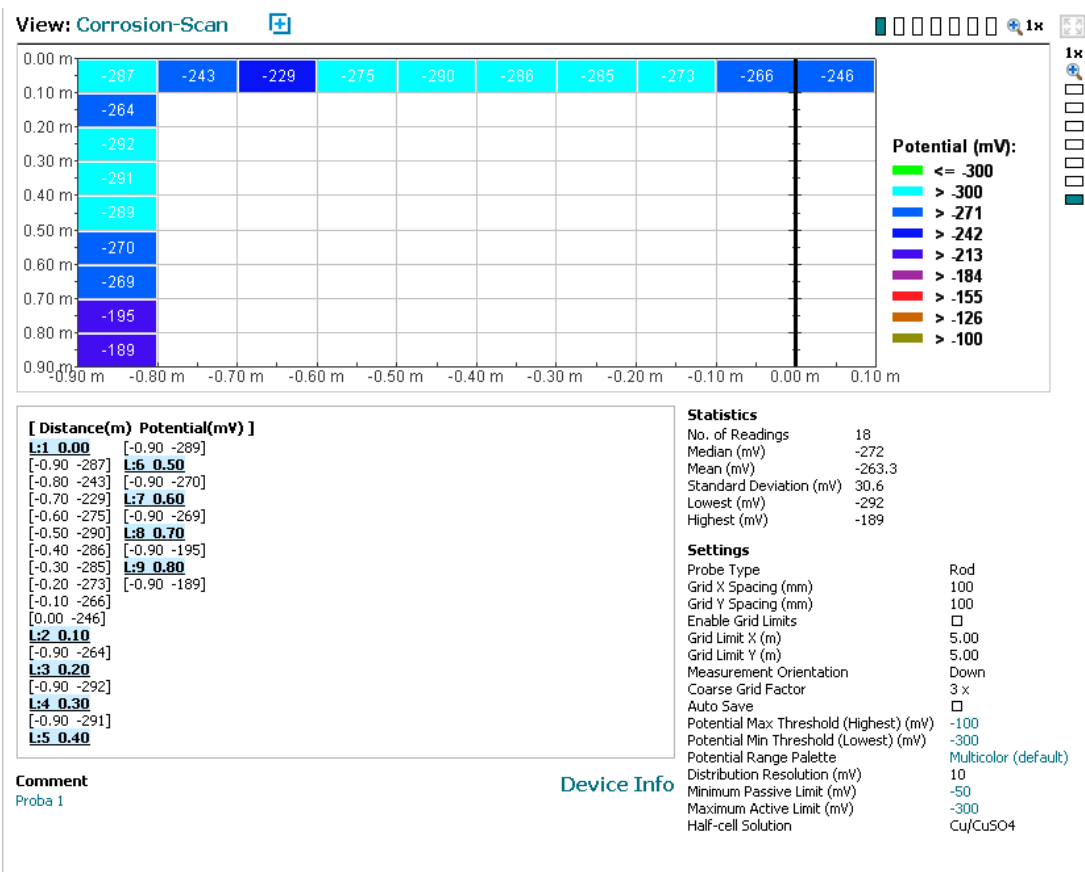
Z wyników zestawionych w tabeli 3 wynika, że większe zróżnicowanie w badanych próbkach ma grubość otuliny zbrojenia ($v = 32,8\%$) w porównaniu z miejscami korozji zbrojenia w pojedynczej próbce ($v = 18,9\%$).



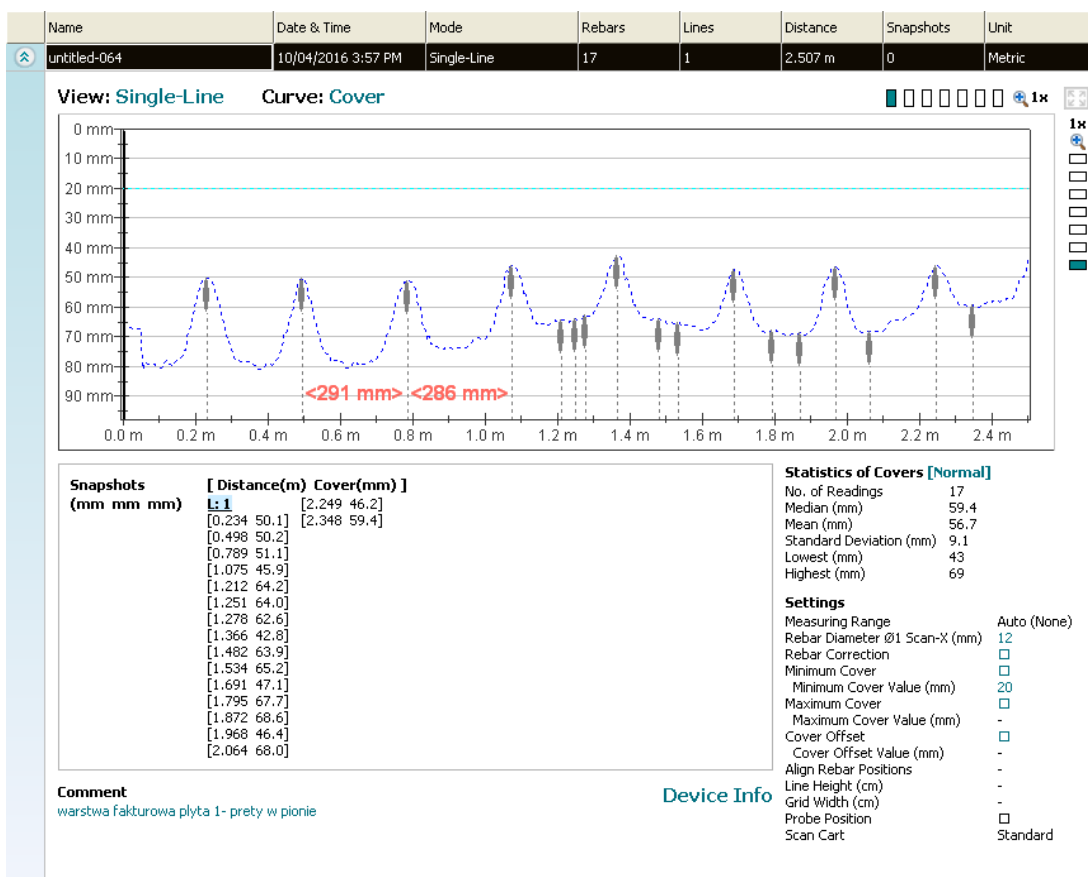
Rys. 6. Wykres grubości otuliny wieszaka w próbce numer 1



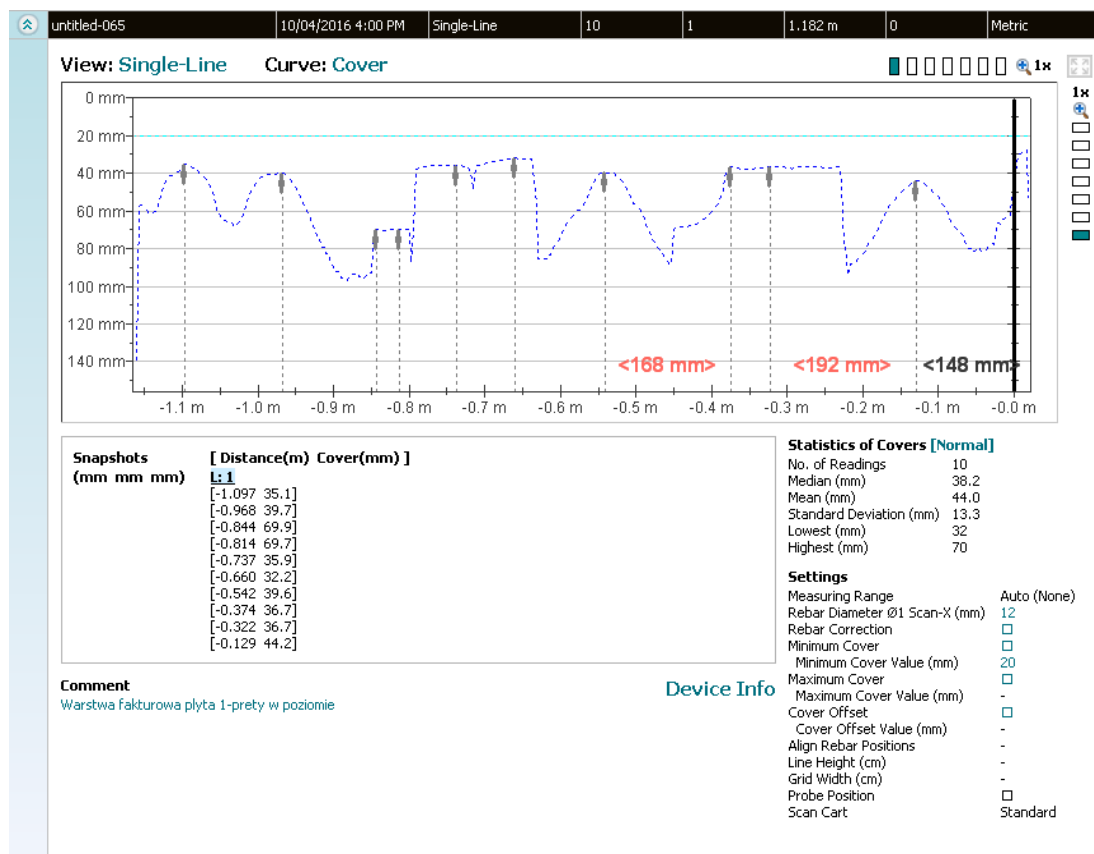
Rys. 7. Odczyt wyniku pomiaru grubości otuliny siatki zbrojeniowej w próbce numer 1



Rys. 8. Odczyt wyniku pierwszego pomiaru potencjalnych miejsc korozji zbrojenia próbki numer 1



Rys. 9. Odczyt pomiaru grubości otuliny zbrojenia w ścianie konstrukcyjnej – zbrojenie pionowe



Rys. 10. Odczyt pomiaru grubości otuliny zbrojenia w ścianie konstrukcyjnej – zbrojenie poziome

Tab. 3. Zestawienie wyników badań

Numer próbki	Nazwa urządzenia										
	Profometr PM-650					Profometr Corrosion					
	otulina [mm]					potencjalne miejsca korozji [mV]					
	min	max	średnia	mediana	odchylenie standardowe, s	min	max	średnia	mediana	odchylenie standardowe, s	
1	35	64	53,6	56,7	10,3	-283	-181	-256,3	-266	25,7	
2	41	90	54,4	51,3	15	-307	-163	-222,1	-226	44,4	
3	32	76	44,3	41,1	12,2	-264	-163	-182,7	-180	18,9	
4	32	130	86,3	85,6	27	-314	-179	-233,3	-236	43,1	
5	7	78	22,9	18,2	17,7	-362	-143	-247,0	-294	76,2	
6	6	40	18,1	16,9	9,6	-129	-40	-80,5	-77	22,5	
średnia	25,5	79,7	46,6	45,0	15,3	-276,5	-144,8	-203,7	-213,2	38,5	
współczynnik zmienności v [%]					32,8	współczynnik zmienności v [%]					18,9

5. Podsumowanie

Diagnostyka elementów konstrukcji żelbetowych lub prefabrykowanych odgrywa ważną rolę w bezpiecznej eksploatacji budynku. Dzięki niej można ocenić grubość betonowej otuliny, średnicę prętów zbrojeniowych lub oszacować stopień ich skorodowania.

Badania, które zostały wykonane za pomocą specjalistycznych urządzeń Profometr PM-650 oraz Psofometr Corrosion, prowadzone były na próbkach trójwarstwowych o wymiarach 40×20×17 cm. Za pomocą urządzenia Profometr PM-650 sprawdzano rozstaw prętów siatki zbrojeniowej oraz grubość otuliny w różnych punktach długości prętów. Za pomocą urządzenia Profometr Corrosion zlokalizowano potencjalne miejsca korozji zbrojenia. Na podstawie wyników badań wyznaczono miary rozproszenia wyników w postaci współczynników zmienności grubości otuliny zbrojenia oraz poziomu potencjalnej korozji tego zbrojenia.

Można wnioskować, że większe względne zróżnicowanie ma grubość otuliny zbrojenia (przy współczynniku zmienności równym 32,8%) w porównaniu do zróżnicowania miejsc zbrojenia najbardziej narażonych na korozję (przy współczynniku zmienności równym 18,9%). Wyniki badań wskazują na uzyskanie podczas projektowania próbek betonowych znacznie większych grubości otuliny zbrojenia niż były projektowane.

Badania tego typu stanowią jedną z możliwości diagnostyki konstrukcji sprawdzania stanu zbrojenia w sposób nieniszczący. Są to metody bardzo przydatne w przypadku braku dokumentacji projektowej lub kontroli ewentualnych odstępstw od projektu. Niewątpliwą zaletą badań opisanych w artykule jest brak konieczności wykonywania odkrywek i szybki czas realizacji.

Literatura

- Andrade C., Alonso C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, Vol. 37, 623-643.
- ASTM C876-91 (Reapproved 1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 03.02 (2006), 11-16.
- Baryłka A., Baryłka J. (2015). Diagnostyka techniczna obiektu budowlanego. *Budownictwo i Prawo*, 4/2015, 19-22.
- Baryłka A., Baryłka J. (2016). Eksploatacja obiektów budowlanych. Poradnik dla właścicieli i zarządców nieruchomości. *Wydawnictwo CRB Sp. z o.o.*, Warszawa.
- Błaszczczyński T., Łowińska-Kluge A., Runkiewicz L. (2010). Diagnostyka korozyjna obiektów żelbetowych. *Przegląd Budowlany*, 12/2010, 41-45.
- Instrukcja (2017a). Profometr PM-650. Proceq, Szwajcaria. Oprac. Viateco Sp. z o.o., Polska.

- Instrukcja (2017b). Zaawansowany analizator korozji zbrojenia Profometr Corrosion. Proceq, Szwajcaria. Oprac. Viateco Sp. z o.o., Polska.
- Instrukcja (2017c). Urządzenia do nieniszczącego badania konstrukcji budowlanych: Wytrzymałość betonu, detekcja zbrojenia, badanie metodą ultradźwiękową, pomiar siły adhezji, Analiza zagrożeń korozji, pomiar wilgotności. Materiały firmy Viateco Sp. z o.o., Polska.
- Józwiak J., Podgórski J. (2009). Statystyka od podstaw. *PWE*, Warszawa.
- Obolewicz J. (2014). Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia w budownictwie, Wyd. 2. *Wydawnictwo Unimedia*, Warszawa.
- Obolewicz J. (2015). Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia w budowlanym procesie inwestycyjnym. W: Bezpieczeństwo pracy w budownictwie. Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Lublin, 51-60.
- Obolewicz J., Tomaszewicz D. (2016). Problemy modernizacji budynków wielkopłytowych osiedli mieszkaniowych. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, 1/2016, 31-37.
- Rojek M. (2011). Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej. *Open Access Library*, Volume 2, 1-148.
- Sobczak-Piąstka J., Podhorecki A. (2013). Diagnostyka techniczna budynku wielkopłytowego. *Izolacje*, 11-12/2013, 22-26.
- Urbanowicz D., Warzocha M. (2015). Wykorzystanie urządzeń ferromagnetycznych w diagnostyce konstrukcji budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 5/2015, 32-35.
- Zybura A., Jaśniok T. (2006). Zagadnienia remontowe warstwy fakturowej ścian trójwarstwowych. *Materiały konferencyjne XXI Ogólnopolskiej Konferencji Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk, 8÷11 marca 2006 r., 287-352.
- Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T. (2011). Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, t. 2: Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. 2018 poz. 1202 – tekst jednolity).

REINFORCEMENT DIAGNOSTIC TEST OF CONCRETE SAMPLES IN THE CONTEXT TO THE SAFE EXPLOITATION PREFABRICATED BUILDING OBJECTS

Abstract: The paper presents one of the diagnostics systems for building objects by means of profometers. Three-layer samples were made to reproduce three-layer external walls in large-panel buildings. Next three-layer samples and a long window sill in the construction wall of a large-panel building were tested. The thickness of the cover, the diameter of the hanger bars and the degree of corrosion of the reinforcement were assessed. The application of research results in practice will allow further safe exploitation of large-panel construction works.

Badanie wykonano za pomocą urządzeń Profometr PM-650 i Profometr Corrosion udostępnionych dzięki uprzejmości firmy VIATECO Sp. z o.o.